

کاربرد روشهای رایانه‌ای در بهینه‌سازی طرح یک سد خاکی

محمدرضا کاخی

استادیار دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

محمدرضا نوری بیات

کارشناس ارشد عمران - دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۷۷/۳/۳۰، تاریخ تصویب ۷۸/۲/۲۵)

چکیده

روند کلی طراحی و مبانی بهینه‌سازی رایانه‌ای طرح سدهای خاکی مطالعه و یک روش عملی برای آن پیشنهاد می‌گردد. در روش پیشنهادی، فرمول‌بندی بهینه‌سازی برای سدهای خاکی بر روی بستر آبرفتی و یا سنگی بر اساس تشکیل یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مقید انجام می‌شود که در آن متغیرهای مسئله تعدادی از عوامل موثر مشخصه سد، تابع هدف (غالباً) هزینه عملیات اجرایی طرح و توابع قیدی مجموعه شرایط آئین نامه‌ای و هندسی لازم برای آب‌بندی و ایمنی کافی سد و محدودیتهایی بر مقادیر عوامل مؤثر متغیر هستند. در این روش، بر اساس تجربه و مطالعات طراح، یک الگوی مفهومی تعریف شده و به منظور کاهش تعداد تحلیلهای لازم در حین بهگزینی، بر اساس یک برنامه‌ریزی مشخص از روی نتایج تحلیلهایی نظیر تحلیل اقتصادی، تراوش و پایداری شیروانیها برای مجموعه‌ای از طرحهای نمونه در فضای طراحی، توابع هدف و قیود عملکردی از طریق بررسیهای آماری بصورت توابعی صریحی بر حسب عوامل مؤثر متغیر تعیین می‌شوند. مسئله بهگزینی (موسوم به الگوی تحلیلی)، به یکی از روشهای عددی بهگزینی مقید حل شده و یک طرح بهینه تقریبی بدست می‌آید. با انجام تحلیلهای دقیق برای این طرح بهینه و مقایسه نتایج، میزان تقریب بررسی و میزان بهینگی و مقادیر واقعی قیود محاسبه می‌شوند. عملی بودن روش پیشنهادی با بهگزینی نمونه یک سد خاکی و با استفاده از نرم‌افزار تحلیل و طراحی‌ای که بر اساس روش پیشنهادی تهیه شده، نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، بهینه‌سازی، برنامه رایانه‌ای

مقدمه

می‌کاهد. بعلاوه از آنجائیکه مدت زمان در نظر گرفته شده برای طراحی محدود می‌باشد، هر چه این ابزار کاملتر و هوشمندتر باشد و خدمات مشاوره‌ای بهتری در اختیار طراح قرار دهد، به طراح مجال بیشتری برای تفکر و بررسی تعداد بیشتری گزینه را می‌دهد، و در نتیجه در زمان کوتاه‌تر طرحهای اقتصادی‌تر و ایمن‌تری بدست خواهند آمد. هدف این مقاله ایجاد زمینه تهیه چنین ابزاری می‌باشد.

برای دستیابی به این ابزار باید چندین مبحث مستقل مورد بررسی قرار گرفته و با هم ترکیب شوند از جمله

- ۱- مفاهیم بنیادی در روند متداول طراحی مهندسی و طراحی بهینه مهندسی و عواملی که بر آنها موثر می‌باشند،
- ۲- روشهای عددی لازم برای تعیین عملکرد یک سد

طراحی سد خاکی فرآیندی پیچیده دارد و در حال حاضر تنها بر تجارب کسب شده از طرحهای پیشین و تخصص و ابتکار طراح استوار است. بنابراین در هر حال این تنها طراح است که بر اساس سابقه ذهنی خویش، تصمیم‌گیری‌ها و هدایت روند طراحی را به عهده دارد^۱ هزینه صرف شده برای طراحی بهینه سد خاکی در مقایسه با هزینه زیاد اجرای یک سد خاکی و تاسیسات جانبی آن و اثرات زیانبار اقتصادی و اجتماعی شکست پروژه یک سد خاکی بخوبی قابل توجیه می‌باشد. به این دلیل قراردادن روش و ابزار مناسبی در اختیار طراح که به کمک آن بتواند از کلیه تجارب گذشته استفاده کرده و بهترین تصمیم‌ها را بگیرد، ضمن کاهش هزینه اجرا، به مقدار قابل ملاحظه‌ای از خطرات احتمالی نیز

بهترین مقادیر برای اجزاء طرحی که طراح برگزیده است، تعیین می‌گردد. مقادیر (و یا حالت‌های) عوامل توصیف کننده طرح انتخاب شده را می‌توان به صورتهای مختلف که در همه آنها عملکردهای لازم حفظ و قیود مربوطه ارضاء شده باشند، برگزید. به این ترتیب طرحهای متفاوتی بدست می‌آید. با تعریف یک معیار ارزیابی این طرحها با هم مقایسه شده و یکی نسبت به دیگران ارجحیت داده می‌شود. این مرحله دارای یک روند تکراری (بصورت تحلیل / بازبینی طرح) است. ۴- مرحله تهیه جزئیات و نقشه‌های اجرایی، که پس از اتمام مرحله بهینه یابی و گاهی همزمان با آن می‌باشد. در این مرحله نتایج مرحله بهگزینی باید بازبینی و در صورت نیاز اصلاح شوند، که باز هم در این قسمت، تجربه و قضاوت مهندسی طراح نقش مهمی دارد.

در روند متداول طراحی در مرحله بهینه سازی، عامل انسانی دارای نقش مهمی است و تکرارهای تحلیل / بازبینی طرح بر اساس مهارت و تجربه طراح انجام می‌شود و عمدتاً از رایانه تنها به عنوان یک ابزار کمکی برای انجام تحلیلها استفاده می‌شود. به این ترتیب امکان دارد در اثر محدودیت زمانی یا عدم تسلط طراح، طرح بدست آمده طرح بهینه مطلق نباشد، در حالی که در روند طراحی بهینه رایانه‌ای، تکرارهای تحلیل / بازبینی طرح از یک روند مشخص پیروی می‌کند که احتمال رسیدن به جواب بهینه مطلق را افزایش می‌دهد.

ب) مسئله طراحی یک سد خاکی

مسئله طراحی یک سد خاکی را می‌توان چنین بیان کرد [۳]: برای ۱- خصوصیات عملکردی و رقوم مشخص آب دریاچه سد و میزان مجاز نشت آب از بدنه و شالوده سد، ۲- قیود و روابط مشخصی بین عملکرد مهندسی سد خاکی و سایر اهداف مشخص پروژه، ۳- مشخصات معین برای شالوده و تکیه‌گاهها و ۴- مصالح ساختمانی موجود در منطقه، مطلوب‌بست ۱- نوع و طرح کلی سد و ترکیب اجزاء سد، ۲- مشخصات سطح مقاطع عرضی و چگونگی عملیات در شالوده، بنحوی که سازه‌ای به حد کافی آب‌بند و ایمن بوجود آمده و در ضمن پروژه‌ای با حداقل هزینه ساخت، نگهداری و بهره‌برداری حاصل شود.

خاکی با انجام تحلیلهایی نظیر تحلیلهای اقتصادی، تراوش [۵]، پایداری شیروانیها [۱۰]، ۳- جمع آوری اطلاعات، مطالعات آماری، بررسی‌های نظری و آزمایشگاهی جهت تعیین مجموعه قواعد طراحی و آئین‌نامه‌ای که ایمن و اقتصادی بودن طرح را تضمین نمایند، ۴- نظریه‌های ریاضیات عددی مناسب برای حل مسائل بهگزینی طراحی، ۵- فن‌آوریهای جدید ایجاد نرم‌افزارهای رایانه‌ای در ارتباط با سیستمهای طراحی محاوره‌ای، هوش مصنوعی و بانکهای اطلاعاتی.

اهدافی که در این مقاله به عنوان بخشی از این مطالعات، دنبال شده‌اند عبارتند از: ۱- بررسی روند متداول طراحی [۴] و مفهوم طراحی بهینه [۷] (از نظر نوع، شکل هندسی و مصالح منتخب و روشهای اجرایی) در مورد یک سد خاکی، ۲- ارائه روند موسوم به تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر برای طراحی بهینه سدهای خاکی و تعمیم آن برای کاربردهای رایانه‌ای، ۳- بررسی چگونگی تشکیل یک الگوی مفهومی در طراحی بهینه سدهای خاکی (تعیین مفهوم عوامل مؤثر متغیر و ثابت، توابع هدف و قیود)، ۴- بررسی چگونگی تشکیل یک الگوی تحلیلی بر اساس الگوی مفهومی بدست آمده برای یک سد خاکی و تعیین طرح بهینه توسط رایانه، (تعیین روابط ریاضی برای بیان توابع هدف و قیود و حل عددی مسئله بهگزینی [۷])، ۵- بیان مبانی لازم و طراحی یک بسته نرم‌افزاری گاراً برای تحلیل و طراحی بهینه سدهای خاکی، ۶- نشان دادن کارایی روند با ارائه کاربرد عملی نرم‌افزاری که بر مبنای روش ارائه شده تهیه گردیده است.

