



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و هفت، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۱۹ تا ۱۳۰  
Vol. 47, No. 1, Summer 2015, pp. 119-130



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## بهینه‌سازی ابعاد هسته رسی سدهای خاکی با استفاده از روش الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (Simulated Annealing (SA))

مرضیه محمدی<sup>۱</sup>، غلامعباس بارانی<sup>۲\*</sup>، کورش قادری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

(دریافت ۱۳۹۱/۸/۱۵، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۴)

### چکیده

سد خاکی سازه ای است به صورت همگن یا غیرهمگن به منظور بالا آوردن سطح آب یا ذخیره آن ساخته می‌شود. سدهای خاکی از اجزای مختلفی تشکیل شده که یکی از مهمترین اجزای آن هسته سد می‌باشد. از این روطراحی بهینه هسته سد خاکی، نوع مصالح و ابعاد و شکل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. بطوری که با کمترین حجم مصالح، بیشترین تاثیر را در کاهش میزان تراوش از بدنه سد و حفظ پایداری آن داشته باشد. هدف از انجام تحقیق توسعه مدلی برای بهینه‌سازی هندسه هسته سد حصار سنگی بیرجند براساس تلفیق معادلات حاصل از شبیه‌سازی تراوش، ضریب پایداری و گرادیان هیدرولیکی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) می‌باشد. مقادیر پارامترهای ضریب پایداری، تراوش و گرادیان هیدرولیکی بدست آمده از مدل بهینه هسته با نتایج حاصل از مدل‌های نرم افزاری Geo - Studio مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این مقایسه نشان دهنده همبستگی بالا در حدود ۰/۹۷ می‌باشند. نتایج بدست آمده از مدل توسعه داده برای تعیین ابعاد بهینه هسته سد خاکی با اندازه‌های واقعی سد حصار سنگی بیرجند مورد مقایسه قرار گرفت که بیانگر کاهش حجم مصالح مورد نیاز جهت ساخت پوسته سد در حدود ۸٪ و هسته سد در حدود ۲۱٪ که تامین کننده پایداری لازم نیز می‌باشد. نتایج بیانگر عملکرد بسیار مناسب مدل در جهت کاهش هزینه‌های اجرایی سد در حدود ۱۲/۳٪ در طرح بهینه ابعاد هسته رسی تحت شرایط پایدار سدهای خاکی می‌باشد.

### کلمات کلیدی

الگوریتم SA، بهینه سازی، سد خاکی، نرم افزار Geo - Studio، هسته رسی.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: gab@uk.ac.ir

## ۱- مقدمه

آب، مهمترین نیاز بشر است و تصور حیات بدون آن امکان ندارد. سدهای خاکی یکی از قدیمی ترین تاسیسات ساختمانی است که انسان به دلیل نیازهای اولیه اش در زمینه عملیات کشاورزی و تامین آب شرب مبادرت به ساخت آن کرده است [1]. این سدها به دو نوع سدهای خاکی همگن و غیرهمگن تقسیم می‌شوند. سدهای خاکی غیرهمگن از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده اند که هر کدام بطور جداگانه تاثیر زیادی بر عملکرد بدنه سد، پایداری آن و سایر اجزای طراحی دارند. یکی از اجزاء مهم سدهای خاکی که در طراحی نظر محققین امر را به خود جلب می‌نماید هسته سد است.

هسته سدهای خاکی عامل مهم آب‌بندی و کنترل تراوش از بدنه سد می‌باشد. از این رو انتخاب نوع مصالح، ابعاد و شکل هسته سد از اهمیت زیادی برخوردار است. از آنجا که هسته به دلیل نیاز به نفوذیری بسیار کم الزاما باید از مصالح ریزدانه ساخته شود، به ناچار مقاومت برشی آن کمتر از سایر قسمت‌های بدنه سد می‌باشد. بنابراین از لحاظ پایداری سد، هر چه هسته آن نازک تر باشد بهتر است از طرف دیگر هر چه هسته سد ضخیم تر باشد مقاومت آن در برابر نشست آب و فرسایش داخلی بیشتر خواهد بود و خطر ایجاد شکاف یا ترک حاصل از نشست غیر یکنواخت کاهش می‌یابد [11]. علاوه بر اهمیت عوامل یاد شده در تعیین هندسه هسته، امروزه ملاحظات اقتصادی یکی از مهم ترین عوامل در انتخاب هندسه هسته سد می‌باشد. از این رو هنگامی که تصمیم گرفته می‌شود از مصالح طبیعی برای ساخت هسته سد استفاده گردد، لازم است علاوه بر خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی این مصالح در دسترس بودن آن نیز مورد توجه قرار گیرد.

معمولا طراحی سدهای خاکی به صورت تجربی و براساس نظر مهندس طراح انجام می‌شود. استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی در مسائل سدهای خاکی در چند دهه اخیر مورد توجه محققین امر بوده است. مطالعات مربوط به بهینه‌سازی هسته رسی سدهای خاکی همگن اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط گلدین و راسکازو (Goldin و Rasskazove) با استفاده از روش های آزمون عامل کامل و تحلیل عوامل انجام شد. روش مورد نظر برای سدی با ارتفاع ۷۰ متر به کار برده شده است. عواملی چون عرض هسته، زاویه محور هسته نسبت به خط شاقول، وزن واحد حجم خشک مصالح هسته و زاویه شیب بالادست و پایین دست بعنوان متغیر طراحی در نظر گرفته شد بنابراین به عنوان یک نتیجه نهایی برای مسئله طرح بهینه یک سد ۷۰ متری، چهار گزینه مختلف برای منابع قرضه و شیب‌های متفاوت طرفین سد

ارائه گردیده است [5].

عبدالحسین و همکاران (Abdul Hussain and etal) از روش‌های دیگری مانند روش بهینه سازی توابع هدف چندگانه به روش وزنی جهت طراحی بهینه سدهای خاکی همگن استفاده کردند. بهینه‌سازی بر اساس قیدهای مربوط به پایداری وجوه سد و وجود فاصله کافی بین سطح آزاد آب مخزن و وجه پایین دست سد انجام گرفت و با استفاده از مدل های ریاضی دو بعدی تهیه شده در سدهای خاکی همگن محاسبات انجام گردید [3].

همچنین بهینه سازی شکل ظاهری سازه سد با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط هیتاشی و همکاران (Hitoshi and etal) مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیق آنها یک سیستم پشتیبانی ساخت و تصمیم گیری برای طراحی شکل ظاهری سازه سد توسعه داده شد [6].

وی (Wei) برای بررسی آنالیز برگشتی پارامترهای نشست در پی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جدیدی به نام برنامه ریزی تکاملی ایمن (IEP) استفاده کرد [13]. آکیوز و مردان (Akyuz and Merdun) با استفاده از نرم‌افزار Hele-Shaw viscous fluid تراوش در سدهای خاکی را پیش-بینی کردند [4].

