

بررسی یک چارچوب مبتنی بر مدل‌سازی برای بهینه‌سازی مقطع عرضی سدهای خاکی مغزه‌دار

نازنین شاه‌کرمی^{۱*}، شهریار مختاری^۲

^۱ استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

^۲ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

دریافت: ۱۴۰۰/۳/۳، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

چکیده

سدهای خاکی مغزه‌دار یکی از پرکاربردترین سدها می‌باشند که ساخت آن‌ها از مقبولیت بالایی در بین طراحان سد برخوردار است. در این تحقیق یک متدولوژی برای بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی با هسته مرکزی قائم ارائه گردیده است. به این منظور از یک نرم‌افزار اجزاء محدود برای کنترل پایداری شیب، یک نرم‌افزار آماری جهت فرموله کردن ضریب اطمینان پایداری و نهایتاً یک الگوریتم فرا ابتکاری برای بهینه‌کردن مقطع عرضی سد خاکی استفاده شد. در ابتدا پس از صحت‌سنجی نرم‌افزار PLAXIS برای سد خاکی فرخی قائم و اطمینان از عملکرد مناسب آن، ضرایب اطمینان پایداری تحت شرط تراوش دائم برای ۵۰ مدل فرضی سد که همه دارای پنجه وزنی و سکو بودند، استخراج گردید. در ادامه در نرم‌افزار SPSS، مدلی ریاضی برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری به صورت یک تابع خطی از متغیرهای لحاظ‌شده به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و پیاده‌سازی الگوریتم PSO، بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی با شرط کنترل پایداری بدنه سد انجام شد. تابع هدف، حداقل شدن مقطع عرضی سد و متغیرها شامل ۱۷ مشخصه هندسی و تعدادی از مشخصات مصالح مصرفی در سد بود. در نهایت مدل بهینه بر روی سد فرخی قائم تست شد. نتایج کاهش ۱۳ درصدی سطح مقطع عرضی و ۱۳۸ هزار مترمکعبی حجم سد بهینه را نسبت به سد ساخته‌شده نشان داد که بیان‌گر کارایی و تعمیم‌پذیری مدل بهینه بر روی هر سد خاکی با هسته قائم می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، سد خاکی، PLAXIS، SPSS، PSO، سد فرخی قائم.

۱- مقدمه

برخوردار بوده، تحقیق و مطالعه محققین و طراحان مربوطه را می‌طلبد.

امروزه بسیاری از مسائل بهینه‌سازی به دلیل ابعاد بزرگ و پیچیدگی، در عمل با روش‌های بهینه‌سازی سنتی قابل حل نیستند. از طرفی در عمل در غالب اوقات تنها به جواب‌هایی برای این مسائل بهینه‌سازی نیاز است که مطلوب و مناسب باشند. به عبارت دیگر می‌توان به جواب غیر بهینه اما نسبتاً مناسب و خوب برای چنین مسائلی بسنده کرد. این هدف در چند دهه اخیر بشر را به تکاپو برای ایجاد ابزاری انداخت که به وسیله آن گرچه شاید نتوان به قله بهترین جواب دست یافت، اما بتوان به کمک آن تا نزدیکی قله و جواب‌های نزدیک به بهینه پیش رفت.

سدها از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشند. ملاحظات فنی و اقتصادی در سدهای بلند در ایران نشان داده است که در بسیاری از موارد سدهای خاکی با هسته رسی بر گزینه‌های دیگر سدها ارجحیت دارند. آمارها نشان می‌دهد بیش از نصف سدهای ساخته‌شده در کشورمان از نوع سدهای خاکی می‌باشند که خود اهمیت این نوع سدها را به دلایل گوناگونی آشکار می‌سازد (وفائیان، ۱۳۹۷). اجرای این طرح‌های استراتژیک، نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان می‌باشد. در جهانی که روزبه‌روز بر وخامت اوضاع اقتصادی ملت‌ها افزوده می‌شود و روزبه‌روز نیاز به تأمین آب سالم افزایش می‌یابد، اقتصاد طرح‌ها حائز اهمیت زیادی است، لذا استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و ارائه راهکارهای اقتصادی در کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت سدهای خاکی در کنار راهکارهای نگهداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۸۶-۳۲۶۲۵۳۰۲

۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر برابر یک سکو می‌باشد و یک سکو باعث بیش‌ترین کاهش حجم عملیات خاکی می‌گردد.

قدوسی و همکاران (۱۳۹۷) یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی را برای طراحی بهینه سدهای خاکی با هدف حداقل نمودن سطح مقطع سد (حجم مصالح مصرفی در واحد طول سد) و با اعمال قیدهایی که ایمنی شیروانی‌ها را تأمین نماید، ارائه کرده و کارایی مدل پیشنهادی خود در طراحی بهینه ابعاد سدهای خاکی بزرگ را بررسی نمودند. 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. متغیرهای طراحی با استفاده از نرم‌افزار LINGO نیز بهینه‌سازی گردید.

Roshani و Farsadizadeh (۲۰۱۲) به بهینه‌سازی هسته رسی در سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم PSO پرداختند. نکته جالب این تحقیق در تعریف تابع هدف بود که در آن هزینه کل آب از دست‌رفته و خاک‌برداری باید حداقل می‌شد. در محاسبه حجم تراوش ابتدا ترکیبی از ۶۰۰ شکل مختلف هسته به‌وسیله روش اجزا محدود، مدل‌سازی شده و سپس نتیجه برای آماده‌سازی یک شبکه اجزا عصبی به‌کار رفت. مقایسه این مدل با مدل رگرسیون خطی و لگاریتمی ثابت کرد که شبکه عصبی جریان آب را با دقت بیشتری ارزیابی می‌کند. سد خاکی علویان برای نشان-دادن مزایای استفاده از روش پیشنهادی بهینه‌سازی به‌عنوان یک مطالعه موردی استفاده شد.

Kunqiang و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بهینه‌سازی طول و ارتفاع پنجه وزنی^۸ جلوی مخزن سد پرداختند و نشان دادند که بهترین طول پنجه وزنی در دامنه ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ طول سد می‌باشد و همچنین ارتفاع پنجه وزنی باید حداقل ۰/۱۹ ارتفاع سد و حداکثر ۰/۳ ارتفاع سد باشد.

Murthy و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک سد خاکی را با هدف کاهش هزینه ساخت و با کنترل ضریب اطمینان با استفاده از یک مدل ریاضی غیرخطی در نرم‌افزار MATLAB بهینه نمودند. آن‌ها به بررسی مشکلات فرموله‌کردن طراحی بهینه و ارائه یک روش اکتشافی برای یک سد خاکی واقعی پرداختند. در آن تحقیق یک رویکرد جدید، رویکرد مبتنی بر وتر در پیدا کردن سطح لغزش دایره بحرانی، معرفی گردید.

Farzampour و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سد خاکی علویان با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند. ضخامت بزرگ‌تر هسته سد باعث کاهش تراوش اما ضعف مقاومت برشی می‌شود که این عامل می‌تواند برای سد

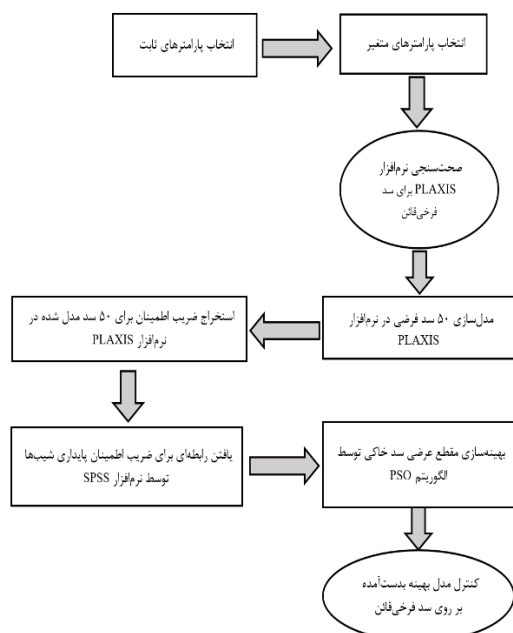
الگوریتم‌های فراابتکاری^۱ نامی آشنا، برای روش‌های بهینه‌یابی است که ره‌آورد تلاش‌های چند دهه اخیر اندیشمندان بشری می‌باشد. این روش‌ها که عموماً برگرفته از طبیعت می‌باشند، قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده را در زمانی مناسب دارند و جواب نزدیک به بهینه و مناسب را برای این مسائل می‌یابند. از نمونه این الگوریتم‌ها می‌توان به ازدحام ذرات (PSO)^۲، نورد شبیه‌سازی شده (SA)^۳، الگوریتم ژنتیک (GA)^۴، جستجوی ممنوعه (TS)^۵، الگوریتم جامعه مورچه‌ها (ACO)^۶ و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۷ اشاره کرد.