روند طراحی سد خاکی

الف) روند متداول طراحی مهندسی

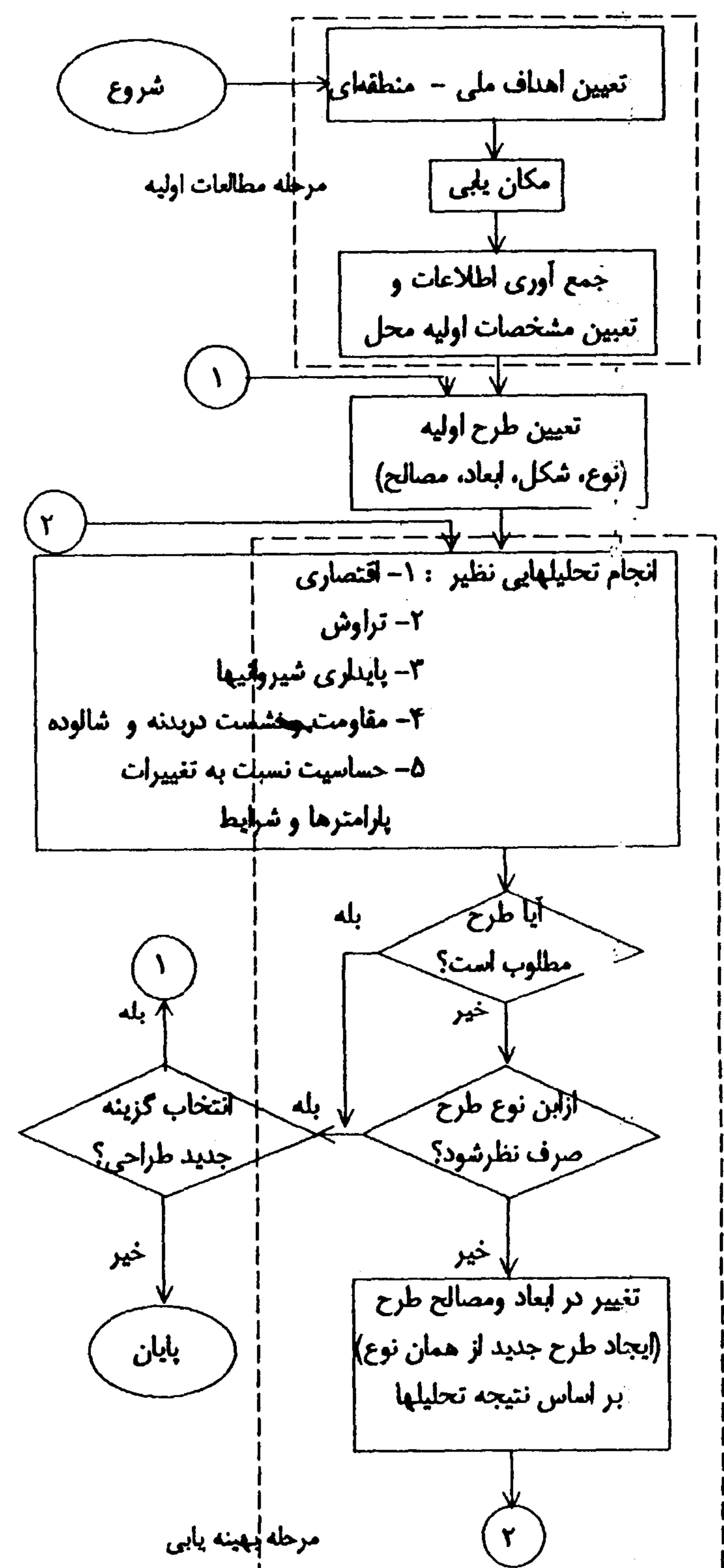
در حالت کلی روند متداول طراحی مهندسی را می‌توان به ۴ مرحله تقسیم کرد: ۱- مطالعات اولیه طرح، که برای جمع‌آوری اطلاعات، شناسایی اهداف، عملکردها و محدودیتها است و غالباً ارتباط مستقیمی با طراح ندارد. ۲- طراحی اولیه، که انتخاب یک طرح کلی است و بر اساس مطالعات اولیه و مبتنی بر تجربه، ابتکار و قضاوت مهندسی طراح انجام می‌شود و در آن هدف طرح‌ریزی و انتخاب ترکیب برای سیستمی است که قادر به پاسخگویی به نیازها و عملکردهای لازم و در عین حال رعایت قیود و محدودیتهای موجود باشد، ۳- مرحله بهینه‌یابی، که در آن

در مرحله اول، پیش از شروع طراحی باید برخی عوامل مؤثر در طرح شناسایی شوند، از جمله [۱]: ۱- شناسایی اهدافی که از ایجاد سد دنبال می‌شود و اثرات ایجاد سد در منطقه، ۲- برآورد منابع قرضه تامین مصالح موجود در منطقه جهت ساختن سد، ۳- تعیین مشخصات شالوده و زمین منطقه‌ای که سد در آن احداث خواهد شد از نظر تراوش و لرزه‌خیزی، ۴- بررسی اقلیم و آب و هوای منطقه، ۵- تعیین شکل و اندازه و توپوگرافی دره‌ای که سد در آن احداث خواهد شد، ۶- نحوه مناسب انحراف آب در زمان احداث سد، ۷- جهت وزش باد غالب و بررسی اثرات ایجاد احتمالی امواج در دریاچه سد، ۸- حداکثر مدت زمانی که به اجرای سد می‌توان اختصاص داد، ۹- عملکردهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی.

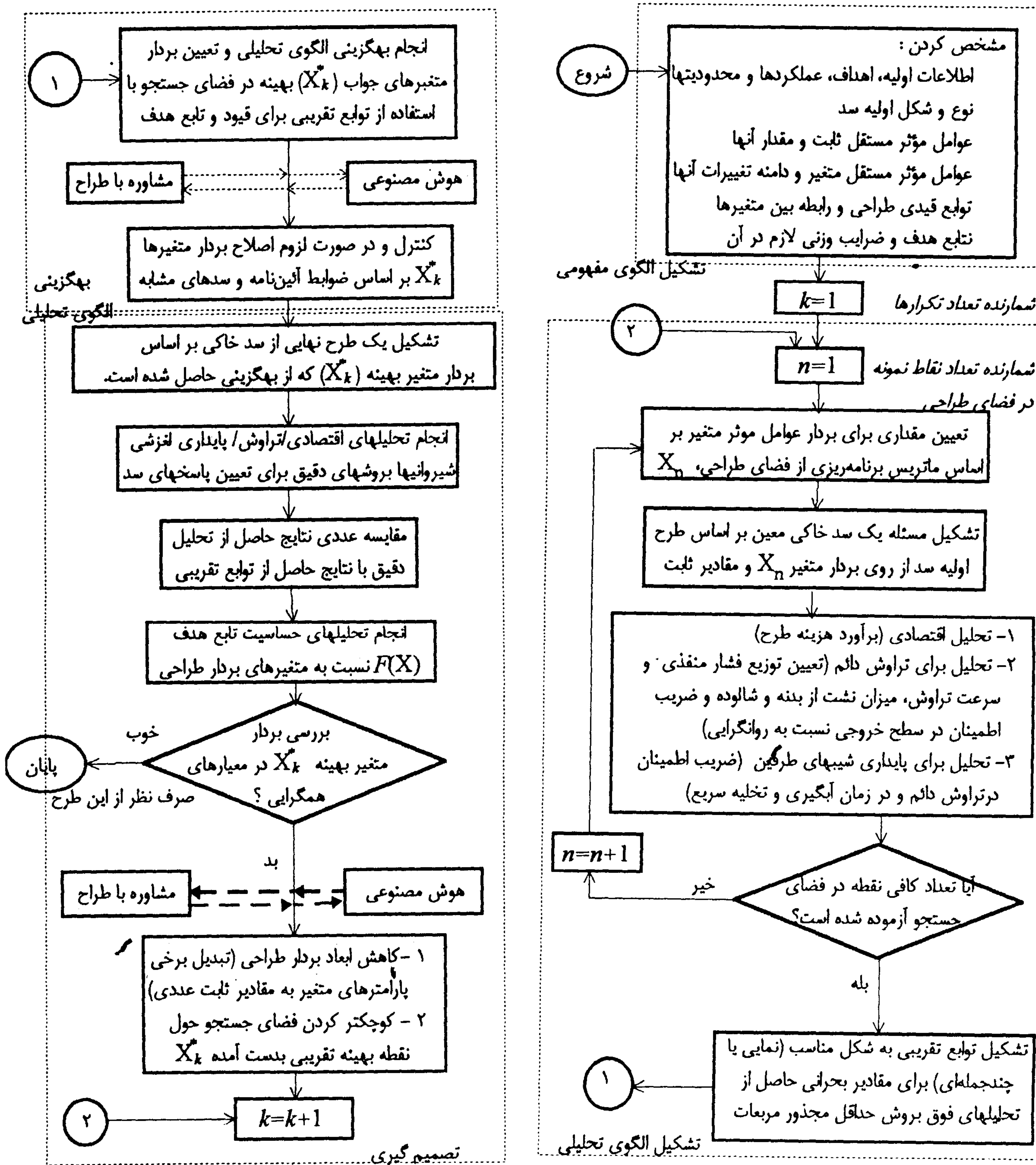
در مرحله دوم، بر اساس مجموعه عوامل فوق و تجربیات طراح، گزینه‌ای برای سد خاکی از بین انواع سدهای خاکی ممکن انتخاب می‌شود [۴]، نظیر سد خاکی همگن، سد خاکی با هسته آب بند رسی و یا هسته بتنی. سپس طراح به گزینه انتخاب شده سیستمهای جانبی نظیر زهکشهای پنجه، زهکشهای افقی، صافیهای بعد از هسته رسی و ... را اضافه می‌نماید و بر اساس خواسته‌ها و وضع موجود و بر پایه موارد مشابه قبلی، مصالح مصرفی و ابعاد اولیه را برای مقطع (یا مقاطع) عرضی، مشخص می‌نماید. این ابعاد نظیر کل ارتفاع سد، ارتفاع آزاد (حاشیه ایمنی در ارتفاع)، شیبهای طرفین سد، موقعیت هسته رسی آن، ناحیه صافی و زهکش، عرض تاج و هسته، میزان انحناء محور سد در پلان و ... بگونه‌ای حدس زده می‌شود که وضعیت سد از نظر هندسی و اجرایی کاملاً مشخص شده و بتوان تحلیل‌های مهندسی و اقتصادی را در مورد آن انجام داد [۲].

در مرحله بهینه‌یابی تحلیل‌هایی نظیر تحلیل تراوش (جهت تعیین توزیع فشار آب منفذی در بدنه و شالوده، برآورد میزان فرار آب از سد و شالوده، طراحی سیستمهای کنترل تراوش، تعیین حداکثر سرعت جریان و محاسبه ضرایب اطمینان نسبت به حرکت ریزدانه‌ها در بدنه و شالوده و احتمال ایجاد پدیده‌های رگاب، جوشش و ...)، تحلیل‌های پایداری (بصورت تعیین ضرایب اطمینان لغزش شیب‌های طرفین سد در هر یک از حالت‌های بلافاصله پس از اتمام عملیات ساختمانی و در حین آبیگری، در هنگام

در حالت متداول در اینگونه مسائل طراح بر اساس تجربه و مهارت خویش چندین گزینه ممکن را انتخاب کرده و بر اساس کنترل پاسخهای مقاطع عرضی مختلف سد و بررسی عملکردهای مختلف شالوده نسبت به پایداری و آب‌بند بودن و برآورد هزینه در هر گزینه پیشنهادی، یکی را نسبت به سایرین برمی‌گزیند. مراحل چهارگانه متداول طراحی مهندسی را در مورد طراحی یک سد خاکی هم می‌توان نشان داد (شکل ۱). این مراحل را می‌توان بصورت زیر تشریح کرد:



شکل ۱: روند متداول طراحی سد خاکی.