نظری گیزلو و زراعت پرور Nazari Giglou and Zeraatparvar) با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی و فیزیکی مانند نفوذپذیری، شیب بالادست و پایین دست سد تراوش در سدهای خاکی را بررسی کردند که نتایج بدست آمده نشان دهنده تاثیر قابل توجه این پارامترها در تراوش در سد خاکی بوده است [10].

شقایق‌یان نیز برای طراحی بهینه هسته رسی سدهای خاکی از الگوریتم ژنتیک و برنامه COPED که در محیط ویژوال بیسیک تهیه شده بود استفاده کرد. تابع هدف این مسئله حجم هسته در یک متر طول سد بوده است [2].

روش شبیه‌سازی تیرید (SA) یک روش بهینه‌سازی عددی با ساختار تصادفی هوشمند است که بر مبنای مکانیک آماری و قیاس با فرایند فیزیکی تیرید شبیه‌سازی شده است. که مبنای تئوری قوی و قابلیت‌های این روش، کاربرد آن را در بهینه‌سازی ترکیبی مسائل پیچیده موفقیت‌آمیز نموده است. از کاربردهای این روش می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد. خدابخشی و همکاران (Khodabakhshi and et al) برای بهینه‌سازی عملکرد مخازن ذخیره آب از روش SA استفاده کردند. همچنین آنها نتایج SA را با مدل MODIS که یک مدل شناخته شده برای حل مسائل مخازن آب می‌باشد، مقایسه نمودند و مشخص شد که

SA مدل موثرتر و قویتری برای مسائل پیچیده مدیریت منابع آب می باشد [7].

لولو و همکاران (Lulu and et al) با استفاده از مدل SA انتقال آلودگی در خلل و فرج خاک را شبیه سازی نمودند. نتایج نشان داد که غلظت منابع آلوده کننده بر روی ضریب پراکندگی آلودگی می تواند موثر باشد [9].

از آنجا که کاهش حجم هسته سد به عنوان قسمت ناتراوا در اقتصادی نمودن طرح کمک می نماید. لذا تعیین هسته با ابعاد مناسب و بهینه که علاوه بر تامین خواسته ها و محدودیت ها دارای حداقل حجم باشد ضروری می باشد. برای یافتن طرح بهینه هسته رسی سدهای خاکی لازم است از یک روش بهینه یابی قدرتمند که توانایی در برگیری یک تابع هدف مرکب و قیود تعیین شده را داشته باشد استفاده نمود. بنابراین در این تحقیق یک مدل قدرتمند بهینه سازی براساس الگوریتم SA برای یافتن ابعاد هسته رسی سد خاکی حصار سنگی بیرجند در قسمت برنامه نویسی نرم افزار MATLAB توسعه داده شده است.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- مطالعه موردی

سد تغذیه ای - ذخیره ای حصار سنگی شهرستان بیرجند با ظرفیت ذخیره سازی دو میلیارد متر مکعب آب در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال شهر بیرجند و در پنج کیلومتری بالادست روستای حصار سنگی و بر روی رودخانه دهنه واقع شده است که، یک سد خاکی با هسته رسی قائم می باشد. شکل (۱) موقعیت سد را نشان می دهد. مشخصات مصالح سد و هندسه آن در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است [2].



شکل (۱): موقعیت سد حصار سنگی

جدول (۱): مشخصات مصالح بدنه و هسته سد حصار سنگی

پارامترها	پوسته	هسته
$\emptyset$	۴۰	۳۰
$\gamma \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	۲۲۶۰	۲۰۸۰
$\gamma_w \left( \frac{kg}{m^3} \right)$	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
$c'$	۰/۰۵	۰/۳
$K(m/year)$	۱۸۲/۲۸	۰/۰۶

جدول (۲): مشخصات هندسه سد حصار سنگی

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

شیب بالادست و پایین دست سد و هسته سد یکسان می باشد.

### ۲-۲- مبانی تئوری روش الگوریتم شبیه سازی تبرید (SA)

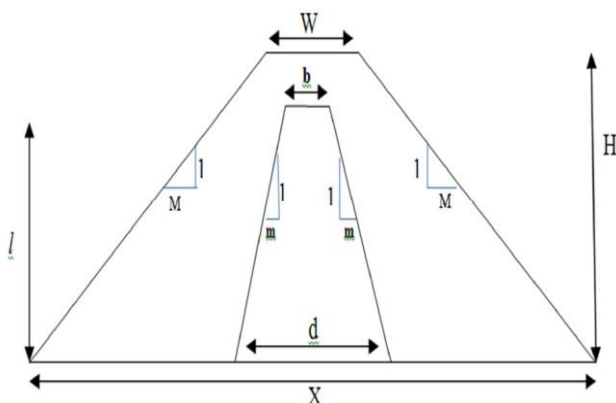
پایه گذاری روش SA با استفاده از شبیه سازی مسائل بهینه سازی ترکیبی با فرایند فیزیکی تبرید و با کمک الگوریتم متروپولیس (Metropolis) توسط کرک پاتریک (Kirkpatrick) و همکاران انجام شده. در این شبیه سازی تابع هدف معادل سطح انرژی جسم است که هدف بهینه کردن آن می باشد. هر گزینه از متغیرهای تصمیم گیری به طور تصادفی تعیین می شود و معادل است با چگونگی قرار گرفتن اتم های جسم در کنار یکدیگر و بالاخره تشکیل کریستال کامل در دمای نهائی با حداقل انرژی که، پاسخ بهینه مساله خواهد بود. در این شبیه سازی دمای T مفهوم فیزیکی اصلی را ندارد و یک پارامتر کنترلی محسوب می شود [8].

### ۲-۳- الگوریتم SA

یک نقطه به عنوان نقطه شروع در نظر گرفته می شود. همچنین بایستی دمای شروع و پایان نیز انتخاب شوند. سپس مقدار تابع در این نقطه مورد ارزیابی قرار می گیرد. بعد از آن با ایجاد یک تغییر تصادفی در نقطه جاری، یک نقطه در همسایگی آن تولید می شود و مقدار تابع در نقطه جدید نیز مورد ارزیابی

جدول (۳): محدوده تغییرات پارامترهای هندسی [1]

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



شکل (۲): نمونه‌ای از سدهای مدل سازی شده در نرم‌افزار

که در آن  $H$ : ارتفاع سد،  $L$ : تراز آب،  $X$ : عرض سد بر روی پی،  $d$ : عرض هسته بر روی پی،  $b$ : عرض تاج هسته،  $W$ : عرض تاج سد و  $m, M$  به ترتیب شیب پوسته و هسته سد می‌باشد.