کاخی و همکاران در سال ۱۳۸۷ پیشنهادی را برای روند کلی طراحی بهینه‌سازی رایانه‌ای طرح سدهای خاکی بر اساس تشکیل یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مقید ارائه دادند. تابع هدف هزینه عملیات اجرایی طرح و توابع قیدی مجموعه شرایط آئین‌نامه‌ای و هندسی لازم برای کنترل تراوش و پایداری شیروانی‌های سد و محدودیت‌هایی بر مقادیر عوامل مؤثر متغیر بود. در این روش، توابع هدف و قیود عملکردی از طریق بررسی‌های آماری و تجربه و مطالعات طرح، به‌صورت توابع صریحی برحسب عوامل مؤثر متغیر تعیین شدند. درنهایت برای یافتن طرح بهینه از روش ریاضی به‌گزینی مقید SUMT استفاده کردند. منتصری و همکاران (۱۳۸۹) به بهینه‌سازی هسته رسی سدهای خاکی توسط الگوریتم ژنتیک با هدف حداقل‌کردن حجم ممکن برای مصالح هسته پرداختند. به‌منظور محاسبه قیود مربوط به تراوش، گرادیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان سدها از مدل‌های رگرسیونی جدیدی که بر اساس داده‌های تولیدشده برای سدهای فرضی با استفاده از تحلیل‌های آماری بود، استفاده گردید که عملکرد موفق را نشان داد.

نورزاد و رضاییان (۱۳۹۰) به بررسی تعداد سکوها بر بهینه‌سازی مقطع سدهای خاکی با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌ها (ACO) پرداختند. تحقیق آن‌ها منتج به این شد که برای سدهای خاکی و خاکریزهای با ارتفاع کوتاه‌تر از ۴۰ متر متشکل از خاک‌های درشت‌دانه که بر روی پی‌های سنگی بسیار مقاوم قرار گرفته‌اند، استفاده از سکوها با تعداد و پهنا و چیدمان مناسب در مقطع، می‌تواند موجب کاهش حجم عملیات خاکی بیش از ده‌درصدی نسبت به حالت بدون سکو شود. اما هر چه ارتفاع سد خاکی مرتفع‌تر از ۴۰ متر شود از اثر سکوها در کاهش حجم عملیات خاکی سدهای خاکی کاسته شده و استفاده از سکوها تنها جنبه رفع نیازهای اجرایی سد را دارد. همچنین درجایی دیگر از تحقیق خود بیان می‌کنند که تعداد بهینه سکو برای ارتفاع‌های ۵،

5. Tabu Search
6. Ant Colony Optimization
7. Artificial Neural Network
8. Toe weight

1. Metaheuristic
2. Particle swarm optimization
3. Simulated Annealing
4. Genetic Algorithm



شکل ۱- فلوچارت بهینه‌سازی مقطع عرضی سدهای خاکی در تحقیق حاضر

۲-۲- مشخصات سد خاکی فرخی قائن

سد خاکی فرخی قائن از نوع سدهای خاکی ناهمگن با هسته قائم رسی با ارتفاع ۱۹ متر از بستر رودخانه، ارتفاع نرمال ۱۴ متر، حجم مخزن ۹ میلیون مترمکعب، طول تاج ۹۲۷ متر و عرض تاج ۸ متر می‌باشد. این سد در شمال استان خراسان جنوبی، در فاصله ۱۵۰ کیلومتری شمال شهر بیرجند و در ۴۱ کیلومتری شهر قائن واقع است. هدف از احداث این سد مخزنی تأمین آب جهت آبیاری اراضی کشاورزی روستای فرخی و روستاهای پایین‌دست، بهبود و توسعه اراضی کشاورزی منطقه و کنترل سیل می‌باشد. مشخصات هندسی سد در شکل (۲) و ویژگی مصالح به کار رفته در آن در جدول (۱) ارائه شده است (گزارش مطالعات احداث سد فرخی قائن، ۱۳۸۸).

۲-۳- کنترل پایداری سدهای خاکی در نرم‌افزار PLAXIS

در تحلیل پایداری انجام‌شده در این تحقیق، بررسی‌ها به صورت استاتیکی در شرایط تراوش دائم با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS انجام شده است. PLAXIS نرم‌افزاری المان محدود پیشرفته برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری سازه‌های خاکی در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک است. در این نرم‌افزار مدل‌های رفتاری موهر-کلمب^۱، مدل سخت‌شوندگی هذلولی، مدل نرم-شوندگی (مدل Cam-Clay) و مدل نرم‌شوندگی خزشی (Soft Soil Creep Model) قابل به‌کارگیری است.

خطرناک باشد. آن‌ها ۱۱ مدل مختلف از سدهای خاکی را مدل و با استفاده از نرم‌افزار ژئواستادیو^۲ ضریب اطمینان و تراوش آن‌ها را استخراج کردند. سپس به وسیله نرم‌افزار SPSS داده‌ها را تحلیل و روابطی برای ضریب اطمینان و تراوش استخراج نمودند و در پایان با استفاده از قابلیت SOLVER نرم‌افزار Excel به بهینه‌سازی ضخامت هسته پرداختند.

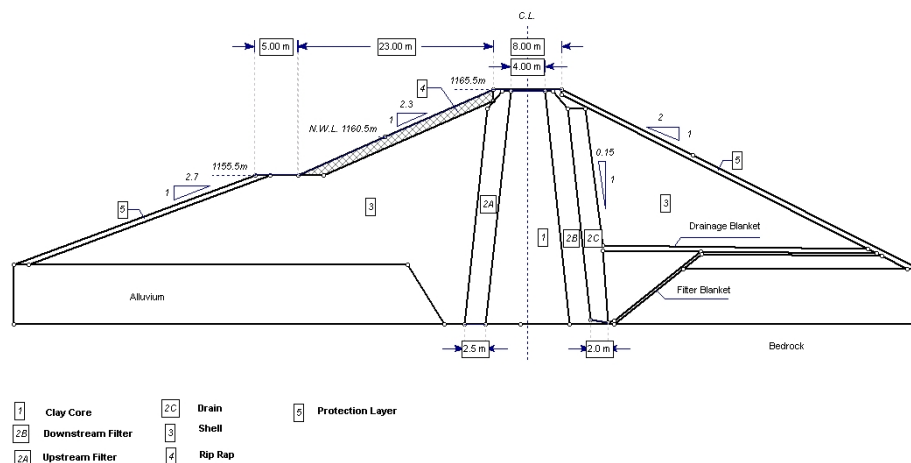
Rezaeian و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها (ACO) پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که به‌کارگیری بهینه مقدار برای شیب و مشخصات سکوها در سدهای خاکی با ارتفاع‌های مختلف، در مقایسه با سدهای بدون سکو و یا سدهای سکوداری که با شیوه طراحی معمول سعی و خطا به دست آمده‌اند، می‌تواند حجم خاک‌ریزی را کاهش دهد.