شکل ۲: طراحی بهینه رایانه ای سد خاکی با استفاده از روند تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر.

ارزیابی بهینگی طرح هم معیارهایی انتخاب می‌شوند. [۶] این معیارها غالباً بر اساس تحلیل اقتصاد طرح (برآوردهایی مانند هزینه تامین مصالح، هزینه اجرا، هزینه احداث تاسیسات جنبی و نگهداری، هزینه بهره برداری، هزینه انحراف موقت آب در زمان اجرا، هزینه تحمیل شده

تخلیه سریع مخزن، تراوش دائم و در هنگام زمین لرزه و ...، تحلیلهای هیدرولیکی و غیره بر روی طرح انجام می‌شوند [۲]، [۵] و قابل قبول بودن طرح بر اساس نتایج حاصل از تحلیلهای مطابق معیارهایی برای جلوگیری از خرابیهای هیدرولیکی / سازه‌ای، سنجیده می‌شود. برای

مشخصه طرح کلی، تعیین و از بین عوامل مزبور، برخی عوامل به عنوان عوامل مستقل انتخاب و سایر عوامل بر حسب آنها بیان می‌شوند. از بین عوامل مستقل گروهی به عنوان عوامل ثابت انتخاب و بر حسب ضوابط و تجربه، مقادیری برای آنها انتخاب می‌گردد. برای مابقی عوامل هم که عوامل متغیر طراحی می‌باشند، دامنه تغییرات تعیین می‌گردد (فضای عوامل طرح) و در نهایت برای ارزیابی بهینگی و پذیرش طرح معیارهایی انتخاب می‌شود. (تابع هدف و قیود)

برای اینکه بتوان با استفاده از روشهای ریاضی جواب بهینه‌ای برای مسئله طراحی سد خاکی یافت، باید برای الگوی مفهومی بیان شده، اجزاء الگوی تحلیلی (یعنی متغیرها، تابع هدف و قیود در الگوی بهگزینی) را تعیین و بصورت کمی بر حسب روابط ریاضی مشخصی بیان کرد. برای اینکار چندین نقطه (یعنی چندین طرح مشخص برای سد) به عنوان نمونه در فضای طرح انتخاب و تحلیل‌های لازم انجام و مقادیر قیود و تابع هدف در آن نقاط تعیین می‌شوند. با انتخاب شکل کلی عبارتهایی جبری برای تقریب توابع قیدی و هدف بر حسب عوامل مؤثر متغیر و با استفاده از پاسخهایی از سد که بر اساس تحلیل‌های انجام شده در نقاط (طرحهای) نمونه بدست آمده‌اند، از یک الگوریتم برازش منحنی استفاده شده، ضرایب مجهول توابع جبری مزبور تعیین می‌گردند. به این ترتیب برای هر طرح مورد نظر از سد، مقادیر توابع قیدی و هدف توسط این عبارتهای جبری و بدون نیاز به انجام تحلیل، تقریب زده می‌شود. این باعث می‌شود که در حین حل ریاضی مسئله بهگزینی دیگر نیازی به انجام تحلیل سد نباشد و بتوان مقادیر تقریبی توابع قیدی و هدف را بر اساس مقادیر عوامل متغیر مسئله محاسبه کرد. شکل عبارت جبری انتخاب شده، تعداد نقاط نمونه در فضای طرح و روش برازش عبارت جبری بر توابع قیدی و هدف از حساسیت خاصی برخوردار است. در این جا از توابع چندجمله‌ای برای تخمین مقادیر توابع، از روش رگرسیون گام بگام (حداقل مجذور مربعات توأم با تحلیل حساسیت^۱) [۱۴] برای برازش بر پاسخهای سد استفاده شده است. در پایان این مرحله مسئله بهینه‌سازی بصورت مجموعه‌ای از روابط ریاضی بدست می‌آید.

در مرحله بعدی که مرحله یافتن طرح بهینه است، از هر روش ریاضی بهگزینی مقیدی می‌توان استفاده کرده و یک

به اقتصاد منطقه، نسبت طول عمر مفید به هزینه کل و ...) تعریف می‌گردند.

ممکن است پس از انجام تحلیل‌های فوق و بررسی نتایج حاصله، لزوم اعمال برخی تغییرات در طرح اولیه احساس شود. در این صورت پس از انجام تغییرات کارشناسی مزبور، باید تمام یا حداقل برخی از تحلیل‌های فوق تکرار شوند. این روند طراحی/تحلیل همراه با اعمال نظرات کارشناسی در هر مرحله تا آنجایی ادامه می‌یابد که به نظر طراح، آخرین طرح بر اساس معیارهای طراحی مهندسی و اقتصادی قابل قبول باشد. ممکن است مجموعه مراحل فوق از انتخاب گزینه اولیه تا مرحله تصمیم‌گیری برای چندین گزینه متفاوت تکرار گردد تا در نهایت یکی از این گزینه‌ها که به مرحله قابل قبول رسیده‌اند، تصویب شود و یا اینکه کلاً طرح سد خاکی در این مورد مردود شناخته شود. پس از رسیدن به یک طرح نهایی، مرحله طراحی جزئیات و تاسیسات جانبی فرا می‌رسد که ممکن است با تغییراتی جزئی در مشخصات طرح نهایی همراه باشد.

بهگزینی طرح یک سد خاکی

در اینجا یک روند عملی برای بهگزینی طرح یک سد خاکی پیشنهاد می‌گردد. اساس تفکر در ایجاد این روند چنین است: هر طرح از سد خاکی بوسیله مجموعه‌ای از عوامل که اصطلاحاً عوامل مؤثر نامیده می‌شوند، توصیف می‌شود و با مشخص شدن این عوامل مؤثر است که طرح سد معین و قابل اجرا می‌شود. این عوامل مؤثر را می‌توان از جنبه‌های متعددی تقسیم بندی کرد. با انتخاب یک معیار برای تعیین بهینگی سد بر حسب عوامل مؤثر مشخصه سد و تعیین مجموعه‌ای از قیود برای تعیین قابل قبول بودن طرح بر حسب عوامل مزبور، می‌باید بنحوی مقادیری برای عوامل مؤثری که مقدار آنها مجهول در نظر گرفته شده‌اند، بدست آورد که در طرح حاصل معیار بهینگی دارای بهترین مقدار باشد. اجزا عملی این روند عبارتند از: ۱- تشکیل الگوی مفهومی، ۲- تشکیل الگوی تحلیلی، ۳- بهگزینی الگوی تحلیلی، ۴- تصمیم‌گیری. تشکیل الگوی مفهومی در واقع بیان صورت مسئله بصورت کمی است و در آن یک طرح اولیه برای مقطع سد انتخاب، اطلاعات لازم جمع‌آوری و عوامل مؤثر تعیین می‌شوند. برای ایجاد مسئله بهینه‌سازی عوامل

۱ - در تحلیل حساسیت، با حذف جملاتی از چند جمله‌ای که در دامنه تغییرات تعیین شده برای عوامل متغیر، کمترین اثر را بر مقدار تابع دارند، در زمان حل صرفه جویی می‌شود [۱۴].

می‌شوند و هم می‌توانند از نوع فنی - اجرایی و هم از نوع محاسباتی - آئین نامه‌ای باشند. عوامل محاسباتی از قبیل زاویه شیروانی‌های طرفین سد، عرض هسته سد در روی شالوده و در تاج سد، زاویه تمایل هسته از خط شاقول و ... می‌باشند. عوامل فنی و اجرایی از جمله میزان تراکم لایه‌های خاکریزی هسته، نحوه اجرای افقی یا قائم لایه‌های خاکریز در هسته سد، نوع مصالح انتخاب شده برای قسمت‌های مختلف سد و ... می‌باشند. عوامل کمی مانند چگالی بافت خاک در قسمت‌های مختلف سد و عوامل کیفی مانند نوع سد، تامین مصالح از منابع قرصه مختلف باید از هم تمیز داده شوند. برخی از این عوامل در دامنه تغییرات خود دارای تغییرات پیوسته می‌باشند، در حالی که برخی تنها می‌توانند مقادیر گسسته‌ای را بپذیرند. غالباً عوامل کمی، تغییرات پیوسته و عوامل کیفی، تغییرات گسسته دارند. این عوامل می‌توانند معین و یا تصادفی باشند^۲ در مرحله طراحی اولیه مقدار برخی از این کمیتها توسط طراح تعیین شده و برخی دیگر هم به طراح تحمیل می‌شوند (عوامل مؤثر ثابت). گروهی دیگر از کمیتها هم هستند که در حین فرآیند بهینه‌سازی به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شوند و باید مقداری برای آنها بدست آورد (عوامل مؤثر متغیر یا متغیرهای طراحی). مقدار گروهی از کمیتها هم بر اساس مقدار کمیتهای دیگر بدست می‌آیند (عوامل مؤثر وابسته). از دیدگاه نظری هیچ محدودیتی برای تعداد عوامل مؤثر متغیر در یک مسئله بهگزینی وجود ندارد، ولی با توجه به الگوریتمهای ریاضی موجود در حل مسایل بهگزینی و امکانات سخت افزاری و نرم‌افزاری، توصیه شده است تعداد این عوامل در هر مسئله حداکثر ۵ عامل بیشتر نباشد [۲]. زیرا در الگوریتم ارائه شده با افزایش تعداد متغیرها، توابعی پیچیده‌تری برای تقریب توابع قیدی و هدف مورد نیاز می‌باشند و در نتیجه برای برآزش این توابع بر پاسخهای سد باید تعداد بیشتری طرح نمونه از سد را انتخاب و تحلیل کرد که این مستلزم صرف زمان زیادی است. تعداد طرحهای نمونه لازم براساس نوع مسئله و با نظر طراح بگونه‌ای تعیین می‌شود که نقاط بدست آمده، نمایانگر کل فضای طرح باشند. در حالت کلی برای n عامل متغیر، برای اینکه کل فضای طرح پوشش داده شود، استفاده از حداقل تعداد 2^n طرح نمونه بازاا ترکیبهای ممکن از مقادیر حدی متغیرها توصیه شده است، [۱۴]، [۲] گرچه هیچ الزامی در این مورد نیست. به

نقطه بهینه تقریبی برای الگوی تحلیلی، بدست آورد. در اینجا از روش بهگزینی مقید SUMT [۷] استفاده شده است.