نتایج بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS که توانای تجزیه و تحلیل‌های آماری تقریباً در همه زمینه‌ها، سرعت زیاد در تجزیه و تحلیل هر نوع داده، هماهنگی و امکان ارتباط با سایر نرم افزارها از جمله office را دارد انجام گردیده است. این برنامه قادر به انجام آنالیزهای آماری، ترسیم نمودار، ساخت مدل رگرسیونی نیز می‌باشد. به منظور معرفی این قیود به برنامه، مدل‌های ساده به روش رگرسیون خطی تهیه شده و محدوده مجاز برای هر کدام از قیود تعریف گردیده است. برای تأمین هدف مورد نظر، مدل لازم در محیط MATLAB 7.8 نوشته شده و با استفاده از الگوریتم SA مراحل بهینه‌سازی انجام گرفت.

برای توسعه مدل بهینه سازی ابعاد هسته رسی سد خاکی نیاز به تعیین تعدادی قید وجود دارد که سعی شده است در طراحی، قیودی در نظر گرفته شوند که نتایج بدست آمده‌ی سد بهینه تمام شرایط لازم یک سد واقعی را داشته باشد و بتواند

قرار می‌گیرد و سپس اختلاف در تابع هدف محاسبه می‌شود. در صورتی که میزان تابع هدف کاهش یافته باشد، وضعیت جدید مورد قبول است و در صورتی که دما کمتر از دمای نهایی باشد، مقدار آن با یک برنامه خنک کاری کاهش داده می‌شود و مجدداً یک نقطه جدید در نقاط جاری ایجاد می‌شود و الگوریتم ادامه می‌یابد [14].

ولی در صورتی که میزان تابع هدف افزایش یافته باشد باید احتمال پذیرش وضعیت جدید مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور پارامتر  $P_r = \exp\left(\frac{\Delta obj}{TK_B}\right)$  (اختلاف تابع هدف،  $K_B$  ثابت بلتزن،  $T$ : دما) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و با عدد تصادفی  $P'_r$  که یک عدد تصادفی بین (۰ و ۱) می‌باشد مقایسه می‌شود. در صورتی  $P_r > P'_r$  باشد وضعیت جدید مورد پذیرش قرار می‌گیرد و اگر  $P_r < P'_r$  سیستم به وضعیت قبلی بازگردانده می‌شود. مجدداً دما با دمای نهایی مقایسه شده و در صورتی که کمتر از دمای نهایی باشد الگوریتم ادامه می‌یابد و اگر به دمای نهایی رسیده باشد الگوریتم متوقف می‌شود [14].

#### ۲-۴- مدل سازی

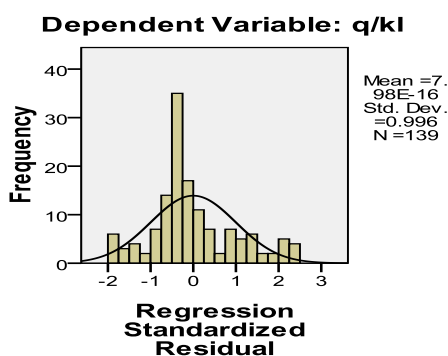
در مطالعه حاضر با توجه به کاربردهای الگوریتم SA در زمینه علوم آب و اهمیت دستیابی به یک هندسه بهینه برای هسته سد خاکی، قیدهای مانند تراوش از بدنه، گرا دیان هیدرولیکی و ضریب اطمینان پایداری شیروانی‌ها در نظر گرفته شده است. برای معرفی این قیود به برنامه ۱۵۰ مقطع سد با ابعاد و مصالح فرضی بر روی یک بستر نفوذناپذیر با استفاده از بسته نرم افزاری Geo-studio که از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود بوده که برای مدل‌سازی قیده‌ها مورد نظر استفاده گردیده است. محاسبات برای شرایط بحرانی نشت دائم انجام شد و در تمام مقاطع تراز سطح آب بسته به ارتفاع سد بین ۱ الی ۴ متر زیر تاج در نظر گرفته شده است. محدوده تغییرات ابعاد هندسه سد در جدول (۳) ارائه شده است. نحوه ترکیب ابعاد به صورت تصادفی بوده و مشخصات بدنه این سدها براساس مصالح منابع قرصه مربوط به چندین سد خاکی اجرا شده می‌باشد. در شکل (۲) نمونه‌ای از سدهای مدل شده در نرم‌افزار ارائه گردیده است.

( و انحراف معیار نزدیک به یک است که می توان گفت خطاها دارای توزیع نرمال استاندارد هستند. با توجه به این نکته که چون در سدهای خاکی غیرهمگن پوسته سد نسبت به هسته بسیار نفوذپذیر است می توان آن را در برابر هسته نادیده گرفت و چنان تصور کرد که هسته سد خود سد همگنی است [1]. آنگاه کلیه ابعاد و مقادیر براساس ابعاد و مصالح هسته در نظر گرفته شده و چنان تصور شد که هسته سد خود، سد همگن بدون زهکش افقی و بدون پنجه سنگی بوده و کلیه ابعاد برای تهیه مدل تراوش براساس ابعاد هسته در نظر گرفته شده است.

$$q = (2.167 - 0.958 \frac{d}{h}) \times k \times l \quad (1)$$

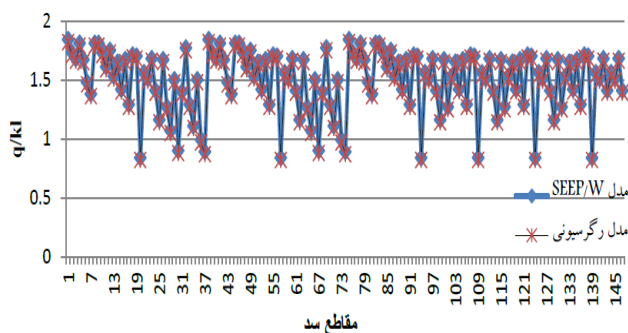
که  $q$ : دبی عبوری در واحد طول سد ( $m^3/s.m$ )،  $k$ : ضریب نفوذپذیری هسته ( $m/s$ )،  $l$ : ارتفاع آب مخزن ( $m$ )،  $h$ : ارتفاع سد ( $m$ )

Histogram



شکل (۳): هیستوگرام متغیرهای وابسته

به منظور ارزیابی مدل تهیه شده و مقایسه عملکرد نتایج مدل رگرسیونی با مدل کامپیوتری seep/w، ۱۴۵ مقطع بطور جداگانه طراحی شده و ضریب اطمینان پایداری آنها یک مرتبه با استفاده از مدل seep/w و یک مرتبه دیگر هم با استفاده از مدل رگرسیونی محاسبه شدند. نتایج محاسبات به صورت شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار تغییرات  $q/kl$  در مقاطع مختلف