در تحقیق حاضر به بهینه‌سازی مقطع عرضی سدهای خاکی به‌عنوان قسمت اصلی هزینه سد و با کنترل پایداری شیب‌های سد در شرایط تراوش دائم پرداخته شده است. به استناد نتایج منابع بررسی‌شده، یک چارچوب مبتنی بر مدل‌سازی مشخص گردیده است. به‌منظور تأمین عرض لازم در هر ارتفاع و همچنین امکان تغییر شیب با ارتفاع، همه سدها از نوع سکودار انتخاب شدند. همچنین در قسمت پاشنه سدها از پنجه وزنی که از عوامل افزایش پایداری و کنترل روانگرایی می‌باشد، استفاده گردیده است. در این تحقیق، هدف تعیین پارامترهای متغیر بهینه برای مقطع عرضی سد و تعدادی از مشخصات مصالح به‌کاررفته در بدنه، با شرط کنترل پایداری بدنه سد می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- متدولوژی انجام تحقیق

در این پژوهش برای کاهش هزینه ساخت یک سد خاکی، بهینه‌سازی سطح مقطع عرضی سد و تعیین متغیرهای طراحی لازم با استفاده از الگوریتم PSO انجام شده است. برای کنترل درستی جواب‌ها، کنترل ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در شرایط تراوش دائم صورت گرفته است. به‌منظور به‌دست آوردن تابعی برای ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها از برنامه SPSS بر اساس سری متغیرهای مستقل شامل تعدادی از مشخصات هندسی و مشخصات مصالح سد خاکی استفاده شده است. این سری متغیرها و ضریب اطمینان متناظرشان خود خروجی حاصل از تحلیل ۵۰ سد فرضی در PLAXIS بوده است. فلوچارت انجام مراحل بهینه‌سازی این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۲- مشخصات هندسی سد خاکی فرخی قائن (گزارش مطالعات احداث سد فرخی قائن، ۱۳۸۸)

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح به کار رفته در سد خاکی فرخی قائن (گزارش مطالعات احداث سد فرخی قائن، ۱۳۸۸)

لایه	ضریب پواسون ^۱	وزن مخصوص ^۲ (KN/m ³)	وزن مخصوص اشباع (Ysat) (KN/m ³)	مدول الاستیسیته (E) (KN/m ²)	ضریب چسبندگی (c) (KN/m ²)	زاویه اصطکاک داخلی (φ) درجه
هسته	۰/۴	۲۰/۵	۲۱/۲	۳۰۰۰	C _{uv} = ۴۲	φ _{uv} = ۰
پوسته	۰/۳۷	۲۲	۲۲/۴	۳۰۰۰	C _{cu} = ۴۵	φ _{cu} = ۲۱
فیلتر	۰/۳۵	۲۰/۵	۲۱	۱۰۰۰	C _{cd} = ۴۵	φ _{cd} = ۲۲
زهکش	۰/۳۵	۲۲	۲۳	۱۰۰۰		۴۱/۵
آبرفت	۰/۳۵	۲۰	۲۱	۸۰۰		۳۰

گردید (روابط (۱) تا (۳)). هرچه شاخص R^2 به یک و سایر شاخص‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر است. در این روابط متغیرهای n ، x_{ci} و x_{mi} به ترتیب تعداد داده‌ها، مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده هستند.

$$R^2 = \frac{[n(\sum_{i=1}^n x_{ci}x_{mi}) - (\sum_{i=1}^n x_{ci})(\sum_{i=1}^n x_{mi})]^2}{[n\sum_{i=1}^n x_{ci}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ci})^2] \cdot [n\sum_{i=1}^n x_{mi}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{mi})^2]} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{mi} - x_{ci}|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{mi} - x_{ci})^2}{n}} \quad (3)$$

در آنالیزهای دوبعدی امکان انتخاب دو نوع المان ۶ گره‌ای و ۱۵ گره‌ای مثلثی در تحلیل‌ها وجود دارد که برای دستیابی به دقت بیشتر در محاسبات تنش‌ها و بارها و گسیختگی از المان‌های ۱۵ گره‌ای استفاده می‌شود (Brinkgreve, ۲۰۰۶).

۲-۴- معیارهای ارزیابی مدل ریاضی در نرم‌افزار SPSS

SPSS نرم‌افزاری است که برای تحلیل‌های آماری به کار می‌رود. به منظور ارزیابی کارایی رابطه ریاضی ایجادشده توسط SPSS در محاسبه ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)^۱، متوسط قدر مطلق خطاها (MAE)^۲ و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^۳ برای محاسبه خطا استفاده

۲-۵- بهینه‌سازی

بهینه‌سازی عبارت است از یافتن بهترین ترکیب از داده‌های ورودی به نحوی که بهترین عملکرد سیستم با لحاظ شرایط محدودکننده، عاید گردد. در چنین مسائلی عملکرد سیستم به‌عنوان تابع هدف، داده‌های ورودی با نام متغیرهای طراحی و شرایط محدودکننده به‌عنوان قیود، معرفی می‌گردند. در بسیاری از مسائل مهندسی، بهینه‌یابی با استفاده از روش‌های ریاضی صورت می‌پذیرد. در این روش‌ها ابتدا الگوی ریاضی هر طرح رابطه‌سازی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر به‌منظور کاهش هزینه‌ها ابتدا تابع هدف با استفاده از فرمول‌های ریاضی تشکیل می‌شود (کیخا، ۱۳۸۵).

از آنجائی که در فرایند طراحی بهینه سد خاکی، بررسی تمام عوامل طراحی در قالب متغیرهای تصمیم امکان‌پذیر نیست، لذا با توجه به اهمیت و از طرف دیگر محدودیت‌های موجود، تعدادی از این فاکتورها به‌صورت پارامتر ثابت و تعدادی متغیر لحاظ می‌شود. روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی را برای چنین مسائلی نمی‌توان به‌کار برد چون تعداد متغیرها بسیار زیاد است و رابطه بین آن‌ها و تابع هدف از نوع غیرخطی و بی‌شرط است. دانشمندان استفاده از فن‌های جدید بهینه‌سازی مثل الگوریتم‌های فراابتکاری را پیشنهاد می‌دهند که در آن‌ها تعداد زیادی از متغیرها می‌توانند به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی شوند.

۲-۶- الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق^۱ و الگوریتم‌های تقریبی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به‌صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. الگوریتم‌های تقریبی نیز به سه دسته الگوریتم‌های ابتکاری^۳ و فراابتکاری^۴ و فوق ابتکاری^۵ بخش‌بندی می‌شوند. دو مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی، همگرایی زودرس به این نقاط است. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل این مشکلات ارائه شده‌اند. در واقع الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای راهکارهای برون‌رفت از نقاط بهینه محلی هستند و قابلیت کاربرد در طیف

گسترده‌ای از مسائل را دارند (مریخ بیات، ۱۳۹۳).

روش‌های فرا ابتکاری به‌عنوان یک جزء اساسی در حل مسائل بهینه‌سازی مرکب کاربرد دارند. با ابداع این روش‌ها در اوایل دهه ۱۹۸۰ و گسترش چشمگیر و مؤثر آن‌ها، موفقیت گسترده‌ای در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی مشکل و خاص داشته‌اند. در سال‌های اخیر الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات PSO^۶ در بسیاری از مسائل ساختاری و هیدرولیکی استفاده شده است.

۳- تحلیل و نتایج

به‌منظور طراحی بهینه مقطع عرضی سدهای خاکی همان‌طور که در شکل (۱) نمایش داده شده است، لازم است که ابتدا داده‌های لازم در طراحی به دو دسته ثابت و متغیر تقسیم شوند. به‌منظور تولید ردیف داده‌های لازم برای فرآیند بهینه‌سازی و مقادیر ضریب اطمینان متناظر با هر ردیف داده بایستی قبل از فرآیند بهینه‌سازی به تولید این ردیف داده‌ها در نرم‌افزار PLAXIS اقدام نمود. لازم به ذکر است که منظور از هر ردیف داده، مجموعه داده‌های ثابت و متغیر در طراحی یک سد خاکی است. درنهایت با استفاده از مدل بهینه‌سازی PSO که کد آن در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است، برای هر ارتفاع سد، مدل بهینه سد یعنی مجموعه متغیرهای لازم برای طراحی مقطع عرضی آن سد تولید می‌گردد.

