

طرح شکل بهینه‌ی سدهای دوقوسی بتنی با سه روش تقریبی

محمد رضایی پژند، بهروز احمدی ندوشن، خسرو خالقی

۱- استاد دانشگاه فردوسی مشهد سازه

۲- استادیار دانشگاه یزد سازه

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مشهد

mrpajand@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۲۱

چکیده- سد قوسی یکی از سازه‌های بتنی پرکاربرد و مفید است. طرح بهینه‌ی شکل این گونه سدها کمک شایانی به بهره‌وری مطلوب از ظرفیت سازه و مصالح می‌کند. این پژوهش یک الگوی هندسی مناسب و روشی کارا برای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی پیشنهاد می‌کند. افزون بر وارد کردن تمامی محدودیت‌های هندسی و رفتاری سازه در رابطه سازی، کمترین حجم سد حساب می‌شود. از الگوی سد دوقوسی سهمی‌گونه برای هندسه‌ی سازه بهره‌جویی خواهد شد. بهینه‌سازی شکل سدهای دوقوسی بتنی با سه روش تقریبی انجام می‌پذیرد. تجربه‌های عددی این مقاله نشان می‌دهد که با وجود به کاربردن متغیرهای طراحی بیشتر، می‌توان با روش پیشنهادی حجم سازه‌ی کمتری نتیجه گرفت و زمان تحلیل را کاهش داد.

کلید واژگان: بهینه‌سازی شکل، سد دوقوسی، برنامه‌ریزی درجه دوم پایه‌ی، جهت پذیرفتی.

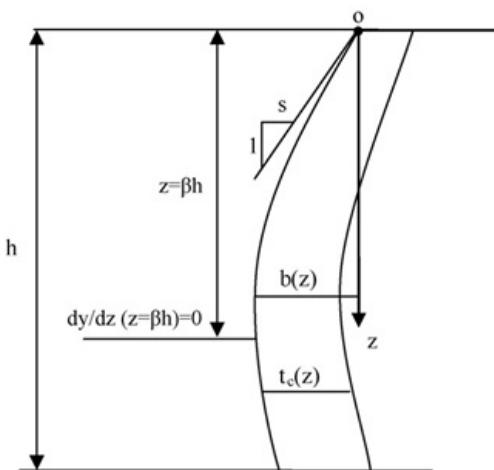
خواسته‌های تحلیل‌گر انجام می‌گرفت [۲]؛ اولین فردی که طرح بهینه‌ی سدهای قوسی را با برنامه‌ریزی ریاضی پیدا کرد [۳] شارپ بود. بیشترین پژوهش‌ها در این زمینه، به وسیله‌ی بوفانگ و همکارانش در چین و در دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی انجام شد [۴]. بر پایه‌ی پژوهش‌های بوفانگ، یک برنامه‌ی رایانه‌ای تحلیل و بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی به نام ADASO توسعه یافت [۵]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی درباره‌ی تحلیل این سازه‌ها انجام شده است، و روش‌های شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و سیستم فازی برای بهینه کردن سدهای قوسی به کاررفته‌اند [۶-۸]. همچنین، اکبری و همکاران یک روش کاربردی برای یافتن

۱- مقدمه
مهندسان در تحلیل‌های خود به دنبال راهی برای اقتصادی کردن طرح‌های خود می‌باشند. در این راستا، طرحی موفق‌تر است که با هزینه‌های کمتر، تمام شرط‌های خواسته شده را برقرار کند [۱]. در سازه‌های بزرگ، همچون سدهای قوسی بتنی، به دلیل هزینه‌های زیاد ساخت و پیچیدگی تحلیل و طراحی آن‌ها، بهره‌گیری از برنامه‌ریزی ریاضی برای رسیدن به بهترین و اقتصادی‌ترین طرح اهمیت دارد. در گذشته، طراحی سدهای قوسی برپایه‌ی آزمون و خطای صورت می‌گرفت؛ به سخن دیگر، طراحی سد با انتخاب یک شکل نخستین و اصلاح آن بر پایه‌ی شرط‌ها و