بعنوان یک طرح اولیه و کامل مورد استفاده عملی قرار گیرد. بدین منظور قیودی از قبیل قید پایداری، گرادیان هیدرولیکی و تراوش در نظر گرفته شده اند که این قیود با استفاده از مدل سازی بدست می آید که در زیر به آن اشاره گردیده است:

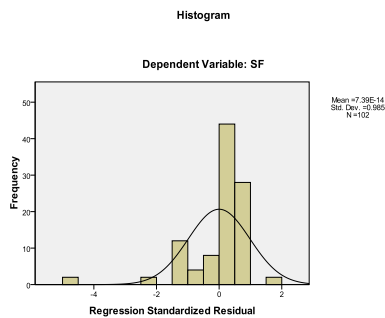
برای تحلیل دقیق جریان در محیط های بدنه سدهای خاکی و برآورد میزان تراوش در آن از شبکه جریان استفاده می شود. بطور معمول تهیه و ترسیم شبکه جریان یک پروسه وقت گیر، دقیق و پرهزینه ای را شامل شده و در صورت هر گونه تغییر در مقطع و مصالح سد خاکی این پروسه بایستی تکرار گردد. لذا در این مطالعه برای تخمین اولیه میزان تراوش یک مدل ریاضی تهیه شده است که می توان به آسانی و بدون استفاده از شبکه جریان مقدار تراوش از بدنه سد را محاسبه نمود. عوامل موثر در تهیه مدل، ارتفاع آب بالادست، عرض هسته روی پی، ارتفاع سد و ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح هسته در نظر گرفته شده است.

#### ۱. مدل تراوش

به منظور محاسبه تراوش از بدنه سدهای خاکی و معرفی آن به عنوان قید در طرح مسئله بهینه سازی از یک مدل رگرسیونی استفاده شده است. این مدل براساس مقادیر تراوش محاسبه شده از ۱۵۰ مقطع سد با هندسه و مصالح مختلف فرضی توسط نرم افزار SEEP/W که در واقع یک مدل کامپیوتری دو بعدی براساس آنالیز عددی است که می تواند در شرایط پایدار به شبیه سازی پدیده تراوش بپردازد بدست آمده است. این مدل در واقع حل عددی معادله لاپلاس براساس تئوری المان محدود را ارائه داده است برای تحلیل تراوش با نرم افزار مذکور، از المان های مستطیلی ۴ گرهی و مثلثی ۳ گرهی استفاده شده است. شرایط مرزی اول مربوط به نقاط بالادست سد است که زیر بار آب قرار گرفته اند، به این نقاط مقادیری از بار کلی برابر با ارتفاع آب پشت سد تعلق گرفت و شرایط مرزی دوم مربوط به نقاط پایین دست سد است که به این نقاط بار آبی صفر تعلق می گیرد. تجزیه و تحلیل بر روی داده های تولید شده با استفاده از نرم افزار SPSS تهیه شده است. معادله (۱) با ضریب همبستگی ۰/۹۳ و خطای معیار ۰/۰۶۷ بدست آمده است. شکل (۳) نشان دهنده هیستوگرام متغیرها و مقایسه آن با منحنی نرمال است، با مقایسه توزیع فراوانی خطاها و نمودار توزیع نرمال مشاهده می شود که توزیع خطاها تقریباً نرمال است، پس می توان از معادله رگرسیون ارائه شده استفاده کرد. همچنین مقدار میانگین ارائه شده در سمت راست نمودار بسیار کوچک ( نزدیک به صفر

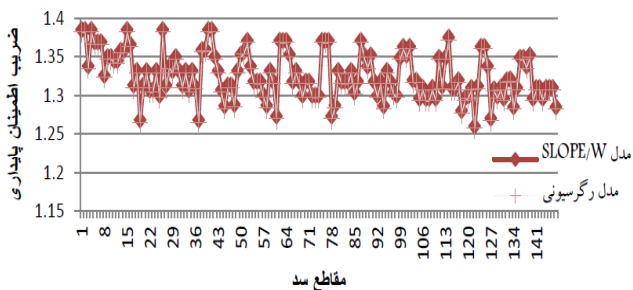
$$SF = 0.354 + 1.548 \tan \phi + 0.033 \frac{d}{x} + 2.194 \frac{c'}{\gamma h} \quad (2)$$

که  $SF$  : ضریب پایداری،  $\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی موثر مصالح،  $d$ : عرض قاعده هسته روی پی (m)،  $x$ : عرض سد روی پی (m)،  $c'$ : چسبندگی موثر مصالح ( $\text{kg/cm}^2$ )،  $h$ : ارتفاع سد (m) و  $\gamma$ : وزن مخصوص مصالح ( $\text{kg/m}^3$ ) می باشد.



شکل (۵): هیستوگرام متغیرهای وابسته

به منظور ارزیابی مدل تهیه شده و مقایسه عملکرد نتایج مدل رگرسیونی با مدل کامپیوتری slope/w، ۱۴۵ مقطع بطور جداگانه طراحی شده و ضریب اطمینان پایداری آنها یک مرتبه با استفاده از مدل slope/w و یک مرتبه دیگر هم با استفاده از مدل رگرسیونی محاسبه شدند. نتایج محاسبات به صورت شکل (۶) در مقابل یکدیگر نشان داده شده است.



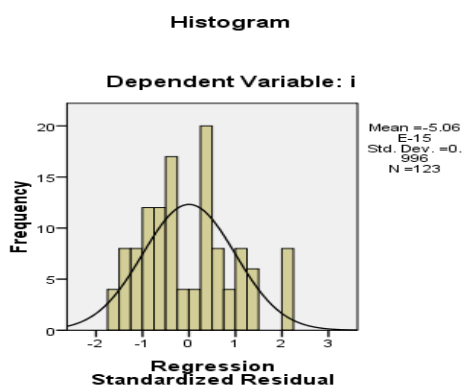
شکل (۶): نمودار تغییرات ضریب پایداری در مقاطع مختلف

یکی از موارد مهم دیگر که در حین طراحی سدهای خاکی مورد نظر طراحان و متخصصین امر قرار می گیرد مسئله گرادیان هیدرولیکی جریان عبوری از بدنه سد می باشد. بطوریکه چنانچه گرادیان هیدرولیکی از مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی آن بیشتر شود نیروی بین ذرات خاک کاهش یافته و خاک شروع به حرکت می کند و در واقع ذرات خاک مانند مایعات عمل می کنند، بتدریج سرعت حرکت آب بیشتر شده و ذرات بیشتری شسته و به خارج حمل می شوند که نتیجه تونل ایجاد شده بزرگ و بزرگتر شده، فرسایش داخلی گسترش یافته و در نهایت سبب تخریب سد خاکی می شود. در این جا برای تخمین گرادیان

یکی از عوامل مهم که در طراحی سدهای خاکی باید مورد بررسی قرار گیرد پایداری شیروانی سدهای خاکی در شرایط بحرانی می باشد. برای مدل بندی ضریب اطمینان پایداری، پارامترهای ( $\phi, c$ ) مصالح خاکی، ارتفاع سد، عرض هسته روی پی، عرض تاج هسته، عرض سد روی پی و شیب پایین دست در نظر گرفته شده است. در این جا پایداری استاتیکی سدهای خاکی تحت شرایط تراوش دائم با استفاده از روش تعادل حدی مورد بررسی قرار گرفته است.