۳-۱- انتخاب پارامترهای طراحی در مدل‌سازی

در مدل‌سازی انجام‌گرفته در این تحقیق دو نوع پارامتر وجود دارد، دسته اول پارامترهایی هستند که مقدار آن‌ها ثابت در نظر گرفته شده‌اند و دسته دوم متغیرهایی هستند که مقدار آن‌ها در طول بهینه‌سازی مشخص می‌گردد.

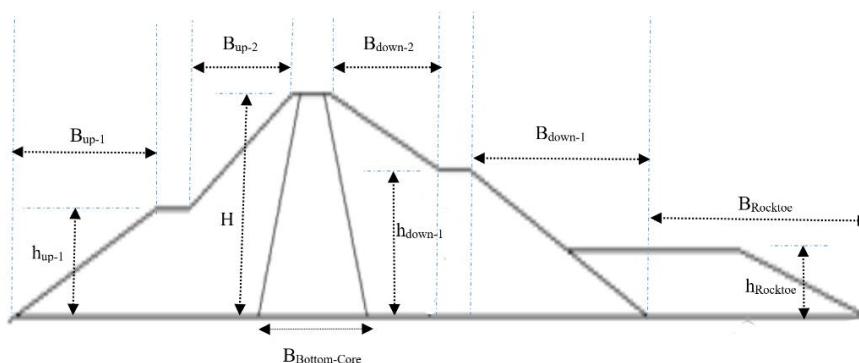
۳-۱-۱- پارامترهای ثابت در مدل‌سازی

برای انتخاب مقادیر ثابت می‌توان از توصیه‌های موجود در مراجع معتبر و یا از داده‌های یک سد واقعی استفاده نمود. داده‌های ثابت این تحقیق تعدادی از مشخصات هندسی و مصالح سد است. پارامترهای ثابت مربوط به مصالح بر اساس مصالح سد خاکی فرخی-قائن و تعدادی از مشخصات هندسی شامل عرض تاج، عرض هسته در محل تاج، ضخامت لایه‌های انتقالی بالادست و پایین دست هسته بر اساس توصیه‌های موجود در مراجع رحیمی (۱۳۹۲) و وفائیان (۱۳۹۷) انتخاب گردیده است. با استناد به به‌کارگیری این مقادیر،

4. Meta-heuristic
5. Hyper heuristic
6. Particle Swarm Optimization

1. Exact
2. Approximate algorithms
3. Heuristic

داده‌ها و استخراج ضریب اطمینان از نرم‌افزار PLAXIS استفاده شد. شکل (۳) نشان‌دهنده متغیرهای موردنیاز در هندسه سد برای به-دست آوردن مساحت مقطع سد می‌باشد. این متغیرها شامل طول شیب اول بالادست (B_{up-1})، طول شیب دوم بالادست (B_{up-2})، طول شیب دوم پایین‌دست (B_{down-2})، طول شیب اول پایین‌دست (B_{down-1})، ارتفاع شیب اول بالادست (h_{up-1})، ارتفاع شیب اول پایین‌دست (h_{down-1})، عرض قاعده هسته ($B_{bottom-core}$)، ارتفاع سد (H)، طول پنجه وزنی ($B_{Rocktoe}$) و ارتفاع پنجه وزنی ($h_{Rocktoe}$) می‌باشند. متغیرهای مربوط به مشخصات خاک هم شامل ضریب اصطکاک داخلی هسته (ϕ_{core})، ضریب چسبندگی هسته (C_{core})، وزن مخصوص خشک هسته ($\gamma_{dry-core}$)، وزن مخصوص مرطوب هسته ($\gamma_{wet-core}$)، ضریب اصطکاک داخلی پوسته (ϕ_{shell})، وزن مخصوص خشک پوسته ($\gamma_{dry-shell}$) و وزن مخصوص مرطوب پوسته ($\gamma_{wet-shell}$) می‌باشند.



شکل ۳- پارامترهای متغیر هندسی لحاظ شده در روند مدل‌سازی تحقیق

واسنجی پارامترهای آن، تأیید مدل رفتاری به‌کار رفته و تعیین اندازه‌مش‌های مناسب، در اولین گام انجام این تحقیق، سد فرخی-قائن در نرم‌افزار PLAXIS مدل شده (شکل‌های (۴) و (۵)) و در شرایط تراوش دائم، پایداری استاتیکی آن تحلیل و ضریب اطمینان پایداری شیب پایین‌دست محاسبه شد و با مقدار ضریب اطمینان سد متناظر (شکل (۶)) ارائه‌شده در گزارش طراحی سد فرخی قائن (۱۳۸۸) مقایسه گردید. با آنالیز این مدل در نرم‌افزار PLAXIS ضریب اطمینان ۱/۵۸ به‌دست آمد که دارای اختلاف ۵ درصدی با مدل به‌دست‌آمده در گزارش طراحی سد فرخی قائن بود که این مقدار تفاوت در بازه قابل‌قبول می‌باشد. البته باید متذکر شد که نرم‌افزار PLAXIS به‌کار رفته در این تحقیق برای محاسبه ضریب اطمینان از روش المان محدود استفاده کرده، حال آن‌که ضریب اطمینان متناظر در گزارش بر پایه روش تعادل حدی و مدل

هم می‌توان در گام‌های بعدی از صحت عملکرد مدل‌های به‌کار رفته (مدل محاسبه ضریب اطمینان پایداری و مدل بهینه‌سازی) با مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج واقعی مربوط به سد فرخی قائن اطمینان حاصل نمود و هم دقت روند مدل‌سازی را افزایش داد؛ زیرا که پارامترهایی که در روند بهینه‌سازی از بهینه‌کردن مقادیر آن‌ها صرف‌نظر می‌شود برای تمامی سدها دارای مقدار برابری هستند و به علت یکسان بودن باعث بروز خطا در مسئله نمی‌گردند.

۳-۱-۲- پارامترهای متغیر در مدل‌سازی

در فرآیند بهینه‌سازی مقادیر بهینه پارامترهای متغیر به دست می‌آید. مقادیر این سری داده‌ها که شامل تعدادی از مشخصات هندسی سد و مشخصات مصالح سد می‌باشند، بایستی با لحاظ قیود اعمال‌شده که در اینجا حفظ پایداری شیب سدها در شرایط تراوش دائم است، بهینه گردند. در این تحقیق به‌منظور تولید این سری از

۳-۲- محاسبه ضریب اطمینان پایداری بدنه سدهای خاکی در نرم‌افزار PLAXIS

برای به‌دست آوردن تابعی برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیب، نیاز به یک سری سد و ضریب اطمینان‌های آن‌ها است. به این منظور لازم است که سدهایی درون نرم‌افزار PLAXIS مدل شده و ضریب اطمینان پایداری شیب آن‌ها استخراج شود. در این تحقیق مدل کرنش مسطح با المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی و مدل رفتاری موهر-کلمب تعریف شده است.

۳-۲-۱- مدل‌سازی سد فرخی قائن در نرم‌افزار PLAXIS به‌منظور صحت‌سنجی

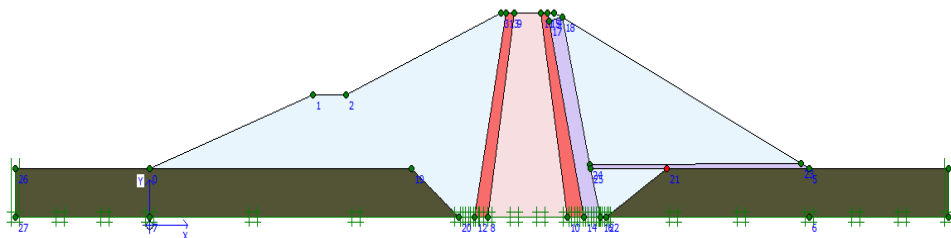
به‌منظور بررسی صحت عملکرد مدل PLAXIS ایجادشده در محاسبه ضریب اطمینان پایداری شیب سدهای خاکی فرضی و

Slope/w به دست آمده است.