شود، به دو متغیر برای طرح بهینه آن نیاز خواهد بود. رابطه‌ی خم بالادست مقطع قائم مرکزی مانند زیر است [۷, ۶].

$$f(z) = b(z) = -sz + \frac{s}{2\beta h} z^2 \quad (1)$$

در این رابطه، z فاصله از تاج سد، h ارتفاع کل سد، s شیب خم در تاج سد و β ضریب ارتفاعی است که در آن شیب خم صفر می‌شود. این عامل‌ها در شکل (۱) به نمایش درآمده‌اند.



شکل ۱ طره‌ی قائم مرکزی

۲-۲- ضخامت طره‌ی مرکزی

برای تعیین ضخامت طره‌ی قائم مرکزی، ارتفاع سد به n بخش تقسیم می‌شود. در این صورت، $(n+1)$ تراز ارتفاعی به وجود می‌آید و ضخامت طره‌ی قائم مرکزی به وسیله‌ی رابطه‌ی زیر در دسترس قرار می‌گیرد [۸].

$$t_c(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times t_{ci} \quad (2)$$

در این جا، t_{ci} ضخامت مقطع قائم در تراز i است. همچنین، $L_i(z)$ تابع درون‌یاب لاغرانژ است که از رابطه

شکل بهینه‌ی سد ارائه کردند. ایشان از اسپیلاین‌های هرمیتی برای ایجاد بدنی سد بهره برند و با در نظر گرفتن بارهای ایستایی و پویایی و با استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی شکل سد را بهینه کردند [۹]. اکنون با افزایش تجربه‌ها، توسعه‌ی روش‌های تحلیلی واستفاده از ابزارهای رایانه‌ای بستر کار برای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی مناسب است.

در این مقاله، نخست الگوی هندسی سد دوقوسی تعریف می‌شود. سپس، راهکارهای تحلیل سد بررسی خواهد شد و به روش‌های تقریبی برای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی پرداخته می‌شود. همچنین، جدیدترین روش برنامه‌ریزی درجه دوم معرفی خواهد شد. در پایان، با بهینه‌سازی چند شکل سد قوسی، توانایی روش پیشنهادی نشان داده خواهد شد.

۲- الگوی هندسی سد دوقوسی

بهینه‌سازی سد دوقوسی به مقدار زیادی به نوع الگو و چگونگی انتخاب متغیرهای طراحی وابسته است [۱۰]. برای یافتن سد دوقوسی بهینه، درابتدا شکل مقطع قائم مرکزی و سپس، شکل مقطع افقی سد مشخص می‌شود. در این مقاله با تعیین خم سطح بالادست و ضخامت مقطع سازه، شکل سد قوسی پیدا می‌شود [۴].

۱-۲- شکل مقطع قائم مرکزی

به طور معمول، شکل مقطع قائم مرکزی برای تمامی الگوهای هندسی یکسان است، درحالی کلی، شکل خم بالادست در سدهای یک‌قوسی به صورت خط مستقیم انتخاب می‌شود؛ اما در سدهای دوقوسی شکل مقطع قائم در خم بالادست می‌تواند خم درجه دو یا سه باشد و اگر خم بالا دست طره‌ی قائم مرکزی از تابع درجه دو انتخاب

$$r_u(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times r_{ui} \quad (6)$$

$$r_d(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times r_{di} \quad (7)$$

بر پایه‌ی رابطه‌ی (۳)، تابع $L_i(z)$ یک تابع درونیاب لاگرانژ است. عامل‌های r_{ui} و r_{di} به ترتیب، مقدارهای r_u و r_d در تراز i ارتفاعی است.