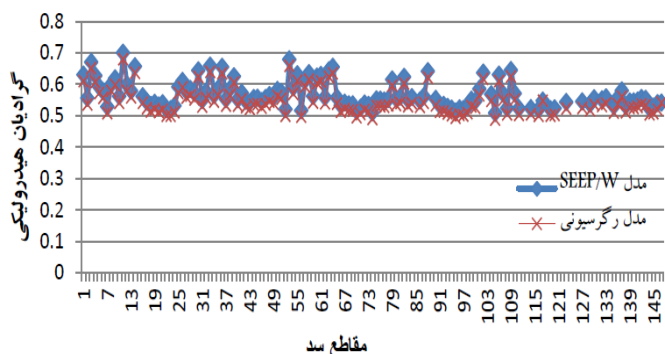
## ۲. مدل پایداری شیروانی

به منظور محاسبه ضریب پایداری شیروانی های سد و معرفی آن به عنوان قید در طرح بهینه سازی از مدل رگرسیونی استفاده شده است. مدل موجود بر اساس ضرایب اطمینان محاسبه شده برای ۱۵۰ مقطع سد توسط نرم افزار SLOPE/W که بر خلاف سایر بخش های بسته ی نرم افزاری Geo Studio از روش اجزای محدود استفاده نمی کند شامل مجموعه ای از روش های ترسیمی برای آنالیز پایداری شیب های خاکی است. این فرآیند از طریق روش های تعادل حدی انجام می شود Slope/W همچنین قابلیت تحلیل پایداری با اکثر روش های مربوط به تعادل حدی از جمله روش مورگان اشترن و پرایس و بیشاپ را داراست. از مهم ترین مزایای دیگر این نرم افزار امکان مدل سازی مستقیم اکثر مسلح کننده های رایج از قبیل ژئو فابریک ها، مهارها و نیلینگ ها برای بالا بردن ایمنی شیب هاست. این نرم افزار همچنین سازگاری بسیار مناسبی با سایر نرم افزارهای مرتبط برای انجام یک سلسله مدل سازی برای نیل به اهداف پژوهش را داراست. برای تحلیل پایداری با نرم افزار مذکور، از المان های مستطیلی ۴ گرهی و مثلی ۳ گرهی استفاده شده است. سپس بار آبی بالادست و پایین دست به عنوان شرایط مرزی تعیین گردید. تجزیه تحلیل بر روی داده های تولید شده با استفاده از نرم افزار SPSS تهیه شده است. معادله (۲) با ضریب همبستگی ۰/۹۰۹ و خطای معیار ۰/۰۰۹۸ بدست آمده است. شکل (۵) نشان دهنده هیستوگرام متغیرها و مقایسه آن با منحنی نرمال است، با مقایسه توزیع فراوانی خطاها و نمودار توزیع نرمال مشاهده می شود که توزیع خطاها تقریباً نرمال است، پس می توان از معادله رگرسیون ارائه شده استفاده کرد. همچنین مقدار میانگین ارائه شده در سمت راست نمودار بسیار کوچک ( نزدیک به صفر ) و انحراف معیار نزدیک به یک است که می توان گفت خطاها دارای توزیع نرمال استاندارد هستند.



شکل (۷): نشان دهنده هیستوگرام متغیرها

به منظور ارزیابی مدل تهیه شده و مقایسه عملکرد نتایج مدل رگرسیونی با مدل کامپیوتری seep/w، ۱۴۵ مقطع بطور جداگانه طراحی شده و ضریب اطمینان پایداری آنها یک مرتبه با استفاده از مدل seep/w و یک مرتبه دیگر هم با استفاده از مدل رگرسیونی محاسبه شدند. نتایج محاسبات به صورت شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار تغییرات گرادینان هیدرولیکی در مقاطع مختلف

در شکل (۹) مراحل کلی فرآیند مدل سازی و بهینه سازی نشان داده شده است.

هیدرولیکی سدهای خاکی با هسته مرکزی یک مدل ریاضی جدید تهیه شده است که از دقت کافی برای انجام این عمل برخوردار می باشد.