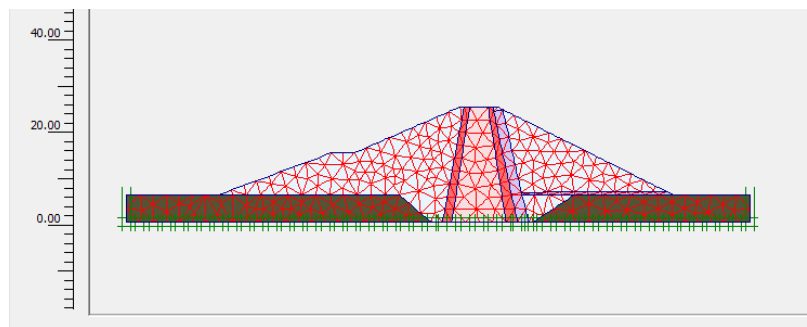
PLAXIS مدل شد.

لازم به ذکر است که همه سدها از نوع سکودار با هسته مرکزی قائم و دارای پنجه وزنی انتخاب شدند. به استناد مرجع نورزاد و رضاییان (۱۳۹۰) و همچنین به دلیل کاهش پیچیدگی مربوط به محاسبه سطح مقطع بر اساس متغیرهای هندسی لحاظ شده، یک سکو در بالادست و یک سکو در پایین دست سدهای فرضی لحاظ شد.

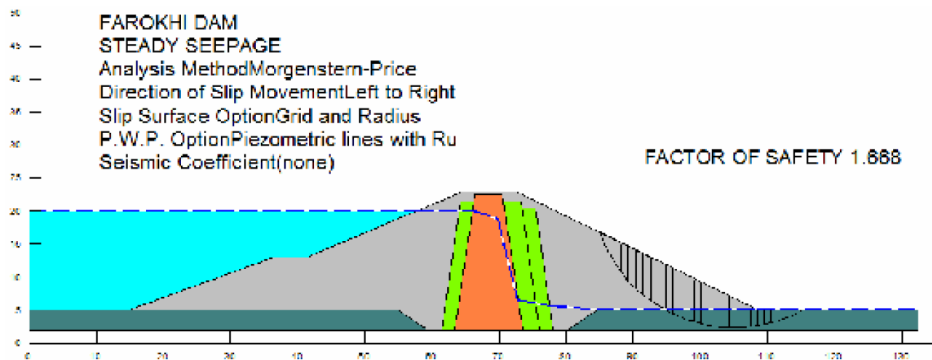
۲-۲-۳- مدل سازی سدهای فرضی در نرم افزار PLAXIS
 برای مدل سازی ۵۰ سد فرضی برای هر یک از متغیرها مقداری متفاوت در نظر گرفته شد به طوری که ۵۰ ردیف داده شامل پارامترهای ثابت و متغیر هرکدام به طور جداگانه در نرم افزار



شکل ۴- سد فرخی قائم مدل شده در نرم افزار PLAXIS



شکل ۵- مش بندی منتخب سد فرخی قائم در نرم افزار PLAXIS (مش ریز)



شکل ۶- مدل ارائه شده در گزارش طراحی سد فرخی قائم در نرم افزار Slope/W (۱۳۸۸)

با توجه به مدل‌هایی که در برنامه PLAXIS ساخته گردید و مقایسه آن‌ها با یکدیگر به این نتیجه رسیده شد که پنجه وزنی می‌تواند باعث افزایش ضریب اطمینان پایداری گردد به طوری که در مدل‌هایی که توسط نرم‌افزار PLAXIS ساخته شد با شرایط یکسان مدل‌هایی که دارای پنجه وزنی بودند در مقایسه با مدل‌هایی که فاقد آن بودند دارای ضریب اطمینان پایداری بالاتری را ارائه می‌دادند. لذا همه مدل‌های استفاده‌شده برای گام بعد از میان سدهای دارای پنجه وزنی انتخاب گردید.

در فازهای محاسباتی در فاز اول تنش اولیه از روش Gravity loading، در فاز دوم تغییر شکل‌ها و وضعیت تنش‌ها در بدنه سد به صورت Plastic و در فاز سوم ضریب اطمینان شیروانی در مقابل لغزش به کمک روش phi/c reduction محاسبه گردید. مهم‌ترین خروجی نرم‌افزار PLAXIS که در این تحقیق به آن نیاز است، ضریب اطمینان پایداری شیب بود. ضریب اطمینان سدهای فرضی مدل شده به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۲- ضریب اطمینان سدهای فرضی مدل‌شده در نرم‌افزار PLAXIS

شماره مدل	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ضریب اطمینان	۱/۷۲	۱/۷۳	۱/۹۶	۱/۸۱	۱/۴۶	۲/۳	۲/۲۵	۱/۹	۱/۶۹	۱/۶
شماره مدل	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
ضریب اطمینان	۲/۲	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲۳	۱/۰۳	۱/۰۹	۱/۱۹	۱/۱۷	۱/۲۲
شماره مدل	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
ضریب اطمینان	۱/۲۴	۱/۲۵	۱/۳۱	۱/۶۹	۱/۸۹	۱/۷۳	۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۴۱	۱/۳۴
شماره مدل	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
ضریب اطمینان	۱/۸۴	۱/۹۱	۲/۲۷	۱/۹۵	۱/۲۵	۱/۸۷	۲/۰۱	۱/۸۵	۱/۵۱	۱/۴۹
شماره مدل	۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹	۵۰
ضریب اطمینان	۱/۳۳	۱/۴۶	۱/۴۳	۱/۲۱	۱/۰۷	۱/۳۵	۱/۴۸	۱/۵۰	۱/۶۱	۱/۴۱

ضریب تعیین R^2 این رابطه که بیانگر میزان تغییرات متغیر وابسته به وسیله ۱۷ متغیرهای مستقل تبیین می‌شود؛ برابر ۰/۹۵۲ به دست آمد که مقدار قابل قبولی است.

در ادامه برای اطمینان از آن که رابطه به دست آمده برای تمام داده‌های دیگر نیز دارای اعتبار هست، رابطه (۴) با استفاده از داده‌های باقی‌مانده (۸ سری داده) صحت‌سنجی گردید. به این منظور برای این سری داده‌ها یکبار ضریب اطمینان با استفاده از مدل PLAXIS محاسبه شد (X_{mi}) و بار دیگر با استفاده از رابطه (۴) مستخرج از SPSS محاسبه گردید (X_{ci}) (جدول (۳)) و سپس با استفاده از روابط (۱) تا (۳) ضرایب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه گردید که نتایج آن در ردیف‌های انتهایی جدول (۳) آمده است. مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های خطا نشان‌دهنده آن است که رابطه به دست آمده در محاسبه ضریب اطمینان پایداری سد خاکی دارای اعتبار می‌باشد و برای هر داده دیگری قابل تعمیم می‌باشد.

۳-۳- استخراج رابطه ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی در نرم‌افزار SPSS

در این مرحله با در دست داشتن ردیف متغیرها و ضرایب اطمینان پایداری محاسبه‌شده برای آن‌ها در نرم‌افزار PLAXIS برای ۵۰ سد فرضی، رابطه‌ای میان ضریب اطمینان پایداری شیب به عنوان متغیر مستقل و متغیرهای مسئله طراحی با استفاده از روش آنالیز رگرسیون خطی نرم‌افزار SPSS ایجاد گردید. به منظور اطمینان از صحت عملکرد رابطه تولیدشده حدود ۷۵ درصد سری داده‌ها برای واسنجی و ۱۵ درصد (۸ سری داده) برای صحت‌سنجی به کار رفت. آنالیز انجام‌شده در SPSS منجر به رابطه (۴) برای محاسبه ضریب اطمینان (F) بر اساس متغیرهای مستقل گردید.

$$F = -3.118 + (0.006. B_{up-1}) - (0.007. B_{up-2}) + (0.006. B_{down-2}) + (0.013. B_{down-1}) - (0.037. h_{up-1}) - (0.020. h_{down-1}) - (0.004. B_{bottom-core}) + (0.01. H) + (0.001. B_{Rocktoe}) - (0.001. h_{Rocktoe}) + (0.003. \phi_{core}) + (0.015. C_{core}) - (0.009. \gamma_{dry-core}) + (0.098. \gamma_{wet-core}) + (0.088. \phi_{shell}) - (0.083. \gamma_{dry-shell}) + (0.031. \gamma_{wet-shell}) \quad (۴)$$

- شیب پایین دست پنجه‌وزنی با شیب دامنه پایین دست سد یکسان است.