۳- مسئله‌ی بهینه‌سازی سد قوسی

می‌توان از برنامه‌ریزی ناخطری برای بهینه‌سازی شکل سازه‌ها بهره گرفت. برای حل مسئله‌ی سد قوسی بتنی رابطه‌های زیر به کار می‌رود [۵, ۱].

$$C = f(x) \quad (8)$$

$$g_j(X) \leq 0; j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$h_k(X) = 0; k = 1, 2, \dots, l \quad (10)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u; i = 1, \dots, p \quad (11)$$

در رابطه‌های (۸) تا (۱۱)، X بردار متغیرهای طرح، C تابع هدف، $g_j(X)$ محدودیت نابرابری، $h_k(X)$ محدودیت برابری و x_i^l و x_i^u به ترتیب، مقدارهای کمینه و بیشینه متغیرهای طراحی است. شمار محدودیت‌های نابرابری، محدودیت‌های برابری و متغیرهای طراحی به ترتیب، با p نشان داده می‌شوند.

۴- متغیرهای طراحی بهینه‌سازی

هر طرحی به تعدادی از عامل‌های مستقل، که متغیر نام دارند، بستگی دارد. به ازای هر مقدار از متغیرهای طراحی، یک طرح به دست می‌آید. طرحی کارا یا پذیرفتی است که با کلیه‌ی محدودیت‌های مسئله سازگار باشد و تابع هدف را کمینه کند. باید دانست در مسئله بهینه‌سازی سد قوسی، متغیرهای طراحی عامل‌های تعیین کننده‌ی هندسه سازه

زیر به دست می‌آید:

$$L_i(z) = \frac{\prod_{k=1}^{n+1} (z - z_k)}{\prod_{k=1}^{n+1} (z_i - z_k)}, k \neq i \quad (3)$$

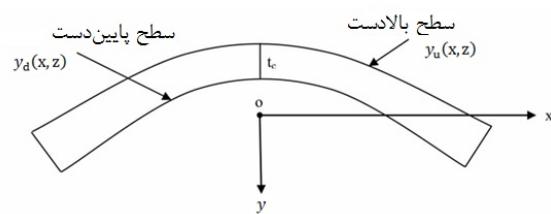
در رابطه‌ی کنونی، z_k ارتفاع تراز k است.

۳-۲- شکل مقطع افقی سد قوسی

با معرفی مقطع‌های افقی و قائم، هندسه‌ی سد به‌طور کامل تعریف می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، مقطع‌های قائم شکل‌های یکسانی دارند. بر پایه‌ی الگوی مقطع افقی، متغیرهای طراحی مسئله‌ی بهینه‌سازی سد قوسی تعیین می‌شود. در این پژوهش، برای تعیین شکل مقطع افقی سازه، از الگوی سد دوقوسی سهمی‌گونه استفاده خواهد شد. در این الگوسازی، مقطع‌های افقی از دو گونه سهمی متفاوت تشکیل می‌شود. با بهره‌جوبی از شکل (۲)، می‌توان یک رابطه برای سطح بالادست و دیگری برای سطح پایین-دست نوشت [۷, ۶].

$$y_u(x, z) = \frac{1}{2r_u(z)} x^2 + b(z) \quad (4)$$

$$y_d(x, z) = \frac{1}{2r_d(z)} x^2 + b(z) + t_c(z) \quad (5)$$



شکل ۲ مقطع افقی سد دوقوسی سهمی‌گونه

در رابطه‌های کنونی، $(z) r_u(z)$ و $(z) r_d(z)$ ، به ترتیب، شعاع قوس سطح بالادست و شعاع قوس سطح پایین‌دست است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

برای بهینه‌سازی سد قوسی، محدودیت‌ها در سه دسته‌ی هندسی، تنشی، و پایداری دسته‌بندی می‌شوند.

۶-۱- محدودیت‌های هندسی

برای ساخت آسان سازه، مقدارشیب برآمدگی در نماهای بالادست و پایین دست نسبت به پنجه‌ی سد باید محدود شود [۷,۶,۵]. این محدودیت‌های هندسی به این قرار است:

$$s \leq s_a \quad (14)$$

$$0.5 \leq \beta \leq 1 \quad (15)$$

در رابطه‌های کنونی، s شبیه برآمدگی در تاج سد، s_a مقدار مجاز شبیه برآمدگی در تاج سد که به گونه معمول بین $0/3$ تا $0/5$ متغیر است. همچنین، β عامل ارتفاعی است که در آن جا شبیه خم بالا دست صفر می‌شود.