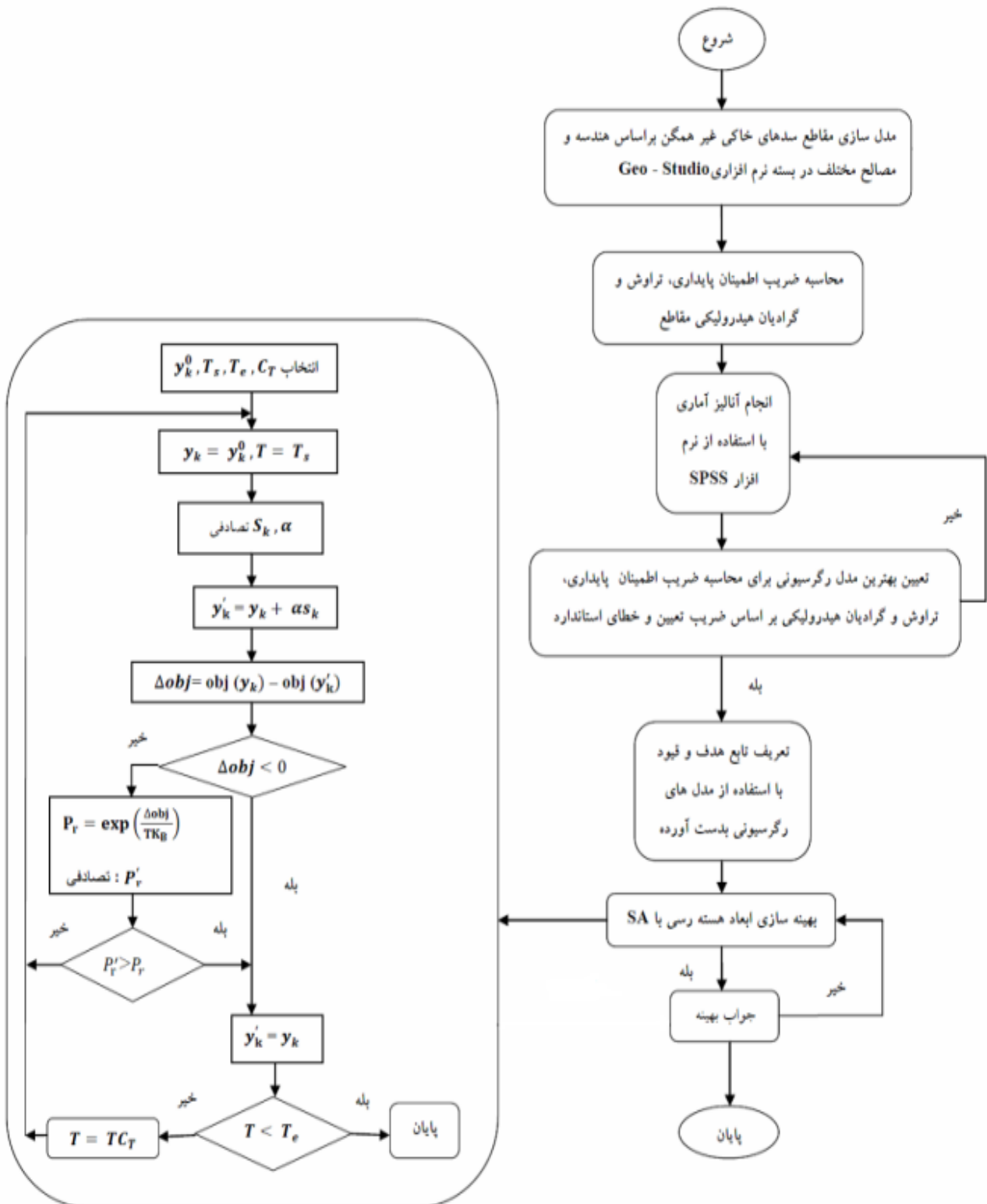
### ۳. مدل گرادینان هیدرولیکی

معادله گرادینان هیدرولیکی محاسبه شده برای ۱۵۰ مقطع سد توسط نرم افزار SEEP/W و تجزیه تحلیل بر روی داده های تولید شده با استفاده از نرم افزار SPSS تهیه شده است. این معادله با ضریب همبستگی ۰/۹۲ و خطای معیار ۰/۰۰۹۸ بدست آمده است. شکل (۷) نشان دهنده هیستوگرام متغیرها و مقایسه آن با منحنی نرمال است، با مقایسه توزیع فراوانی خطاها و نمودار توزیع نرمال مشاهده می شود که توزیع خطاها تقریباً نرمال است، پس می توان از معادله رگرسیون ارائه شده استفاده کرد. همچنین مقدار میانگین ارائه شده در سمت راست نمودار بسیار کوچک ( نزدیک به صفر ) و انحراف معیار نزدیک به یک است که می توان گفت خطاها دارای توزیع نرمال استاندارد هستند. در تهیه این مدل دو فرض وجود دارد: بر اساس فرض اول محاسبات بر روی مدل هسته به عنوان یک سد خاکی همگن انجام می شود و در فرض دوم خط نشت بصورت مستقیم در نظر گرفته می شود. هر چند در نظر گرفتن فرض دوم ممکن است در محاسبه طول خط نشت و شیب هیدرولیکی مقداری خطا ایجاد کند ولی به علت اینکه محاسبه طول واقعی خط نشت کار مشکلی بوده و براحتی قابل محاسبه نمی باشد می توان از مقدار خطای ایجاد شده که با توجه به بررسی های انجام گرفته مقدار جزئی است چشم پوشی کرد.

$$i = 0.76 - 1.625 \frac{l}{s} \quad (3)$$

$$s = (l^2 + (d * l - 0.35(d - b).l)^2)^{0.5} \quad (4)$$

که  $s$ : طول خط نشت (m)،  $b$ : عرض تاج هسته (m) و  $i$ : گرادینان هیدرولیکی می باشد.



شکل (۹): مراحل فرآیند مدل سازی و بهینه سازی



برای حداقل کردن حجم مصالح هسته و تامین پایداری آن با توجه به هندسه سد می توان از تابع زیر استفاده نمود با توجه به اینکه قید پایداری تابعی از پارامترهای بدنه سد می باشد، لذا علاوه بر بهینه نمودن ابعاد هسته، شیب مناسب برای وجوه سد بدست می آید.

$$F = \frac{1}{2}[(x_3 + w) \times h] - \frac{1}{2}[(x_2 + x_1) \times h] \quad (5)$$

که در آن  $F$ : حجم مصالح خاکی ( $m^3/m$ )،  $h$ : ارتفاع سد ( $m$ ) و  $w$ : عرض تاج سد ( $m$ ) می باشد.

۲- میزان تراوش از بدنه سد

برای حداقل نمودن میزان تراوش از بدنه سد معادله (۱)، به صورت معادله زیر به عنوان یک تابع هدف وارد مسئله شده است و مقدار آن محاسبه می شود.

$$q = \left( 2.167 - 0.958 \frac{x_2}{h} \right) \times k \times l \quad (6)$$

### ۳-۳- قیود طراحی

۱- قید ضریب اطمینان پایداری در شرایط تراوش پایدار که حداقل مقدار آن برای پایداری استاتیکی سدهای خاکی ۱/۵ می باشد [12].

$$SF \geq 1.5$$

۲- قید گرادیان هیدرولیکی که مقدار آن باید کمتر از مقدار بحرانی باشد. در اینجا به علت اینکه مقدار گرادیان هیدرولیکی بحرانی محاسبه شده برای مصالح نمونه برابر ۱ بود، این قید به صورت زیر تعریف گردیده است.

$$i = 0.76 - 1.625 \frac{l}{s} \leq i_{cr} \quad (7)$$

### ۴- نتایج و بحث

در این تحقیق، ابتدا مدل های رگرسیونی جدید برای محاسبه متغیرهای طراحی شامل: تراوش (معادله شماره ۱)، ضریب اطمینان پایداری (معادله شماره ۲) و گرادیان هیدرولیکی (معادله شماره ۳) تهیه گردید. پس از تعیین متغیرهای طراحی و همچنین توابع هدف، کدنویسی برای تعیین ابعاد بهینه هسته سدهای خاکی در محیط MATLAB 7.8 انجام گردید. این برنامه یک مدل تلفیقی از مدل های رگرسیون خطی جدید و الگوریتم SA می باشد.

که  $C_T$ : ضریب کاهش دما،  $T_e$ : دمای نهایی،  $T_s$ : دمای شروع و  $V_k$ : نقطه شروع می باشد.