طرحی که به این ترتیب بدست می‌آید یک طرح بهینه تقریبی می‌باشد، در مرحله نهایی که مرحله تصمیم‌گیری است، صحت بهینگی طرح تقریبی با اعمال نظرهای طراح و انجام تحلیل‌های دقیق، بررسی و تصمیم به پذیرش یا انجام تغییرات در آن و حتی تکرار مجدد روند گرفته می‌شود. علت تقریبی بودن بهینگی طرح استفاده از توابع تقریبی برای قیود و تابع هدف می‌باشد.

بر اساس آنچه تا کنون بیان شد در اینجا به عنوان یک الگوریتم ممکن، نرم‌افزاری که با هدف نهایی هماهنگی داشته باشد، طراحی شده که در آن از روشهای المانهای کرانه‌ای [۱۳] و کرانه‌های آزمایشی برای تحلیل تراوش در میدانهای ناهمگن با کرانه‌های آزاد [۱۱]، از روش جستجوی مونت کارلو [۱۲] و تعاریف نویر و بیشاپ و فلینوس [۱۰] برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانیهای طرفین و از روش بهگزینی مقید SUMT [۷] برای یافتن طرح بهینه از الگوی تحلیلی استفاده گردیده است.

تشکیل الگوی تحلیلی

الف) بیان ریاضی مسئله بهگزینی

یک مسئله بهینه‌سازی طراحی مهندسی [۶] یا برنامه‌ریزی ریاضی را می‌توان به صورت ذیل بیان کرد: مقدار متغیر n بعدی $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}^T$ از دامنه $x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, \dots, n$ را به گونه‌ای بیابید که تابع $f(X)$ را به شرط ارضاء قیدهای بی‌شکل $g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$ و $h_k(X) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, q$ اجزاء اصلی یک مسئله بهگزینی عبارتند از متغیرها یا عوامل طراحی (بردار X)، قیود یا محدودیتها (توابع نامساوی $g_j(X) \leq 0$ و تساوی $h_k(X) = 0$) و تابع هدف $f(X)$ که تابع ارزشگذاری یا تابع پاسخ هم نامیده می‌شود.

ب) عوامل مؤثر طراحی، متغیرهای مسئله بهگزینی

هر سیستم سد خاکی توسط مجموعه‌ای از کمیتها مشخص می‌شود. این کمیتها اصطلاحاً عوامل مؤثر نامیده

۱ - هیچ ارتباطی بین تعداد متغیرها و قیود نامساوی وجود ندارد، ولی تعداد قیود مساوی باید کمتر از بعد بردار طراحی باشد.

۲ - غالباً تنها عوامل معین بررسی می‌شوند.

کوچکتر می شود). بنابراین انتخاب قیود بیش از حد لازم و یا غیر ضروری، ضمن طولانی تر کردن حل مسئله، ممکن است فضای جستجو را بیش از حد کوچک نماید یا طرحهای بهینه موضعی ایجاد نمایند که همگرایی به طرح بهینه مطلق را پیچیده تر می نماید. از طرف دیگر برخی قیود برخی دیگر را پوشش می دهند و بنابراین می توان برخی قیود را بدون ایجاد اثر قابل ملاحظه بر جواب بهینه، حذف کرد. به علاوه گاهی می توان با ایجاد ترکیبهای مناسب بجای ۲ یا چند قید تنها از یک قید استفاده کرد. ضمناً کاهش تعداد قیود باعث همگرایی سریعتر و ساده تر به جواب بهینه مطلق هم می شود.

د) معیار ارزیابی بهینگی طرح، تابع هدف

ممکن است طرحهای بیشماری یافت شوند که با ترکیب مقادیر متفاوتی از متغیرهای طراحی ایجاد شده اند، در تمام قیود صدق کرده و در ناحیه قابل قبول می باشند. ولی برای اینکه بتوان از بین تمام این حالتها، تنها یکی (یعنی بهترین) را به عنوان طرح بهینه برگزید، نیاز به یک معیار می باشد. این معیار تابع هدف/ تابع پاسخ/ تابع برآزش نامیده شده و باید کمیتی اسکالر بر حسب بردار متغیرهای طراحی باشد و بتوان برای هر طرح مشخص که با یک بردار طراحی مشخص می شود مقداری یگانه برای آن بدست آورد. تابع هدف، $F = f(\mathbf{X})$ ، باید بر حسب بردار متغیرهای طراحی، \mathbf{X} ، که در داخل فضای جستجو تغییر می کند، کمینه شود. انتخاب یک تابع برآزش مناسب از جمله مهمترین تصمیماتی است که طراح باید در طی فرآیند بهگزینی طرح انجام دهد. تابع هدف در مورد یک سد خاکی می تواند کل هزینه ساخت، هزینه تامین مصالح، هزینه نگهداری و بهره برداری، نسبت هزینه ساخت سد به طول عمر مفید آن، وزن یا حجم مصالح مصرفی، مقدار تراوش از بدنه و یا مقدار کل فرار آب از بدنه و شالوده و تکیه گاهها، زمان اجرا، ضرایب اطمینان نسبت به پایداری یا تنشهای ایجاد شده، ضرایب اطمینان نسبت به روانگرایی لایه ها یا ایجاد آب بردگی در بدنه سد، نسبت سرعت تراوش خروجی به سرعت تراوش بحرانی و یا هر معیار دیگری که در پروژه دارای اهمیت است، باشد. اگر بجای یک معیار، چند معیار در نظر باشند می توان یکی را که دارای اهمیت بیشتری است به عنوان تابع هدف انتخاب

علاوه بر اساس الگوریتمهای ریاضی بهینه یابی موجود، با افزایش تعداد متغیرها میزان سرعت همگرایی به نقطه بهینه و احتمال یافتن طرح بهینه مطلق کاهش می یابد. در صورتیکه تعداد متغیرهای مورد نظر زیاد باشد، یک راه حل که در این تحقیق پیشنهاد می شود، انجام بهگزینی گام بگام و یا استفاده از فن تغییرات توأم متغیرها می باشد.

ج) ضوابط پذیرش طرح و محدوده تغییرات قابل قبول عوامل مؤثر، قیود طراحی

طراح برای متغیرهای طراحی بر اساس تجربه و ضوابط آئین نامه ای حدودی مشخص می نماید، نظیر شیب شیروانی طرفین سد که می توانند بین ۱:۱ تا ۱:۵ باشد. این حدود، قیود حدی نامیده می شوند و بر روی هم فضای جستجو (فضای طراحی) را تشکیل می دهند. این فضا می تواند توسط قیود اعمالی دیگر که عملکردهای مشخصی از سد را محدود می کنند، باز هم کوچکتر شود. چنین قیودی، قیود طراحی یا قیود عملکردی نامیده می شوند. قیود طراحی مجموعه ای از تساویها و نامساویهایی هستند که محدوده قابل قبول طرح را مشخص می کنند. این قیود می توانند بصورت ضمنی یا صریح، خطی یا غیرخطی، تنها بر اساس یک متغیر یا بصورت رابطه ای بین چند متغیر باشند: $g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$ در مورد طرح یک سد خاکی انواع قیود عملکردی عبارتند از: ۱- قیود هندسی، که تضمین می نمایند شکل کلی سد بصورت یک شکل هندسی قابل قبول و مطابق طرح اولیه باقی بماند. ۲- قیود آئین نامه ای که بر اساس ضوابط آئین نامه های طراحی و اصول نظری متداول باید در تعیین ابعاد و مصالح در نظر گرفته شوند. ۳- قیود فنی و اجرایی، که به دلیل محدودیتهای روشهای اجرایی یا منطقه ای طراح ناگزیر به رعایت آنها است. ۴- قیود غیرفیزیکی که بنا بر شرایط اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و ... بر طرح تحمیل می شود. اهمیت هر یک از این قیود می توانند برابر و یا ثابت نباشند. این اهمیت با استفاده از ضریب اهمیت که برای هر قید می تواند مقداری ثابت داشته یا تابعی از بردار طراحی و یا مقدار تابع قیدی و یا تابع هدف باشد، نشان داده می شود $(m_j(\mathbf{X}, g_j(\mathbf{X})) \times g_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m)$. با انتخاب قیود طراحی تنها بخشهایی از دامنه مجاز جستجوی بردار طراحی قابل قبول می شود (فضای جستجو

در نظر گرفت:

$$P(\mathbf{X}) = \sum_j \frac{-1}{C_j(\mathbf{X})} + \sum_i \frac{1}{\left| x_i - \frac{x_i^u + x_i^l}{2} \right| - \left| \frac{x_i^u - x_i^l}{2} \right|}$$

مقدار تمام جملات داخل علامت جمع در تابع $P(\mathbf{X})$ باید همواره مثبت باشد. این فن بهگزینی توسط کارل پیشنهاد و توسط فیاکو و مک کورمیک توسعه یافته است [۶].