۶-۲- محدودیت‌های تنشی

سدهای دوقویی از بتن بدون میل‌گرد ساخته می‌شوند. تحلیل سازه بر پایه‌ی تنش‌های مجاز کششی و فشاری بتن مانند زیر انجام می‌شود [۱۲,۸,۴]:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{1all} \quad (16)$$

$$\sigma_3 \leq \sigma_{3all} \quad (17)$$

در اینجا، σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی کششی و فشاری است. مقدار مجاز تنش‌های σ_1 و σ_3 ، به ترتیب، با σ_{1all} و σ_{3all} نشان داده شده است. این تنش‌ها در گره‌های جزء حساب می‌شود.

۶-۳- محدودیت‌های پایداری

در سدهای قوسی دوگونه قید پایداری لغزشی وجود دارد. در سدهای کوچک یکی از این قیدها و در سدهای بزرگ

است. این عامل‌ها در بردار متغیر طراحی X جا می‌گیرند [۸].

$$X = \{s, \beta, t_{c1}, \dots, t_{cn+1}, r_{u1}, \dots, r_{un+1}, r_{d1}, \dots, r_{dn+1}\} \quad (12)$$

آشکار است بردار متغیر طراحی، $(3n+5)$ عضو دارد و n شمار تقسیم بندی ارتفاع سد است.

۵- تابع هدف

نام معیار شناخت طرح بهینه تابع هدف است. این معیار به صورت رابطه‌ای بر حسب متغیرهای طراحی و پارامترهای از عامل‌های ثابت تعریف می‌شود. در مسئله‌ی بهینه‌سازی سد دوقویی، تابع هدف شامل هزینه‌ی ساختمان سد است. این هزینه در برگیرنده‌ی هزینه‌ی بتن‌ریزی سازه، هزینه‌ی گودبرداری پی و هزینه‌ی قالب‌بندی است [۱۱,۵,۴].

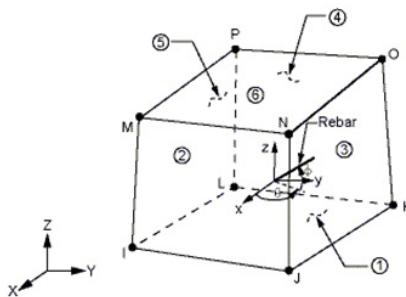
$$f(x) = c_1 v_1(x) + c_2 v_2(x) + c_3 A(X) \quad (13)$$

در اینجا، $f(x)$ هزینه ساخت سد، $v_1(x)$ حجم بتن سد، $v_2(x)$ حجم حفاری پی و $A(X)$ سطح قالب بندی بدن سد است. ضریب‌های c_1 ، c_2 و c_3 ، به ترتیب، برابر هزینه‌های یکه حجم بتن سد، حفاری پی و قالب بندی است. یادآوری می‌کند، هزینه‌ی حفاری پی و قالب بندی خیلی کمتر از هزینه‌ی بتن سد است. بنابراین، از حجم بدن سد به عنوان تابع هدف بهره‌جویی می‌شود.

۶- محدودیت‌های بهینه‌سازی

هدف از طراحی بهینه‌ی سازه، کمینه کردن تابع هدف و برقراری همه محدودیت‌های آن است. این قیدها شامل محدودیت‌های برابری و نابرابری است. در حالت کلی، رابطه‌های وابسته به تحلیل سازه، به صورت محدودیت‌های برابری و قیدهای وابسته به تنش عضوها و تغییر مکان‌های گرهی، به شکل محدودیت‌های نابرابری نوشته می‌شوند.

بن بھرہجوی میشود. شکل (۳) این جزء را نشان می‌دهد. جزء نام برد، هشت گره و در هر گره سه درجه آزادی دارد. به سخن دیگر، تغییر مکان گرھی در جهت‌های x , y و z است [۱۶].