### ۳- بهینه سازی هسته رسی

به منظور حداقل سازی حجم هسته رسی سدهای خاکی و میزان تراوش از بدنه آن با در نظر گرفتن قیدهای ذکر شده، مدل آن در محیط MATLAB 7.8 تهیه شده است که با استفاده از الگوریتم SA عمل بهینه سازی را انجام می دهد. در حین اجرای این عمل، ضریب اطمینان پایداری سد و گرادیان هیدرولیکی مجاز قیدهای مسئله مورد بررسی قرار می گیرند. این مدل دارای سه متغیر طراحی عرض هسته در تاج، عرض هسته روی پی و عرض سد روی پی می باشد. این مدل بدین گونه عمل می کند که پس از هر بار معرفی مقدار متغیرهای پارامتری و محاسبه قیود طرح، مقدار متغیرهای طراحی بهینه را محاسبه می کند. اساس بهینه یابی ها برای سدهای خاکی با هسته مرکزی قائم می باشد.

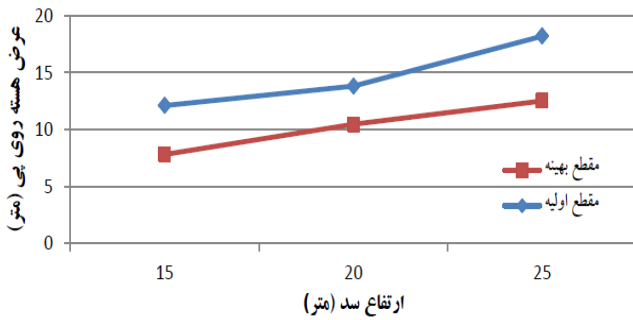
### ۳-۱- متغیرهای طراحی

به طور کلی در طراحی مقطع سدهای خاکی دو نوع متغیر موجود می باشد. اول، متغیرهای محیطی که وابسته به محل اجرای طرح می باشند مانند منابع قرضه و خصوصیات مصالح که در اینجا به صورت متغیرهای پارامتری در برنامه تعریف شده اند و دیگری متغیرهای هندسی مقطع سد که بعضی از آنها مانند زاویه محور هسته ثابت بوده و بعضی دیگر مانند ارتفاع و عرض تاج سد به عنوان متغیرهای پارامتری تعریف شده و تعدادی دیگر به عنوان متغیرهای طراحی در تابع هدف ادغام شده اند. بردار متغیرهای طراحی (متغیرهای تصمیم،  $X: \{X_1, X_2, X_3\}$ ) شامل  $X_1$  (عرض تاج هسته)،  $X_2$  (عرض قاعده هسته روی پی)،  $X_3$  (عرض سد روی پی) می باشند. همچنین با توجه به مطالب فوق متغیرهای محیطی و برخی متغیرهای هندسی مانند چسبندگی موثر مصالح، زاویه اصطکاک داخلی موثر مصالح، حداکثر دانسیته خشک مصالح پوسته، ضریب نفوذپذیری مصالح هسته،  $h$  (ارتفاع کل سد، ارتفاع طراحی)،  $l$  (ارتفاع آب بالادست سد)،  $w$  (عرض تاج سد) بصورت متغیرهای پارامتری وارد مدل شده و مقادیر بهینه متغیرهای طراحی محاسبه می گردد.

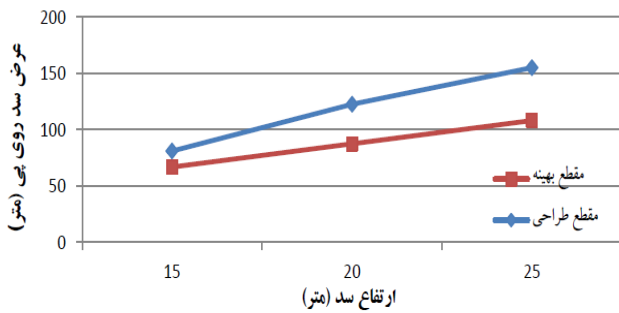
### ۳-۲- توابع هدف

در این مطالعه دو تابع هدف به شرح زیر مطرح می باشد.

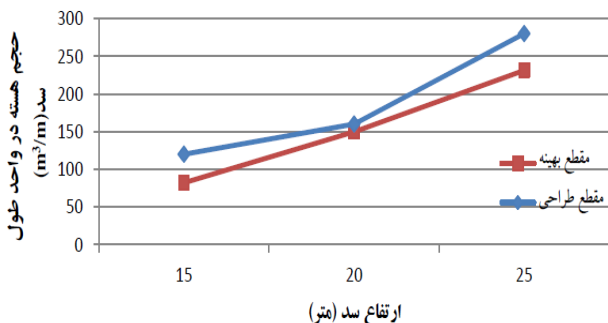
۱- حجم مصالح خاکی در واحد طول سد



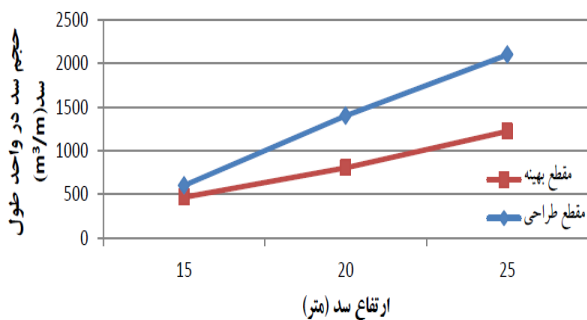
شکل (۱۰): مقایسه عرض هسته روی پی در مقطع بهینه و طراحی مهندسی



شکل (۱۱): مقایسه عرض سد روی پی در مقطع بهینه و طراحی مهندسی



شکل (۱۲): مقایسه حجم هسته در مقطع بهینه و طراحی مهندسی



شکل (۱۳): مقایسه حجم سد در مقطع بهینه و طراحی مهندسی

به منظور اجرای برنامه از مشخصات مصالح بدنه سد و یک سری از پارامترهای معلوم مانند ارتفاع و عرض تاج سد استفاده شده است. نتایج بدست آمده از اجرای برنامه بهینه سازی ابعاد هسته رسی این سد در مقایسه با ابعاد واقعی هسته رسی آن در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴): مقایسه نتایج بهینه بدست آمده برای سد حصار سنگی با ابعاد واقعی آن

ابعاد واقعی هسته رسی	ابعاد بهینه هسته رسی	
۴	۳/۱	عرض فوقانی هسته (متر)
۹/۸	۷/۸	عرض هسته روی پی (متر)
۱:۲/۵	۱:۲	شیب وجوه سد
۱:۰/۲۱	۱:۰/۱۵	شیب وجوه هسته
۷۵	۶۶/۸	عرض سد روی پی (متر)
-	۰/۴۶	گرادیان هیدرولیکی
-	۱/۶۹	ضریب پایداری
-	۱/۳	تراوش (m³/year.m)

برای نمونه مقادیر واقعی عرض فوقانی هسته و عرض هسته روی پی بترتیب از ۴ متر و ۹/۸ متر به ۳/۱ متر و ۷/۸ متر در مدل بهینه سازی کاهش داشته است. که این واقعیت نشان دهنده کاهش حجم مصالح مورد نیاز جهت ساخت هسته سد در حدود ۲۱٪ و پوسته سد در حدود ۸٪ می باشد.