برای کاربرد عملی به ازاء تابع $f(\mathbf{X})$ و توابع قیدی مقدار اولیه‌ای برای $r = r_0$ (مقدار پیشنهادی فیاکو- مک کورمیک

بصورت $r_0 = \frac{-\nabla f(\mathbf{X})^T \cdot \nabla P(\mathbf{X})}{\nabla P(\mathbf{X})^T \cdot \nabla f(\mathbf{X})}$ می‌باشد) اختیار و تابع

$\Phi^{(0)} = \Phi(\mathbf{X}, r_0)$ تشکیل می‌شود. این تابع را می‌توان

بصورت عددی بیان کرده و آنرا با روش حل مسئله نامقید

(در اینجا روش بهگزینی نامقید دیویدن، فلیچر، پاول) در

نقطه \mathbf{X}_0^* به حداقل رسانید. پس از یافتن حداقل تابع $\Phi^{(0)}$

مقدار r مثلاً با تقسیم به یک عدد دلخواه بصورت $r_1 = \frac{r_0}{c}$

کاهش داده می‌شود. سپس تابع $\Phi^{(1)} = \Phi(\mathbf{X}, r_1)$ تشکیل

و با استفاده از روش مزبور در نقطه \mathbf{X}_1^* به حداقل رسانده

می‌شود. به این ترتیب یک روند تکراری به وجود می‌آید.

در مرحله k ام این تکرار نقطه حداقل \mathbf{X}_k^* از به حداقل

رساندن تابع $\Phi^{(k)} = \Phi(\mathbf{X}, r_k)$ حاصل می‌شود. از این

نقطه می‌توان به عنوان اولین نقطه در روند تکراری کمینه

کردن $\Phi^{(k+1)} = \Phi(\mathbf{X}, r_{k+1})$ که در آن $r_{k+1} = \frac{r_k}{c}$ استفاده

کرد. بنابراین r_k دنباله‌ای نزولی تشکیل می‌دهد که به

سمت صفر میل می‌کند و در این بین انتظار می‌رود دنباله

نقاط کمینه \mathbf{X}_k^* هم به جواب مسئله مقید همگرا باشند.

مشاهده شده است که همگرایی این روش بسیار به نقطه

شروع و جهت اولیه جستجو حساس می‌باشد.

طراحی بهینه نمونه یک سد

برای نشان دادن چگونگی عملکرد روش، انتخاب

طرحی مناسب برای یک سد خاکی سنگریزه‌ای [۲] به

ارتفاع ۷۰ متر با هسته رسی بر روی شالوده‌ای نفوذناپذیر

مورد نظر است. خاکریزها (پوسته‌های طرفین) هسته از

شن و خرده سنگ ساخته می‌شوند. با بررسیهای انجام

شده چهار گزینه برای انتخاب منابع قرضه مصالح یافت

شده است (جدول ۱). آزمایشهای انجام شده بر روی

مصالح مورد استفاده در هسته نشان داده‌اند که در اثر

و مابقی معیارهای مورد نظر را با مشخص کردن حدودی مجاز برای هر یک، به عنوان قیود طراحی در مسئله وارد کرد. روش دیگر تشکیل یک تابع هدف مرکب است. از آنجایی که توابع هدف، توابعی اسکالر می‌باشند می‌توان آنها را با استفاده از یک تبدیل خطی مناسب بی‌بعد (بدون واحد) کرده و تابع هدف مورد نظر را تشکیل داد:

$$F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i(\mathbf{X})}{a_i} - b_i \right)$$

ام از n تابع ارزیابی مورد نظر، a_i و b_i به ترتیب ضرایب

مقیاس و تغییر مبداء می‌باشند و می‌توانند مقادیری ثابت

داشته و یا خود توابعی از \mathbf{X} و حتی $f_i(\mathbf{X})$ باشند. علاوه بر

این هر یک از توابع $f_i(\mathbf{X})$ می‌توانند در شرایط مختلف

دارای اهمیت‌های متفاوتی باشند. بنابراین در اینگونه

موارد معرفی ضریب اهمیت نیز ضرورت

می‌یابد: $F(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n \omega_i \left(\frac{f_i(\mathbf{X})}{a_i} - b_i \right)$ که ω_i ضریب وزنی

اهمیت است و می‌تواند مانند a_i و b_i تابعی از \mathbf{X} و یا

$f_i(\mathbf{X})$ باشد.

جستجوی طرح بهینه

روشهای ریاضی مختلفی برای حل مسئله بهگزینی

مقید (الگوی تحلیلی تشکیل شده) وجود دارد. روشی که

در اینجا مورد استفاده بوده است، روش بهگزینی مقید

فیاکو - مک کورمیک (SUMT) می‌باشد. در این روش

مسئله به حداقل رساندن مقید تابع هدف $f(\mathbf{X})$ نسبت به

بردار متغیرهای $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ در یک فضای n

بعدی را که شرایط قیدی $C_j(\mathbf{X}) \leq 0; j = 1, \dots, m$ و

$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u; i = 1, \dots, n$ می‌توان به

حل دنباله‌ای از مسئله‌های نامقید به شکل

$\Phi(\mathbf{X}, r) = f(\mathbf{X}) + r \cdot P(\mathbf{X})$ بازاء دنباله‌ای از مقادیر r که

به سمت صفر میل می‌کنند، تبدیل کرد. $P(\mathbf{X})$ تابع جریمه

نامیده می‌شود و بگونه‌ای از روی قیدها ساخته می‌شود که

با نزدیک شدن بردار \mathbf{X} به حدود فضای جستجو مقدار آن

بسیار بزرگ شده و تابع $\Phi(\mathbf{X}, r)$ از نقطه کمینه خود به

شدت دور شود. ساده‌ترین شکل انتخاب تابع جریمه به

صورت $P(\mathbf{X}) = \sum_j \frac{-1}{C_j(\mathbf{X})}$ می‌باشد.

قیود $x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$ را هم می‌توان مستقیماً در حین

جستجو و یا بصورت ضمنی با افزودن آنها به تابع جریمه

تعیین شده برای هریک، با یک تبدیل خطی به شکل $x=ay+b$ برقرار می شود. در صورت استفاده از عوامل استاندارد شده، خطای محاسبات عددی ناشی از اختلاف بین رتبه مقادیر متغیرهای کاهش می یابد. x_1 الی x_4 که به ترتیب با متغیرهای طبیعی B, α, γ و (m_1, m_2) متناظر هستند، استفاده می شود. $(1.00 \geq x_i \geq 0.00; i=1,2,3,4)$

معیار بهینگی طرح (تابع هدف)، کمینه بودن هزینه تهیه و حمل مصالح هسته (E_j) است و پاسخهایی از سد که به عنوان قیود مسئله بکار برده خواهند شد، ضرایب اطمینان نسبت به پایداری شیبهای بالادست ($k_{s,up}$) و پائین دست ($k_{s,dwn}$)، ضریب اطمینان ترک خوردگی هسته در صفحات افقی ($k_{s,crack,h}$) و قائم ($k_{s,crack,v}$)، می باشند [۲]. به عنوان قیود طراحی باید ضرایب اطمینان پایداری شیب بالادست و پائین دست حداقل برابر $1/5$ و ضریب اطمینان پایداری در ترک خوردگی هسته حداقل برابر $2/0$ باشند [۳].

گرچه برای کاربرد عملی بهتر است از $2^4=16$ طرح نمونه بازاء مقادیر حدی (یعنی $+1$ و -1) استفاده کرد، ولی برای کاهش زمان حل تنها ۸ طرح نمونه از سد در فضای طراحی انتخاب می شود، (شکل ۳ و جدول ۲ - الف) تحلیل‌های لازم انجام شده، (جدول ۲ - ب) و توابع تقریبی برای توابع هدف و قیدی به شکل توابع چندجمله‌ای بر حسب عوامل مؤثر متغیر استاندارد شده (x_1 الی x_4 و t) و با استفاده از روش رگرسیون گام بگام و تحلیل‌های حساسیت آماری، محاسبه می شوند. (جدول ۳) [۱۴].

جدول ۲ - الف: عوامل واقعی (طبیعی) و استاندارد شده متناظر برای طرحهای حدی نمونه در فضای طراحی.

شماره	برنامه ریزی محاسبات توسط عوامل متغیر						
طرح	x_1	B, m	x_2	α°	x_3	$\gamma, kN/m^2$	m_1, m_2
۱	+۱	۳۴	+۱	۵۸	-۱	۱۷/۸	۲/۰; ۱/۸
۲	-۱	۱۷	-۱	۰	-۱	۱۷/۸	۲/۰; ۱/۸
۳	+۱	۳۴	-۱	۰	-۱	۱۷/۸	۲/۷۵; ۲/۵
۴	-۱	۱۷	+۱	۵۸	-۱	۱۷/۸	۲/۷۵; ۲/۵
۵	+۱	۳۴	+۱	۵۸	+۱	۱۸/۲	۲/۷۵; ۲/۵
۶	-۱	۱۷	-۱	۰	+۱	۱۸/۲	۲/۷۵; ۲/۵
۷	+۱	۳۴	-۱	۰	+۱	۱۸/۲	۲/۰; ۱/۸
۸	-۱	۱۷	+۱	۵۸	+۱	۱۸/۲	۲/۰; ۱/۸

تراکم بوسیله غلتکهای متوسط وزن حجمی $\gamma_{dry}=17.8$ KN/m^3 و توسط غلتکهای سنگین وزن حجمی $\gamma_{dry}=18.2$ KN/m^3 بدست می آید.

جدول ۱: مشخصات گزینه های ممکن برای منابع قرضه.