- ارتفاع هسته تا تاج سد رسیده است.

- بهترین طول پنجه وزنی در دامنه ۰/۴۵ تا ۰/۵۵ طول سد و ارتفاع پنجه وزنی در دامنه ۰/۱۹ تا ۰/۳ ارتفاع سد باشد (Kunqiang و همکاران، ۲۰۱۲).

- حداقل عرض هسته در قسمت تاج سد ۳ متر (رحیمی، ۱۳۹۲) و حداکثر آن برابر عرض تاج سد منهای ضخامت فیلترهای بالادست و پایین دست باشد.

- عرض قاعده هسته از رابطه (۷) تبعیت کند (رحیمی، ۱۳۹۲):

$$0.5H \leq B_{down-Core} \leq 1.5H \quad (7)$$

- حداقل عرض تاج سد ۴ متر است (وفائیان، ۱۳۹۷).

- طبق توصیه سدسازی ژاپن عرض تاج سد از رابطه (۸) (وفائیان، ۱۳۹۷) حاصل شود:

$$B_{crest} = \frac{5}{3} H^2 \quad (8)$$

- شیب هر یک از دامنه‌ها (نسبت طول افقی به طول عمودی) در بالادست و پایین دست بین ۱/۵ تا ۶ باشد (وفائیان، ۱۳۹۷):

$$1.5 \leq \frac{B_{up-1}}{h_{up-1}} \leq 6, \quad 1.5 \leq \frac{B_{down-1}}{h_{down-1}} \leq 6 \quad (9)$$

$$1.5 \leq \frac{B_{up-2}}{H-h_{up-1}} \leq 6, \quad 1.5 \leq \frac{B_{down-2}}{H-h_{down-1}} \leq 6 \quad (10)$$

- همچنین به استناد مرجع قدوسی و همکاران (۱۳۹۷) روابط (۱۱) و (۱۲) نیز برای شیب بالادست معتبر باشد:

$$\tan \phi_{shell} \leq \frac{B_{up-1}}{h_{up-1}} \quad (11)$$

$$\tan \phi_{shell} \leq \frac{B_{up-2}}{H-h_{up-1}} \quad (12)$$

برای ساخت هر سد، اولین چیزی که بایستی تعیین گردد، ارتفاع سد می‌باشد، زیرا که ارتفاع سد بر اساس اطلاعات سیلاب طراحی که سیلابی است که در شرایط عادی و با ارتفاع آزاد مطمئن، از سرریز سدها تخلیه می‌شود، تعیین می‌گردد. پس می‌توان پس از تعیین ارتفاع سد از مطالعات هیدرولوژیکی، در رابطه مساحت سد و ضریب اطمینان، ارتفاع سد را جایگذاری نمود. همچنین در صورت استفاده از مصالح با مشخصات ثابت در بخش‌های مختلف بدنه سد، می‌توان مقادیر آن‌ها را نیز به‌عنوان پارامتر ثابت وارد مدل‌ها کرده

جدول ۳- ضرایب آماری ارزیابی اعتبار مدل به‌دست‌آمده برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی

ضریب اطمینان حاصل از مدل SPSS X_{ci}	ضریب اطمینان حاصل از PLAXIS X_{mi}
۱/۸۲۹	۱/۸۰۸
۲/۱۵۳	۲/۲۹۸
۱/۷۸۲	۱/۸۶۷
۱/۸۳۸	۱/۸۹
۱/۶۷۴	۱/۶۹
۱/۲۲۷	۱/۲۲۲
۱/۵۴۸	۱/۵۰۸
۱/۳۷	۱/۲۲۶
$R^2 = 0.975$	
$RMSE = 0.082$	
$MAE = 0.064$	

۳-۴- بهینه‌سازی حجم بدنه سد خاکی

پس از به‌دست‌آوردن رابطه‌ای برای ضریب اطمینان پایداری شیب توسط نرم‌افزار SPSS، به بهینه‌سازی مساحت مقطع سد توسط الگوریتم PSO و تحت شرط کنترل ضریب اطمینان پایداری پرداخته شد. برای کدنویسی الگوریتم بهینه‌سازی، از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Matlab استفاده شد. در این الگوریتم مقدار مساحت مقطع سد که بایستی بهینه گردد، به‌صورت یک تابع به برنامه معرفی شد (رابطه (۵)).

Function Y=AREA (u)

$$Y = \left(\frac{B_{up-1} \times h_{up-1}}{2} \right) + (4 \times h_{up-1}) + \left(\frac{(h_{up-1} + H) \times B_{up-2}}{2} \right) + (B_{crest} \times H) + \left(\frac{(H + h_{down-1}) \times B_{down-2}}{2} \right) + (4 \times h_{down-1}) + \left(\frac{B_{down-1} \times h_{down-1}}{2} \right) + (B_{Rocktoe} \times h_{Rocktoe}); \text{end} \quad (5)$$

قید مربوط به کنترل پایداری شیب بدنه سد بر اساس استاندارد USBR (وفائیان، ۱۳۹۷) به‌صورت رابطه (۶) تعریف گردید:

$$F \geq 1.5 \quad (6)$$

در مدل بهینه سعی شد علاوه بر اعمال قید مربوط به ضریب اطمینان، قیود هندسی و قیود مربوط به مشخصات خاک نیز بر اساس توصیه‌های مراجع معتبر طوری اعمال شوند که نتایج به‌دست‌آمده برای سد بهینه، مشخصات یک سد واقعی را داشته باشد. تعدادی از فرضیات و قیود هندسی اعمال‌شده در الگوریتم بهینه‌سازی به‌صورت زیر است:

تعدادی از مشخصات مصالح انتخاب شد و با استفاده از ۵۰ سری داده به‌دست‌آمده از گام قبل، یک رابطه ریاضی خطی در نرم‌افزار SPSS بین این متغیرها برای محاسبه تابع ضریب اطمینان به‌دست‌آمد. در ادامه، از الگوریتم فرا ابتکاری PSO برای بهینه‌کردن سطح مقطع عرضی سدهای خاکی با شرط کنترل پایداری استفاده شد. در پایان نیز به‌منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی در طراحی بهینه ابعاد سدهای خاکی، مدل بهینه سد فرخی قائن به‌دست‌آمده و با سد واقعی مقایسه گردید.

به‌طور کلی می‌توان نتایج تحقیق را به‌صورت ذیل خلاصه نمود:

- استفاده از سدهای مدل شده در نرم‌افزار PLAXIS و استفاده از اطلاعات این سدها در SPSS توانست رابطه‌ای ریاضی به‌صورت خطی برای محاسبه ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی مغزه‌دار تولید نماید که مقادیر شاخص‌های خطای به‌دست‌آمده از مرحله صحت‌سنجی، نشان‌دهنده اعتبار رابطه به‌دست‌آمده و قابلیت تعمیم آن می‌باشد.
- الگوریتم PSO دارای عملکرد قابل قبولی در بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی بود.
- مدل تولیدشده برای بهینه‌سازی سد خاکی با هر ارتفاعی کاربرد داشته و توانایی استخراج متغیرهای بهینه مقطع عرضی سد خاکی را دارا می‌باشد.
- استفاده از چارچوب مدل‌سازی به‌دست‌آمده به‌منظور بهینه‌سازی مقطع عرضی این سد را به مقدار ۱۳ درصد و حجم آن را به مقدار ۱۳۸ هزار مترمکعب کاهش دهد. که بیانگر کارایی و تعمیم‌پذیری مدل بهینه بر روی هر سد خاکی با هسته قائم می‌باشد.

۵- مراجع

رحیمی ح، "سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم، ۱۳۹۲.

قدوسی ح، وکیلی تنها ف، شاهوردی ک، "کاربرد الگوریتم فراکاوشی SCE و مدل LINGO11 در بهینه‌سازی ابعاد سدهای خاکی (مطالعه موردی سد بزرک)"، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۱۳۹۷، ۴۹ (۲)، ۲۳۳-۲۴۲.