شکل ۳ جزء ۶۵

دیگری حاکم می‌شود [۱۴,۵,۲]. برای سدهای کوچک محدودیت زیر باید تأمین شود:

$$g(X) = 1 - \frac{\theta}{\theta_{all}} \leq 0 \quad (18)$$

در اینجا، θ زاویه‌ی بین واکنش تکیه‌گاه‌های قوس و امتداد تکیه‌گاه‌ها و θ_{all} کمینه‌ی زاویه‌ی مجاز است. کمینه‌ی زاویه‌ی بین تکیه‌گاه‌ها و کناره‌های دره ۳۰ درجه است. همچنین، در سدهای بزرگ محدودیت زیر برای تأمین پایداری لغزشی باید برقرار شود:

$$\phi^l \leq \phi_i \leq \phi^u \quad (19)$$

در این رابطه، ϕ_i زاویه مرکزی سد قوسی در ترازهای ارتفاعی گوناگون است. این زاویه به طور معمول $90 \leq \phi_i \leq 130$ درجه است.

۷- پندارهای تحلیل سازه

در این مقاله، برای به دست آوردن شکل نخستین سازه از معیارهای آینه‌نامه‌ی USBR بھرہ می‌گیرد [۱۴,۱۰]. همه‌ی تحلیل‌های سازه با استفاده از قابلیت زبان طراحی متغیر گونه‌ی نرم‌افزار ANSYS موسوم به APDL^۱ انجام می‌پذیرد. باید افزود، APDL زبانی است که این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند تا الگوی خود را بر حسب متغیر تعريف کند. با این زبان، می‌توان تغییرهای طراحی را به سادگی و راحتی وارد تحلیل کرد.

برای بهینه‌سازی و ایجاد بدنه‌ی سد قوسی، شبکه‌بندی و تحلیل آن با ANSYS، از جزء Solid65 بھرہ می‌گیرد [۱۶]. این جزء مکعبی سه‌بعدی است. از آن برای الگوسازی مسائلهای مکانیک جامدات همگن به‌ویژه تحلیل مسائلهای

۸- روش‌های بهینه‌سازی

تاکنون فنون بهینه‌سازی گوناگونی را پژوهش گران پیشنهاد کرده‌اند. پاره‌ای از این شیوه‌ها، تنها جنبه‌ی ریاضی مسئله را وارد کار می‌کند. پاره‌ای دیگر، راه کارهای کاربردی را مورد توجه قرار می‌دهند. معلوم است، یک روش خوب ترکیبی از هردو جنبه است. راه کارهای فراوانی را می‌توان برای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی به کار گرفت. در این مقاله، از روش‌های تندترین کاھش و دوگونه از برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی بهره‌جویی می‌شود.

۹- روش تندترین کاھش

تندترین برای کاھش تابع هدف در هر نقطه، همان جهت خلاف بردار گرادیان است. به سخن دیگر، اگر $\nabla f > 0$ باشد، با افزودن به مقدار X ، میزان تابع هدف f افزایش می‌یابد و چون هدف کاھش f است، باید از X کم کرد. از این ویژگی برای یافتن نقطه‌ی تکرار پسین استفاده می‌شود. در ادامه، گام‌های روش تندترین کاھش می‌آیند [۱۷].

گام یکم: انتخاب یک پاسخ نخستین از بردار متغیر طراحی

1- Ansys Parametric Design Language

می‌یابد. برای به دست آوردن گام حرکت در هر تکرار از فرآیند بهینه‌سازی، نیاز به حل یک زیربرنامه درجه دوم است. هنگامی یک زیر برنامه درجه دوم پاسخ دارد که دستگاه محدودیت‌های مسئله سازگار باشد. یک زیر برنامه درجه دوم کلی به شکل زیر است [۱۸].

$$\begin{cases} \min(r^k)^t d_x + \frac{1}{2} d_x^t H^k d_x \\ \nabla h(x^k)^t d_x + h(x^k) = 0 \\ \nabla g(x^k)^t d_x + g(x^k) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

در برنامه‌ی کنونی، $d_x = x^{k+1} - x^k$ بودار جستجو، r^k ماتریس هسیان و H^k برابر با گرادیان تابع هدف در x^k است. بردار متغیر طراحی جدید از رابطه‌ی $x^{k+1} = x^k + d_x$ به دست می‌آید.