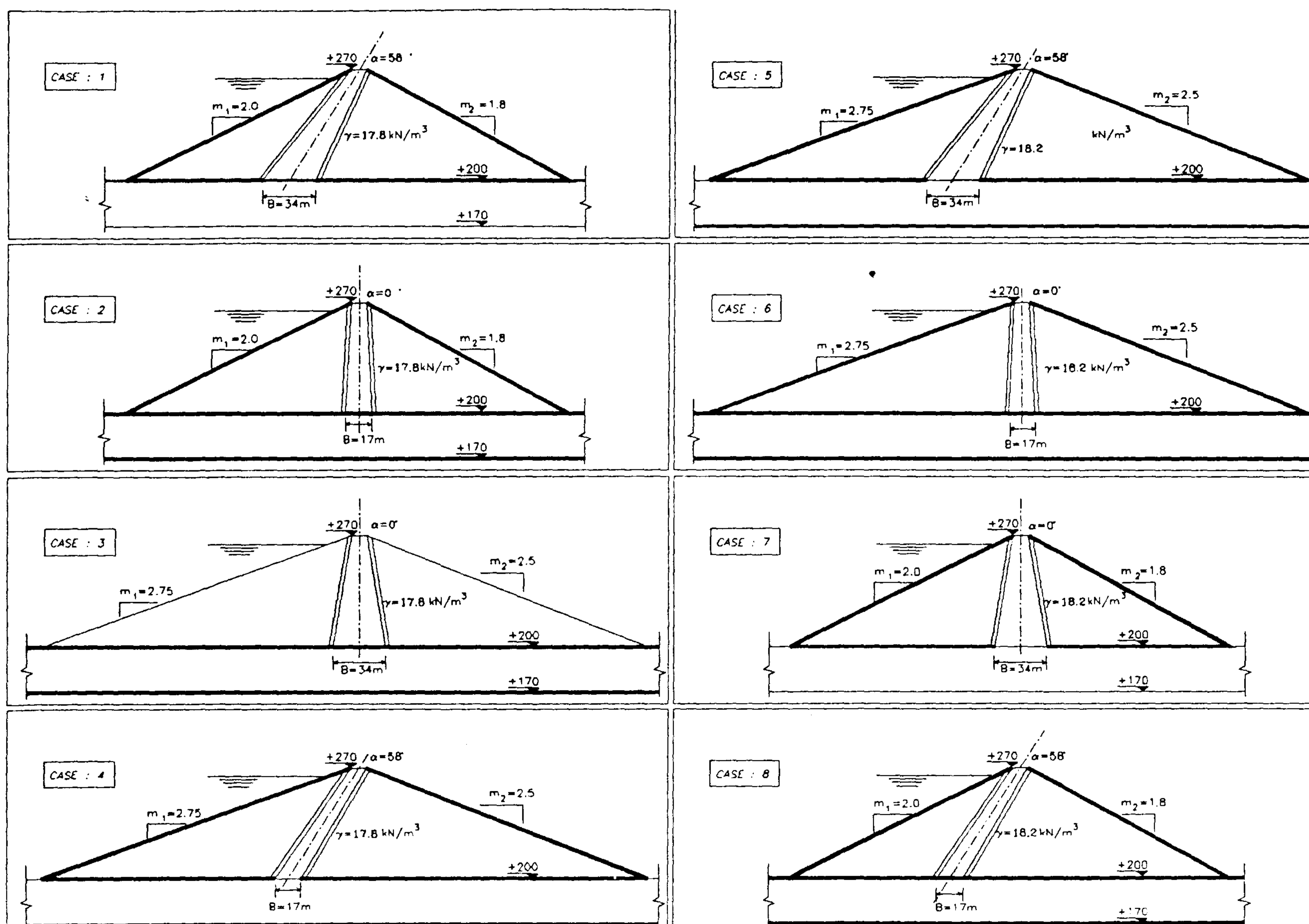
گزینه	فاصله از قرضه، Km		ارزش مصالح، واحد بر m^3		
	شن و قلوه سنگ	خاک رسی	شن و قلوه سنگ	خاک رسی پوک	خاک رسی متراکم
۱	۳	۳	۱/۷۳	۱/۴۸	۱/۷۱
۲	۱۵	۳	۵/۴۵	۱/۷۱	۱/۴۸
۳	۳	۱۵	۱/۷۳	۵/۲	۵/۴۲
۴	۱۵	۱۵	۵/۴۵	۵/۲	۵/۴۲

بر اساس مطالعات اولیه و مطابق نظرات طراح، پنج عامل متغیر در انتخاب طرح بهینه در نظر گرفته شده‌اند: (از لحاظ علمی هیچ محدودیتی در تعداد یا نوع متغیرهای طراحی وجود ندارد و هر عامل موثر دیگری را هم می توان به عنوان عوامل موثر متغیر فرض کرد و در دامنه تغییرات تعیین شده مقداری برای آن بدست آورد، با این وجود با افزایش تعداد متغیرها زمان لازم برای حل مسئله بصورت نمایی افزایش می یابد. تعداد مطلوب برای تعداد متغیرها در یک مسئله بهگزینه‌ی ۵ تا ۸ متغیر می باشد [۲].

$B =$ عرض هسته در روی شالوده با دامنه تغییرات بین 34 تا 17 متر، $\alpha =$ زاویه محور هسته نسبت به خط شاقول از صفر تا 58° ، $\gamma =$ وزن واحد حجم خشک مصالح هسته از $18/2 KN/m^3$ تا $17/8$ ، m_1 و $m_2 =$ زاویه شیبهای بالادست و پائین دست و بطور همزمان به ترتیب از $1:2/5$ و $1:2/0$ تا $1:1/8$ تغییر می نمایند، (در نتیجه ضمن اینکه با تغییرات توأم شیبهای m_1 و m_2 ، تعداد عوامل موثر متغیر کاهش می یابد، قید رعایت محدودیتهای مربوط به لزوم تغییرات متناسب و همزمان شیبهای هر دو طرف را هم ارضا می نماید.) $t =$ معدن قرضه‌ای است که برای مصالح هسته و پوسته به کار برده خواهد شد. برای سهولت انجام تحلیل‌های حساسیت در تشکیل توابع تقریبی هدف و قیود از عوامل مؤثر استاندارد شده (دامنه تغییرات عامل متغیر استاندارد شده، بازه $[+1$ و $-1]$ می باشد و تناظر بین متغیرهای طبیعی و استاندارد شده در دامنه تغییرات

جدول ۲ - ب: مقادیر ضرایب اطمینان و تابع مطلوبیت کلی مقادیر پاسخهای اقتصادی تعمیم یافته متناظر در طرحهای نمونه.

شماره طرح	پاسخ اقتصادی مقطع مرکزی				مطلوبیت D_i	پاسخهای فیزیکی سد			
	E_{4i}	E_{3i}	E_{2i}	E_{1i}		$k_{s.cr.v.}$	$k_{s.cr.h.}$	$k_{s.dwn.}$	$k_{s.up.}$
۱	۱۰۱۱۳۶/۸	۷۳۹۷۱/۸	۵۷۳۴۰/۸	۳۰۰۷۵/۸	۰/۵۹۴	۲/۰	۲/۰	۱/۲۸	۱/۲۴
۲	۴۲۰۹۳/۸	۱۶۵۱۰/۶	۳۸۱۷۹/۳	۱۳۱۸۶/۱	۰/۵۳۴	۴/۳	۶/۰	۱/۲۱	۱/۲۵
۳	۵۶۹۴۱/۰	۳۳۲۱۲/۱	۵۱۵۳۹/۶	۱۷۸۱۰/۷	۰/۶۷۶	۱/۵	۱/۶۷	۱/۵	۱/۳۲
۴	۶۴۲۵۲/۹	۲۲۸۱۲/۵	۶۱۸۲۸/۹	۲۰۲۸۹/۵	۰/۷۷۱	۲/۰	۵/۰	۱/۳۵	۱/۳۵
۵	۱۲۱۵۷۸/۳	۸۳۲۰۶/۱	۷۷۶۸۲/۳	۳۸۴۱۰/۱	۰/۶۰۳	۱/۲۲	۱/۹	۱/۲۹	۱/۳۲
۶	۶۶۶۲۷/۵	۳۴۴۲۹/۳	۶۳۳۱۳/۰	۲۱۱۱۴/۸	۰/۲۶۹	۰/۶	۱/۰	۱/۲۸	۱/۴
۷	۴۲۴۷۰/۱	۱۸۸۵۰/۳	۳۷۰۶۸/۶	۱۳۴۴۸/۸	۰/۴۱۲	۱/۱۵	۱/۳	۱/۲۶	۱/۲۴
۸	۴۵۹۵۱/۷	۱۷۰۸۵/۷	۴۳۴۲۷/۷	۱۴۵۶۱/۷	۰/۱۹۸	۰/۷	۰/۷۰	۱/۲۹	۱/۳۲



شکل ۳: طرحهای نمونه از سد خاکی در فضای طرح برای برازش توابع قیدی و هدف.

جدول ۳: پاسخهای سد خاکی و چند جمله ایهای برازش شده بر پاسخ های سد.

خطای استاندارد برازش مقدار مطلق درصد	چند جمله ای برازش شده	نماد	پاسخ مورد نظر
۰/۰۱۸۸۵٪	۴۳۷/۴۸	E_1	هزینه طرح برای گزینه ۱ منبع قرضه
۰/۰۰۱۴۶۸٪	۴۱/۸۲	E_2	هزینه طرح برای گزینه ۲ منبع قرضه
۰/۰۰۰۵۸۹٪	۴۳۸/۳۰	E_3	هزینه طرح برای گزینه ۳ منبع قرضه
۰/۰۰۱۶۶۲٪	۴۱/۸۰	E_4	هزینه طرح برای گزینه ۴ منبع قرضه
۱/۶۷۷٪	۶۶۰/۲	E_1	هزینه طرح برای کلیه گزینه های منابع قرضه
۰/۰۰۶۴۱۰٪	۰/۰۱۳۷	D_{uj}	تابع مطلوبیت کلی
۰/۰۰۱۶۵۷٪	۰/۰۰۸۴۴	$k_{s,up}$	ضریب ایمنی پایداری شیب بالادست
۰/۰۰۰۵۷۶٪	۰/۰۰۵۷۷	$k_{s,dwn}$	ضریب ایمنی پایداری شیب پائین دست
۰/۰۰۶۵۸۸٪	۰/۰۰۹۵۳۴	$k_{s,cr h}$	ضریب ایمنی پایداری ترک خوردگی هسته (افقی)
۱/۱۳۴۶٪	۰/۵۰۸۶	$k_{s,cr v}$	ضریب ایمنی پایداری ترک خوردگی هسته (قائم)

۱+ در نقطه مورد نظر است. تبدیل از مقدار واقعی پاسخ،
 y ، به پارامتر y' با رابطه ذیل صورت می گیرد:

$$y' = \frac{2y - (y_{\max} + y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}}$$

ترتیب پاسخهای شرطی متناظر با مقیاس y' در -1 و $+1$
می باشند. در این صورت تابع مطلوبیت کلی D_u برای n

$$D_u = \sqrt[n]{\prod_{y=1}^n d_u}$$

صورت مسئله بهگزینه:

$$E_i(x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \min \quad i=1,2,3,4$$

بشرط آنکه

$$1.00 \geq D_{uj}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 0.00$$

$$1.00 \geq x_i \geq -1.00 \quad i=1,2,3,4$$

با استفاده از روشهای بهگزینه، مقادیر بهینه هر گزینه
حاصل شده است (جدول ۴). مقایسه نتایج نشان می دهد
که بهترین طرح، گزینه اول می باشد.