کاخی م، نوری بیات م، "کاربرد روش یارانه‌ای در بهینه‌سازی طرح یک سد خاکی"، نشریه دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷، ۳۳ (۴)، ۲۱-۳۵.

کیخا م، "بهینه‌سازی شکل گنبدی‌های فضا کار دولایه با استفاده از

و صرفاً متغیرهای هندسی را در طول بهینه‌سازی محاسبه نمود. درنهایت برای کنترل این‌که آیا سد به‌دست‌آمده توسط این مدل و الگوریتم، بهینه است یا خیر، بهینه‌سازی برای سد واقعی ساخته‌شده فرخی قائن انجام شد. ارتفاع این سد از روی پی ۱۹ متر می‌باشد پس در فرمول‌های ضریب اطمینان و مساحت مقطع عرضی سد، این ارتفاع جایگزین گردید. متغیرهای به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌سازی نرم‌افزار Matlab برای سد فرخی قائن در جداول (۴) و (۵) ارائه گردیده است.

جدول ۴- نتایج حاصل از بهینه‌سازی مشخصات هندسی سد

خاکی فرخی قائن (متر)

B_{up-1}	B_{up-2}	B_{down-2}	B_{down-1}	h_{up-1}
۱۶	۱۲	۱۳	۲۰	۱۰
h_{down-1}	$B_{bottom-core}$	H	$B_{Rocktoe}$	$h_{Rocktoe}$
۱۲	۱۱	۱۹	۲۸	۴

جدول ۵- نتایج حاصل از بهینه‌سازی مشخصات مصالح سد

خاکی فرخی قائن

ϕ_{core} (°)	C_{core} (KN/m ²)	$\gamma_{dry-core}$ (KN/m ³)	$\gamma_{wet-core}$ (KN/m ³)
۲۳/۶۸	۱۹	۲۰/۲	۲۶
ϕ_{shell} (°)	$\gamma_{dry-shell}$ (KN/m ³)	$\gamma_{wet-shell}$ (KN/m ³)	
۴۰	۲۵	۳۰	

مساحت مقطع سد فرخی قائن در شرایط بهینه‌شده برابر ۹۸۴ مترمربع به‌دست‌آمده که این مقدار در مقایسه با مقدار واقعی مساحت آن که برابر ۱۱۳۳ مترمربع می‌باشد ۱۳ درصد و همچنین حجم آن به مقدار ۱۳۸ هزار مترمکعب کاهش یافته است که این مقدار برابر ۲۳۰۲۰ کمپرسی ۱۰ چرخ می‌باشد. این بدان معنی است که مدل بهینه‌سازی ارائه‌شده عملکرد مناسبی داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی گردید روشی مبتنی بر مدل‌سازی برای بهینه‌سازی مقطع عرضی سد خاکی با هسته مرکزی قائم ارائه گردد. در این چارچوب مبتنی بر مدل‌سازی، ابتدا از نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS برای محاسبه ضریب اطمینان شیب پایین‌دست استفاده شد. عملکرد این مدل با مدل‌سازی سد فرخی قائن تأیید گردید و سپس ضریب اطمینان پایداری ۵۰ سد فرضی در شرایط تراوش دائم محاسبه شد. از میان متغیرهای مؤثر بر ضریب اطمینان پایداری سد، ۱۷ متغیر شامل متغیرهای هندسی مقطع سد و

- روش الگوریتم ژنتیک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۵.
- مریخ بیات ف، "الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری (همراه با کاربردهایی در مهندسی برق)"، انتشارات جهاد دانشگاهی زنجان، ۱۳۹۳.
- منتصری م، دیمی‌نیت ا، قزل سوفلو ع، "بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، مجله دانش آب و خاک، ۱۳۸۹، ۲۰ (۳)، ۷۳-۸۶.
- مهندسین مشاور کاوش پی مشهد، "گزارش مطالعات احداث سد فرخی‌قائن"، وزارت نیرو- شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی، ۱۳۸۸.
- نورزاد ر، رضاییان ا، "بهینه‌سازی مقطع سدهای خاکی با الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، ۱۳۹۰.
- وفائیان م، "سدهای خاکی و سنگریز"، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۷.
- Brinkgreve R, "Plaxis: Finite element code for soil and rock analysis (Users Guide)", Balkema, 2006.
- Farzampour A, Salmasi F, Mansuri B, "Optimum size for clay core of alavian earth dam by numerical simulation", *Iranica Journal of Energy and Environment*, 2014, 5, 240-246.
- Kunqiang Z, Fusheng L, Lei S, Cong L, "The theoretical research and finite element analysis of toe weight on the earth and rockfill dam reinforcement", 2012, 28, 744-749.
- Murthy GSR, Murty KG and Raghupathy G, "Designing earth dams optimally", 40th Anniversary Volume, IAPQR, 2013.
- Roshani E, Farsadizadeh D, "Optimization of clay core dimensions in earth fill dams using particle swarm algorithm", *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 2012, 2, 176-181.
- Rezaeeian A, Davoodi M, Jafari MK, "Determination of optimum cross-section of earth dams using ant colony optimization algorithm", *Scientia Iranica*, 2019, 26 (3), 1104-1121.

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of a Modeling-Based Framework for Optimizing the Cross-Section of Cored Earth Dams

Nazanin Shahkarami^{*}, Shahriar Mokhtari

Department of Civil Engineering, Arak University, Arak 38137, Iran

Received: 24 May 2021; Accepted: 05 February 2022

Keywords:

Optimization, Earth dam, PLAXIS, SPSS, PSO, Farrokhi-Qaen dam.

1. Introduction

Cored earth dam is one of the most widely used dams, the construction of which is highly accepted among dam designers. The construction of these structures is very expensive, so optimizing the cost of design and construction of earth dams can be so helpful.

Today, many optimization problems cannot be solved in practice with traditional optimization methods due to their large size and complexity. For this purpose, metaheuristic algorithms can be used, of which PSO is one. In the present study, the cross-sectional optimization of earth dams as the main part of the dam cost has been investigated by controlling the stability of slope in steady-state seepage condition.

2. Methodology

2.1. The process of finding the optimum cross-section of an earth dam

In this research, for optimizing the cross-section of an earth dam a finite element software was used to control the slope stability (Brinkgreve, 2006), a statistical software was used to formulate the stability reliability and finally a metaheuristic algorithm was used to optimize the cross-section of the earth dam. The flowchart of optimization of the present study for determining the optimum cross-section is shown in Fig. 1.

2.2. Specifications of Farrokhi-Qaen dam

Farrokhi-Qaen dam is an earth dam with a vertical clay core with a height of 19 meters from the riverbed, normal height of 14 meters, reservoir volume of 9 million cubic meters, crest length of 927 meters and crest width of 8 meters. This dam is in the north of South Khorasan province. The geometric characteristics of the dam are shown in Fig. 2 and the properties of the used materials are presented in Table 1 (Kavosh-peye-Mashhad Consulting Engineering, 2009).

3. Results and discussion

3.1. Selecting constant and variable design parameters

To optimally design the cross-section of earth dams, as shown in Fig. 1, it is necessary to first divide the required data into two categories: fixed and variable. Fig. 3 shows the variables required in the dam geometry to obtain the cross-sectional area of the dam. Some variables related to soil properties also include core internal friction coefficient (ϕ_{core}), core cohesion coefficient (C_{core}), dry specific weight of the core ($\gamma_{dry-core}$), wet specific weight of the core ($\gamma_{wet-core}$), dry specific weight of the shell ($\gamma_{dry-shell}$), wet specific weight of the shell ($\gamma_{wet-shell}$) and shell internal friction coefficient (ϕ_{shell}).

^{*} Corresponding Author

E-mail addresses: n-shahkarami@araku.ac.ir (Nazanin Shahkarami), shahriar.mokhtary@gmail.com (Shahriar Mokhtari).