برای این‌که تکرارهای گام‌های تحلیل به پاسخ بهینه همگرا شود، برای یافتن بردار متغیر طراحی جدید از رابطه‌ی $x^{k+1} = x^k + \alpha d_x$ بهره جویی می‌شود. عامل α را باید به گونه‌ای انتخاب کرد که رابطه‌ی زیر برقرار شود:

$$\phi(x^k + \alpha d_x) < \phi(x^k) \quad (23)$$

در این رابطه، ϕ تابع توان است. در زیر برنامه‌ی درجه دوم برای رسیدن به همگرایی کلی از تابع توان استفاده می‌شود. این تابع‌ها گوناگون‌اند و مهمترین آن‌ها تابع توان پاول است [۱۹].

برای کارایی بهتر برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی و نیز در نظر گرفتن ویژگی ناخطي محدودیت‌ها، از تابع لاغرانژی برای تابع هدف استفاده خواهد شد. تابع مهم لاغرانژین که در بهینه‌سازی نقش اساسی دارد، این گونه تعریف می‌شود:

$$L(x, u, v) = f(x) + u^t h(x) + v^t g(x) \quad (24)$$

در این جا u و v ضریب‌های لاغرانژ است.

یاد آوری می‌کند، استفاده از برنامه‌ریزی درجه دوم

$X^{(1)}$ و مقدار عامل k برابر یک قرار می‌گیرد.

گام دوم: گرادیان تابع هدف در نقطه‌ی $X^{(k)}$ حساب می‌شود. برای جستجو رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$d^{(k)} = -\nabla F(X^k) \quad (20)$$

گام سوم: طول گام جستجو، از کمینه کردن تابع یک متغیره‌ی $F^{(k+1)} = F[X^{(k)} - S_k \nabla F(X^{(k)})]$ به دست می‌آید. به طور معمول، از روش‌های عددی برای محاسبه‌ی استفاده می‌شود.

گام چهارم: پاسخ جدید در مرحله‌ی $(k+1)$ از رابطه‌ی زیر پیدا می‌شود:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + S_k d^{(k)} \quad (21)$$

گام پنجم: اگر تفاوت و پاسخ‌های پیاپی از تقریب معینی کوچک‌تر باشد، پاسخ مرحله‌ی $(k+1)$ ام، $X^{(k+1)}$ همان پاسخ بهینه خواهد بود. در غیر این صورت، محاسبه‌ی گام دو و با افزایش یک به مقدار (k) تکرار می‌شود.

چون این فن به مقدار مشتق‌های مرتبه یکم تابع هدف نیاز دارد، یکی از روش‌های مرتبه یکم شناخته می‌شود. یادآوری می‌شود، این راهکار را نرم افزار انسیس، روش جستجوی مرتبه یکم^۱ نامیده است.

۲-۸- روشنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی^۲

مسئله‌ی بهینه‌سازی سد قوسی برنامه‌ریزی غیرخطی دارد. فن برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی یکی از کاراترین روش‌ها برای حل این گونه مسئله است. این فن در یک فرآیند تکراری، طرح نخستین را بهبود می‌بخشد و فرآیند تا هنگامی که معیار معینی برای طرح بهینه برقرار شود، ادامه

1- First Order Search

2- SQP: Sequential Quadratic Programming

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|\bar{d}\|^2 \\ g_j(x+d) + (\nabla g_i(x))' \bar{d} = -\|d\|^2 \end{cases} \quad (26)$$

سپس، با استفاده از رابطه‌ی زیر جهت پذیرفتني جدید به دست می‌آيد:

$$x^{k+1} = x^k + t d^k + t^2 \bar{d}^k \quad (27)$$

عامل t ، نخستین عدد از مجموعه‌ی $\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\}$ است که دو رابطه‌ی زیر را برقرار کند:

$$f(x^{k+1}) \leq f(x^k) + \alpha t (\nabla f(x))' d; \alpha \in (0, \frac{1}{2}) \quad (28)$$

$$g_j(x^{k+1}) \leq 0; j = 1, \dots, p \quad (29)$$

این روش بر پایه‌ی شیوه‌ی پانیر و تیتس و حجم محاسبات بالایی دارد.