حالت ۲ - از توابع هزینه E_1 تا E_4 بطور جداگانه به عنوان
توابع هدف و از توابع $k_{s,up}$ ، $k_{s,dwn}$ ، $k_{s,cr h}$ ، $k_{s,cr v}$ به
عنوان توابع قیدی استفاده کرد (جدول ۳).

صورت مسئله بهگزینه:

این مسئله با استفاده از روند ارائه شده به چند حالت
قابل حل است. در صورتی که گزینه های موجود برای
معدن قرضه بصورت تفکیک شده در نظر گرفته شوند، ۴
مسئله مجزای بهگزینه حاصل خواهد شد. این چهار
مسئله بهگزینه حل شده و نتایج با هم مقایسه می شوند.
بصورت دیگر با استفاده از یک متغیر کمکی گسسته،
گزینه های موجود برای معدن قرضه ادغام شده و یک
مسئله واحد بدست می آید. با استفاده از هر یک از
روش های حل عددی مناسب بهگزینه، مسئله حل شده،
مقادیر بهینه ای بدست خواهد آمد (جدول ۳). برای نشان
دادن وسعت محدوده عمل برای طراح، الگوی ریاضی
بهگزینه سد مورد نظر در ۴ حالت تشکیل شده و نتایج با
هم مقایسه خواهند شد.

حالت ۱ - توابع هزینه E_1 تا E_4 به طور
جداگانه به عنوان توابع هدف و تابع مطلوبیت
کلی بصورت قید بکار برده خواهد شد
(جدول ۲). تابع مطلوبیت جزئی بصورت
 $d_u = \exp[-\exp(-y')]$ تعریف می گردد، که y' مقدار متناظر
با مقدار پاسخ واقعی سد، y ، در مقیاس بی بعد بین -1 و

حالت ۴ - از تابع هزینه E_j به عنوان تابع هدف و از توابع قیدی استفاده کرد (جدول ۳).

$$E_j(x_1, x_2, x_3, x_4, t) \rightarrow \min$$

به شرط آنکه

$$1.35 \geq k_{s,up}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.15$$

$$1.35 \geq k_{s,dwn}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.15$$

$$2.00 \geq k_{s,cr,h}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.50$$

$$2.00 \geq k_{s,cr,v}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.50$$

$$1.00 \geq x_i \geq 0.00 \quad i=1,2,3,4$$

$$t=1,2,3,4$$

جدول ۵: مقادیر بهینه عوامل موثر برای طرح بهینه سد در حالت ۲.

مقدار قیود	مقدار بهینه تابع	عوامل استاندارد شده	گزینه قرصه
$k_{s,up}=1.27$ $k_{s,dwn}=1.24$ $k_{s,cr,h}=1.68$ $k_{s,cr,v}=2.0$	$E_{1,min}=11857$	$x_1=1$; $x_2=-1$; $x_3=-0.607$; $x_4=-1$	$t=1$
$k_{s,up}=1.27$ $k_{s,dwn}=1.25$ $k_{s,cr,h}=1.71$ $k_{s,cr,v}=2.05$	$E_{2,min}=32761$	$x_1=1$; $x_2=-1$; $x_3=-0.721$; $x_4=-1$	$t=2$
$k_{s,up}=1.27$ $k_{s,dwn}=1.25$ $k_{s,cr,h}=1.71$ $k_{s,cr,v}=2.05$	$E_{3,min}=17190$	$x_1=1$; $x_2=-1$; $x_3=-0.702$; $x_4=-1$	$t=3$
$k_{s,up}=1.27$ $k_{s,dwn}=1.25$ $k_{s,cr,h}=1.68$ $k_{s,cr,v}=1.99$	$E_{4,min}=38450$	$x_1=1$; $x_2=-1$; $x_3=-0.607$; $x_4=-1$	$t=4$

با بررسی نتایج روشهای مختلف ایجاد الگوی ریاضی (حالت‌های ۱ تا ۴ در جدول ۶)، مشاهده می‌شود که همه روشها تقریباً به طرح بهینه یکسانی منتهی می‌شوند. تنها مقدار عامل متغیر استاندارد شده x_3 (وزن حجمی مصالح خاکیزی) در این طرحهای بهینه تا حدودی متفاوت است. این مقدار تفاوت برای عامل طبیعی متناظر آن (یعنی ۷) معادل تغییراتی در بازه $[17/7, 17/9]$ می‌باشد و با توجه به خطاهای استاندارد (جدول ۳) کاملاً قابل قبول می‌باشد. در این مرحله یک مسئله تحلیل سد خاکی با ابعاد و مشخصات طرح بهینه، تشکیل شده و تحلیل‌های اقتصادی و پایداری بطور دقیق بر روی آن انجام می‌گردد. نتایج حاصل از این تحلیلها نباید در قیاس با نتایج تقریبی برآورد شده توسط چندجمله‌ایها، خطایی بیش از ۱۰٪ را نشان دهد، وگرنه باید پس از مشخص کردن طرح بهینه دامنه جستجوی عوامل متغیر در بهگزینی را حول نقطه بهینه کوچکتر کرده و مسئله بهگزینی را مجدداً با نقاط جدید،

$$E_t(x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \min \quad t=1,2,3,4$$

بشرط آنکه

$$1.35 \geq k_{s,up}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.15$$

$$1.35 \geq k_{s,dwn}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.15$$

$$2.00 \geq k_{s,cr,h}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.50$$

$$2.00 \geq k_{s,cr,v}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 1.50$$

$$1.00 \geq x_i \geq 0.00 \quad i=1,2,3,4$$

با استفاده از روش گفته شده، مقادیر بهینه هر گزینه حاصل خواهد شد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که بهترین طرح، همان گزینه اول می‌باشد. (جدول ۵)

حالت ۳ - از تابع هزینه کلی E_j به عنوان تابع هدف و از تابع مطلوبیت کلی (D_{uj}) به عنوان تابع قیدی استفاده کرد (جدول ۳).

$$E_j(x_1, x_2, x_3, x_4, t) \rightarrow \min$$

بشرط آنکه

$$1.00 \geq D_{uj}(x_1, x_2, x_3, x_4) \geq 0.00$$

$$1.00 \geq x_i \geq 0.00 \quad i=1,2,3,4$$

$$t=1,2,3,4$$

جدول ۴: مقادیر بهینه عوامل موثر در حالت ۱.

گزینه معدن قرصه (t)	فاصله سداز KM	مرکز قرصه، مصالح هسته	عوامل استاندارد شده		بهینه
			عوامل حقیقی	عوامل استاندارد شده	
۱	۳	۳	$x_1 = 1/45$ $x_2 = -1/0$ $x_3 = -0/64$ $x_4 = -1/0$ $D = 0/52$ $E = 11797$	$B = 38 \text{ m}$ $\alpha = 0^\circ$ $\gamma_{dry} = 17/9 \text{ kN/m}^3$ $m_1 = 2/0$ $m_2 = 1/8$	
۲	۳	۱۵	$x_1 = 2/13$ $x_2 = -0/35$ $x_3 = -0/957$ $x_4 = -1/0$ $D = 0/544$ $E = 33013$	$B = 43/6 \text{ m}$ $\alpha = 19^\circ$ $\gamma_{dry} = 17/8 \text{ kN/m}^3$ $m_1 = 2/0$ $m_2 = 1/8$	
۳	۱۵	۳	$x_1 = -1/0$ $x_2 = -1/0$ $x_3 = -1/0$ $x_4 = -1/0$ $D = 0/534$ $E = 16511$	$B = 17 \text{ m}$ $\alpha = 0^\circ$ $\gamma_{dry} = 17/8 \text{ kN/m}^3$ $m_1 = 2/0$ $m_2 = 1/8$	
۴	۱۵	۱۵	$x_1 = 1/871$ $x_2 = -1/0$ $x_3 = -0/575$ $x_4 = -1/0$ $D = 0/53$ $E = 37157$	$B = 41/4 \text{ m}$ $\alpha = 0^\circ$ $\gamma_{dry} = 17/9 \text{ kN/m}^3$ $m_1 = 2/0$ $m_2 = 1/8$	

مقدار قابل توجهی به هم نزدیک باشند، برای رسیدن به یک طرح بهینه مطلق باید تغییراتی در معیار ارزشیابی طرح بهینه داده شده یا قیود دیگری به مسئله افزوده گردند، و یا اینکه در تعداد و یا نوع و یا حدود تغییرات متغیرهای طراحی تجدید نظر هایی قائل شد و به عبارت دیگر الگوی مفهومی ایجاد شده توسط طراح را تغییر داد. (در یک نرم افزار کامل رایانه ای این عمل یا با مشاوره مستقیم با طراح و توسط وی و یا توسط سیستم هوش مصنوعی ای که به این منظور طراحی شده باشد، قابل انجام می باشد.)

۵- طرحهای بهینه بدست آمده، تحت اثر دو عامل عمده قرار داشته‌اند (باید توجه داشت عوامل متعدد دیگری هم وجود دارند که می توانند بر جواب بهینه موثر باشند، از جمله شکل و روش تعیین ضرایب توابع تقریب زننده پاسخهای سد، روش بهگزینی و غیره. که چون در حل مسئله نمونه حساسیت مسئله برای استفاده از آنها تعیین نشده است، از ذکر جزئیات صرف نظر می شود): اول، مجموعه پاسخهایی از عملکرد سد که به عنوان توابع قیدی در نظر گرفته می‌شوند و حدودی که برای این پاسخها در نظر گرفته می‌شود، و دوم، نقطه اولیه‌ای که برای شروع جستجو در روش بهگزینی انتخاب می‌شود، و هر دو اینها بطور مستقیم توسط طراح تعیین شده بودند. به این ترتیب نشان داده شد که بروشهای گوناگونی می‌توان الگوی تحلیلی بهگزینی را تشکیل داد که ممکن است نقطه بهینه نهایی بدست آمده از این الگوها یکسان باشند. با این وجود هیچ تضمینی برای آن وجود ندارد.