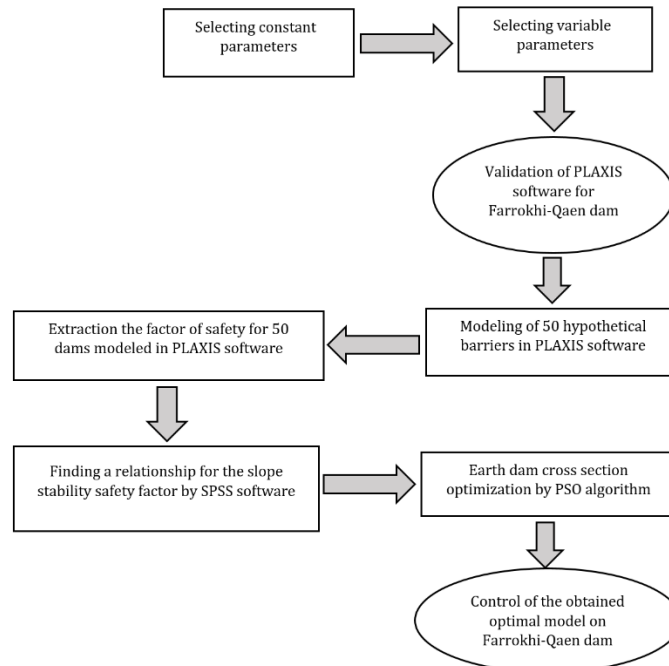


Fig. 1. The flowchart of optimization of the earth dam in the present study

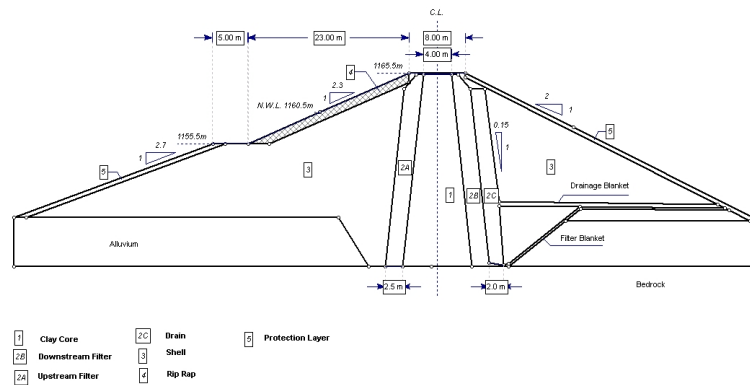


Fig. 2. Geometric characteristics of Farrokhi-Qaen earth dam (Kavosh-peye-Mashhad Consulting Engineering, 2009)

Table 1. Geotechnical characteristics of materials used in Farrokhi-Qaen earth dam (Kavosh-peye-Mashhad Consulting Engineering, 2009)

Layer	Internal friction angle (ϕ°)	Cohesion(c) (KN/ m ²)	Modulus of elasticity (E) (KN/ m ²)	Saturated specific weight (γ) (KN/ m ³)	Wet specific weight (γ) (KN/ m ³)	Poisson's ratio ν
Clay Core	$\phi_{UU} = 0$	$C_{UU} = 42$	3000	21.2	20.5	0.4
	$\phi_{CU} = 21$	$C_{CU} = 45$				
	$\phi_{CD} = 22$	$C_{CD} = 45$				
Shell	41.5	0	30000	22.4	22	0.37
Filter	30	0	10000	21	20.5	0.35
Drain	32	0	10000	23	22	0.35
Alluvium	30	0	8000	21	20	0.35

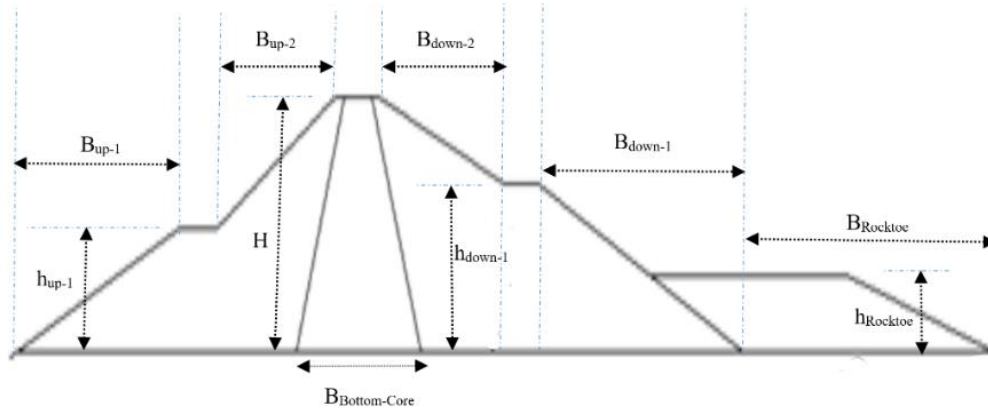


Fig. 3. Geometric variable parameters considered in the modeling process of the present study

3.2. Optimizing the cross-section of an earth dam

Initially, after validation of PLAXIS software for Farrokhi-Qaen earth dam and ensuring its proper performance, the factor of safety (F) under steady-state seepage condition were extracted for 50 hypothetical dam models, all of which had toe weight and berms. Next, in SPSS software, a mathematical model for calculating F as a linear function of the considered variables was obtained (Eq. 1).

$$F = -3.118 + (0.006 \cdot B_{up-1}) - (0.007 \cdot B_{up-2}) + (0.006 \cdot B_{down-2}) + (0.013 \cdot B_{down-1}) - (0.037 \cdot h_{up-1}) - (0.020 \cdot h_{down-1}) - (0.004 \cdot B_{bottom-core}) + (0.01 \cdot H) + (0.001 \cdot B_{Rocktoe}) - (0.001 \cdot h_{Rocktoe}) + (0.003 \cdot \phi_{core}) + (0.015 \cdot C_{core}) - (0.009 \cdot \gamma_{dry-core}) + (0.098 \cdot \gamma_{wet-core}) + (0.088 \cdot \phi_{shell}) - (0.083 \cdot \gamma_{dry-shell}) + (0.031 \cdot \gamma_{wet-shell}) \quad (1)$$

Then, using MATLAB software and implementation the PSO algorithm, the cross-section optimization of the earth dam was performed with the condition of controlling the slope stability of the dam. The objective function was to minimize the cross section of the dam (Eq. 2) and the variables included 17 main characteristics related to dam geometry and soil features.

Function Y=AREA (u)

$$Y = \left(\frac{B_{up-1} \times h_{up-1}}{2} \right) + (4 \times h_{up-1}) + \left(\frac{(h_{up-1} + H) \times B_{up-2}}{2} \right) + (B_{crest} \times H) + \left(\frac{(H + h_{down-1}) \times B_{down-2}}{2} \right) + (4 \times h_{down-1}) + \left(\frac{B_{down-1} \times h_{down-1}}{2} \right) + (B_{Rocktoe} \times h_{Rocktoe});$$

end

(2)

In order to ensure the stability of the dam slope, the constraint was entered into the optimization algorithm as a safety factor greater than 1.5. Also geometric constraints and constraints related to soil characteristics were applied based on the recommendations of reputable references so that the results obtained for the optimal dam have the characteristics of a real dam.

Finally, the optimal model was tested on Farrokhi-Qaen Dam. The results showed a 13% reduction in cross-sectional area and 138,000 cubic meters of optimal dam volume compared to the constructed dam.

4. Conclusions

In general, the research results can be summarized as follows:

- Using the information of the dams modeled in PLAXIS software as inputs of SPSS software, a linear mathematical relation can be created to calculate the stability safety factor of cored earth dams. The values of the error indicators obtained from the validation step showed the validity of the obtained equation and its generalizability.
- The PSO algorithm had an acceptable performance in optimizing the cross section of the earth dam.
- The generated model is used to optimize the earth dam at any height. It has the ability to extract the optimal cross-section variables of the earth dam.
- Using the obtained modeling framework to optimize the cross section of the earth dam for Farrokhi-Qaen dam was able to reduce the cross section of this dam by 13%, which indicates the efficiency and generalizability of the optimal model on any earth dam with a vertical core.

5. References

- Kavosh-peye-Mashhad Consulting Engineering, "Study report on the construction of the dam and the irrigation and drainage network of Farrokhi-Qaen Dam", Ministry of Energy-South Khorasan Regional Water Authority, 2009.
- Brinkgreve R, "Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analysis (Users Guide)", Balkema, 2006.