#### ۴-۱- ارزیابی مدل

##### ۴-۱-۱- بررسی عملکرد مدل

به منظور عملکرد مدل در تعیین ابعاد بهینه اولیه هسته رسی نسبت به طراحی مقطع هسته بر اساس نظر مهندسی، ابعاد مقطع سد خاکی غیرهمگن برای سه ارتفاع ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر یکبار بر اساس نظر مهندسی و یکبار دیگر به وسیله مدل MATLAB محاسبه شده است. نتایج محاسبات هر دو طراحی در اشکال (۱۰) تا (۱۳) نشان داده شده است.

### معرفی پارامترهای فرمول‌ها

- $q$ : دبی عبوری در واحد طول سد ( $m^3/s.m$ )  
 $k$ : ضریب نفوذپذیری هسته ( $m/s$ )  
 $l$ : ارتفاع آب مخزن ( $m$ )  
 $h$ : ارتفاع سد ( $m$ )  
 $d$ : عرض قاعده هسته ( $m$ )  
 $SF$ : ضریب پایداری  
 $\theta$ : زاویه اصطکاک داخلی موثر مصالح  
 $\alpha$ : عرض سد روی پی ( $m$ )  
 $c'$ : چسبندگی موثر مصالح ( $kg/cm^2$ )  
 $\gamma$ : وزن مخصوص مصالح ( $kg/m^3$ )  
 $s$ : طول خط نشت ( $m$ )  
 $b$ : عرض تاج هسته ( $m$ )  
 $i$ : گرادیان هیدرولیکی  
 $F$ : حجم مصالح خاکی ( $m^3/m$ )  
 $w$ : عرض تاج سد ( $m$ )

همانطور که مشاهده می‌شود ابعاد و احجام بدست آمده از طراحی با استفاده از مدل کمتر از مقادیر آنها در طراحی مهندسی می‌باشد.

### ۴-۱-۲- بررسی دقت مدل

به منظور بررسی دقت مدل مقادیر ضریب اطمینان پایداری، گرادیان هیدرولیکی و میزان تراوش محاسبه شده از برنامه با مقادیر مشابه بدست آمده از اجرای مستقیم مدل‌های نرم‌افزاری، برای چند مقطع سد با ارتفاع‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر مورد مقایسه قرار گرفت جدول (۵). همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر محاسبه شده از اجرای برنامه و اجرای مدل‌های نرم‌افزاری Geo-studio برای مقاطع سد با ارتفاع‌های مختلف، دارای همبستگی بالا در حدود ۰/۹۷ می‌باشد و اختلاف قابل توجهی بین آنها وجود ندارد.

جدول (۵): مقادیر پارامترهای ضریب اطمینان پایداری، گرادیان هیدرولیکی و میزان تراوش محاسبه شده از برنامه MATLAB و مدل‌های نرم‌افزاری Geo-studio برای چند مقطع سد خاکی حصار سنگی

### ۵- مراجع

- [۱] رحیمی، حسن، "سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۹.
- [۲] شقاقیان، م، " طرح بهینه هسته های رسی در سدهای خاکی با استفاده از الگوریتم های ژنتیکی"، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۲.
- [۳] Abdul Hussain, I.; Deepak Kashyap, A. and Hari Prasad. K. S., "Seepage Modeling Assisted Optimal Design of a Homogeneous Earth Dam Procedure Evolution. J. Irrigation and Drainage Engineering", pp. 133- 116, 2007.
- [۴] Akyuz, A. and Merdun, H., "Seepage through an Earth Dam on Impervious Base with Hele-Shaw", Viscous Liquid Physical Model. EJGE, 2003.
- [۵] Goldin, A. L. And Rasskazove, L. N., "Design of earth dams", A.A.Balkema, Netherlands, 1992.
- [۶] Hitoshi, F.; Hideaki, H.; Eiichi, W.; Taro, T. and Hiroyuki, M., "Application of Genetic Algorithm to Aesthetic Design of Dam Structures", J. Advances in Engineering software, pp. 185- 195, 1996.
- [۷] Khodabakhshi, F.; Ghirian, A. R. and Khakzad,

ارتفاع سد (متر)	گرادیان هیدرولیکی	تراوش ( $m^3/year.m$ )	ضریب پایداری
۱۵	۰/۵	۱/۳	۱/۶۹
	برنامه SA در	۱/۳	۱/۶۹
	MATLAB		
۲۰	۰/۵۶	۱/۸۲	۱/۶۸
	برنامه SA در	۱/۸	۱/۶۸
	MATLAB		
۲۵	۰/۶۰	۲/۳۳	۱/۶۸
	برنامه SA در	۲/۳	۱/۶۹
	MATLAB		

- U.S. Army Corps of Engineering, "Engineering and Design Stability of earth and rock fill dams", Department of the Army, Engineer Manual EM, pp. 1110- 1902, 2003. [۱۲]
- Wei, G., "Seepage Parameters Back Analysis for Dam Foundation Based on Bionic Algorithms", Proceeding of the International Conference on Dam Engineering, pp. 369- 376, 2004. [۱۳]
- Zegordi, S. L., "Simulated Annealing Scheme Incorporating Move Desirability Table For Solution of Facility Layout Problem", J. Operation Research of Japan, pp. 1- 20, 1995. [۱۴]
- N., "Applying Simulated Annealing For Optimal Operation of Multi-Reservoir Systems", American Journal of Engineering Applied Science. pp. 80- 87, 2009. [۸]
- Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.; D Jr and Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing. Science", pp. 671- 680, 1983.
- Lulu, L.; Chang, W.; Fanbo, M.; Hongyan, A. and Yilin, W., "Numerical Simulation of Contaminant Transport in Porous Soil", 4th International conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE), pp. 1- 4, 2010. [۹]
- Nazari Giglou, A. and Zeraatparvar, A., "Seepage Estimation through Earth Dams", Basic and Applied Scientific Research. 2(8), pp. 7861- 7865, 2012. [۱۰]
- Singh, B. and Varshney, R. S., "Engineering for Embankment Dams", A.A. Balkema publishers, Brockfield, USA, 1995. [۱۱]