۶- روش المانهای کرانه‌ای [۱۳] و روش کرانه‌های آزمایشی [۱۱] در تحلیل میدانهای تراوش با مرزهای متحرک به سبب سهولت در دادن اطلاعات و سرعت و دقت در تعیین جوابها دارای کارایی خوبی است،

۷- روش جستجوی تصادفی مونت کارلو [۱۲] برای تعیین ضرایب اطمینان لغزشی [۸] و [۹] در سطوح شیبدار در مقایسه با سایر روشها از نقطه نظر سرعت و تعیین سطح لغزش مطلق قابل قبول می‌باشد.

۸- برای انجام طراحی بهینه باید به دفعات سد را از جنبه‌های مختلف تحلیل گردد، پس به عنوان یکی از مبانی انجام طراحی بهینه، و برای کاهش زمان صرف شده و افزایش کارایی روند، می‌باید روشهای تحلیل و الگوریتمهای عددی و نرم‌افزاری مربوطه را در جهت

تشکیل داد تا به نتایج مطلوبتری رسید. در اینجا بررسی نتایج تحلیل دقیق رضایت بخش می‌باشد [۲].

باید توجه داشت که در مرحله بهگزینی انتخاب قیود و نقطه شروع جستجو برای همگرایی روش بسیار با اهمیت می‌باشد. در این مثال تجربه طراح کمک مؤثری به انجام انتخابهای مناسب بوده است. در صورت استفاده از سیستم هوش مصنوعی برخی از این انتخابها را می‌توان مستقیماً به رایانه واگذار کرد.

نتیجه گیری

یافته‌های مهمی که از بررسی و مطالعات بدست آمده‌اند، را می‌توان چنین خلاصه کرد:

۱- طراحی بهینه به مفهوم تعیین بهترین مقادیر برای عوامل مؤثر متغیر از دامنه مشخص شده برای تغییرات آنها و یا انتخاب بهترین گزینه از بین چند گزینه پیشنهادی می‌باشد و برای یک طرح اولیه از سد خاکی و بر اساس یک روند مشخص علمی مطمئناً به یک جواب بهینه خواهد رسید.

۲- در حال حاضر امکان طراحی بهینه سد خاکی توسط رایانه تنها به این صورت وجود دارد که طراح یک طرح اولیه انتخاب و توسط روشهای رایانه‌ای با توجه به معیارهای تعیین شده، ابعاد و مشخصات بهینه آنرا تعیین نماید، یا از میان چندین گزینه، برای مصالح یا شکل هندسی، یکی را که نسبت به دیگران ارجحیت داشته باشد، انتخاب نماید.

۳- روش پیشنهاد شده برای بهگزینی طرح سد خاکی تحت عنوان روش تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر برای ایجاد مسئله ریاضی بهگزینی بر اساس داده‌های اولیه طراح از سد خاکی و تحلیل‌های انجام شده، روشی مناسبی می‌تواند باشد و (در صورت انتخاب الگوی مفهومی و تحلیلی مناسب و استفاده از یک نقطه شروع جستجوی خوب در روند بهگزینی) در اکثر مواقع و در مدت زمان کوتاه به جواب بهینه قابل قبولی منجر می‌شود. مطالعات بیشتری باید در مورد روشهای مناسب ریاضی حل مسئله بهگزینی (الگوی تحلیلی) تشکیل شده صورت گیرد.

۴- در اکثر مواقع با توجه به اهداف و محدودیتهای اعمال شده و یا تنوع مفروضات بکار گرفته شده در تشکیل الگوی تحلیلی، طرح بهینه مطلق وجود ندارد و می‌توان طرحهای بهینه‌ای بدست آورد که از نظر سیستم ارزیابی بهینگی به

جدول ۶: مقایسه نتایج بهگزینی با الگوهای ریاضی متفاوت.

مرجع پاسخها	توضیح الگوی تشکیل شده	عوامل متغیر استاندارد شده	مقدار تابع هدف و قیود	عوامل متغیر طبیعی
حالت ۱ [2]	هدف: چندجمله‌ای‌های مجزای تشکیل شده برای هر گزینه معدن قرصه قید: چندجمله‌ای تابع مطلوبیت کلی	$t=1;$ $x_1=1.45;$ $x_2=-1;$ $x_3=-0.64;$ $x_4=-1;$	گزینه اول قرصه $B=38$ m; $\alpha=0^\circ;$ $\gamma_{dry}=17.9;$ $m_{1,2}=2.0, 1.8;$	$E_{i,min}=11797;$ $D_{ui,min}=0.52$
حالت ۲	هدف: چندجمله‌های جداگانه برای هرگزینه معدن قرصه قیود: چندجمله‌ای‌های تقریبی توابع ضریب اطمینان	$t=1;$ $x_1=1;$ $x_2=-1;$ $x_3=-0.607;$ $x_4=-1;$	گزینه اول قرصه $B=34$ m; $\alpha=0^\circ;$ $\gamma_{dry}=17.9;$ $m_{1,2}=2.0, 1.8;$	$E_{i,min}=11857;$ $k_{s,up}=1.27;$ $k_{s,down}=1.24;$ $k_{s,cr h}=1.68;$ $k_{s,cr v}=2.0$
حالت ۳	هدف: چندجمله‌ای تشکیل شده با کاربرد متغیر حالت t قید: چندجمله‌ای تابع مطلوبیت کلی	$t=1;$ $x_1=1;$ $x_2=-1;$ $x_3=-1;$ $x_4=-1;$	گزینه اول قرصه $B=34$ m; $\alpha=0^\circ;$ $\gamma_{dry}=17.8;$ $m_{1,2}=2.0, 1.8;$	$E_{i,min}=9807;$ $D_{ui,min}=0.528$
حالت ۴	هدف: چندجمله‌ای تشکیل شده با کاربرد متغیر حالت t قیود: چندجمله‌ای‌های تقریبی توابع ضریب اطمینان	$t=1;$ $x_1=1;$ $x_2=-1;$ $x_3=-0.644;$ $x_4=-1;$	گزینه اول قرصه $B=34$ m; $\alpha=0^\circ;$ $\gamma_{dry}=17.9;$ $m_{1,2}=2.0, 1.8;$	$E_{i,min}=10301;$ $k_{s,up}=1.27;$ $k_{s,down}=1.24;$ $k_{s,cr h}=1.69;$ $k_{s,cr v}=2.02$

برای نقطه مرکزی فضای طرح بدست آورد. و تحلیلهای لازم صورت می‌گیرد و بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر پاسخ برای هر طرح جدید دیگر برآورد می‌شود. در این مقاله از عبارات چندجمله‌ای برای اینکار استفاده شده است.

۱۰- با این وجود هنوز برای رسیدن به یک ابزار طراحی بهینه سد خاکی باید مطالعات و آزمونهای فراوانی در زمینه‌هایی از قبیل سریعترین روش، بهترین شکل توابع تقریب کننده، مناسب ترین روش ریاضی بهگزینی در حل الگوی تحلیل، کاربرد هوش مصنوعی و بهترین روش استفاده از آن در مراحل مختلف نظیر انتخاب قیود مناسب، تشکیل الگوهای مفهومی و تحلیلی، حل ریاضی الگوی تحلیلی و کنترل همگرایی آن و تصمیم‌گیری در مورد بهینگی طرح صورت گیرد.

افزایش سرعت و دقت توسعه داده و الگوریتمهای ویژه‌ای بوجود آورد. به عنوان نمونه برای نرم‌افزار کاربردی در این مقاله ساختار جدیدی برای فایل‌های اطلاعاتی موسوم به PDF (Parametric Data File) ابداع گردیده است، که سهولت زیادی در وارد کردن و اصلاح اطلاعات ورودی ایجاد می‌نماید.

۹- نشان داده شده که می‌توان برای برآورد پاسخ سد در طرحهای مختلف بدون نیاز به استفاده از روشهای تحلیل دقیق از برازش یک تابع با شکل مشخص برای نقاط نمونه‌ای از فضای طرح سود جست. در این روش ابتدا چندین طرح از سد انتخاب (تجربه نشان داده است که بهتر است از نقاط کرانه ای فضای طرح برای تشکیل توابع تقریبی هدف و قیود استفاده کرد (2ⁿ طرح) و پس از برازش توابع موردنظر صحت برازش را با استفاده از مقایسه بین نتایج تحلیلهای و مقادیر تخمینی از روی توابع تقریبی

مراجع

- 1 - Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F. and Clevenger. W. A. (1967). *Earth and earh rock dams, engineering problems of design and construction*. New York : Jhon Wiley and Sons, Inc.

- 2 - Goldin, A. L. , Rasskazov, L.N. (1992). *Design of earh damas*. A.A. Balkema.
 - 3 - Low III, J. (1980). "Embankent dams." *Handbook of Applied Hydraulics* (Davis C. V. and Sorensen K. E., ed.). McGraw-Hill Book Company.
 - 4 - U. S. Dept. of Interior, Bureau of Reclamation (USBR). *Design of small dams*. 1978.
 - 5 - De Mello, V. F. B. (1977). "Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams." *Developments in Soil Mechnics. Consultant*.
 - 6 - Kirsch, U. (1981). *Optimum structural design, concepts, methods and applicaions*. McGraw-Hill, Inc.
 - 7 - Arora, J. S. (1989). *Introduction to opimum design*. Mc-GrawHill Book Company.
 - 8 - Whitlow, R. (1990). *Basic soil mechanics*. 2nd ed. Longman Scientific & Technical.
 - 9 - Das, B. M. (1987). *Theoritical foundation engineering*. Elsevier Science Publishers B.V.
 - 10 - Das, B. M. (1985). *Advanced soil mechanics*. 3rd ed. McGraw Hill book company.
 - 11 - Crank, J. (1988). *Free and moving boundary problems*. Oxford Science Publications.
 - 12 - Greco, V. R. (1996). "Efficient monte carlo technique for locating critical slip surface." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 122, No. 7, PP. 517-525.
- ۱۳ - بهروش، ع.، حسینی اصل، س. ی. "حل معادلات دیفرانسیل بروش المانهای محدود." چاپ و نشر هادی، (۱۳۷۰).
- 14 - Laplin, L. L. (1990). *Probability and statistics for modern engineering*, 2nd ed. Boston: PWS-KENT Publishing company.