گونه‌ای دیگر از روش FSQP به وسیله‌ی کاستروا-چن پیشنهاد شده است [۲۳]. تفاوت اصلی این راهکار با فن‌های پیشین، در نحوه‌ی محاسبه‌ی جهت d^k است. در شیوه‌های گذشته برای تعیین جهت d^k از ترکیب خطی دو جهت d_0^k و d_1^k استفاده می‌شد. در این فرآیند، می‌توان جهت d^k را به‌طور مستقیم از برنامه‌ریزی درجه دوم زیر به دست آوردن:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} d^t H d + \gamma \\ (f(x))' d \leq \alpha \gamma \\ g_i(x) + (\nabla g_i(x))' d \leq \omega \gamma \end{cases} \quad (30)$$

در این رابطه، γ یک متغیر ساختگی است که با انجام فرآیند حل به مقدار صفر می‌رسد. عامل‌های ω و α مقدارهای بزرگتر از صفر دارند. پژوهش‌گران مختلف، مقدارهای متفاوتی برای این دو عامل پیشنهاد کردند برای نمونه، ژو دو مقدار ثابت $\omega = 1$ و $\alpha = 2$ و لورنس و تیتس مقدارهای $\omega > 0$ و $\alpha = 1$ را پیشنهاد کردند [۲۰, ۲۴].

پیاپی برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی ناخطری سبب بروز چندین مشکل می‌شود [۱۵].

۱- ناسازگاری زیر برنامه‌ی درجه دوم. ۲- انتخاب تابع توان مناسب. ۳- بروز پدیده‌ی ماراتوس. در این حالت، تابع توان طول گام یک را در نزدیکی پاسخ بهینه نمی‌پذیرد و مانع از همگرایی مرتبه‌ی دوم می‌شود.

۳-۸- برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتني

روش جهت پذیرفتني برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی دو دسته راهکار [۲۱]: ۱- روش جهت پذیرفتني با همگرایی خطی، ۲- فن جهت پذیرفتني با همگرایی ابرخطی دارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جهت پذیرفتني تاپیکس، کاود و پلاک دارای همگرایی خطی است. پانیر و تیتس با استفاده از زیر برنامه‌ی درجه دوم، به فرآیند جدیدی به برنامه‌ریزی درجه دوم پذیرفتني دست یافتند [۲۲]. این شیوه به دلیل استفاده از زیر برنامه‌ی درجه دوم همگرایی ابرخطی^۲ دارد. برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتني یکی از جدیدترین روش‌های برنامه‌ریزی درجه دوم است. که رابطه‌های آن این‌گونه است:

$$\begin{cases} \min (\nabla f(x))' d + \frac{1}{2} d^t H d \\ g_i(x) + (\nabla g_i(x))' d \leq 0; j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (25)$$

در این برنامه، $d^k = (1 - \rho)d_0^k + \rho d_1^k$ و است. همچنین، d_0^k یک جهت کاهشی برای تابع هدف $f(x)$ است. برای به دست آوردن جهت پذیرفتني در هر مرحله از جهت اصلاحی d_1^k استفاده می‌شود. افزون بر این، برای اجتناب از اثر ماراتوس، جهت اصلاحی مرتبه‌ی دوم \bar{d} با حل یک زیر برنامه‌ی درجه دوم دیگر محاسبه می‌شود. رابطه‌های مورد نیاز در برنامه‌ی زیر می‌آید:

1- FSQP: Feasible Sequential Quadratic Programming
2- Superlinearly

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i} \quad (32)$$

این فرآیند برای تمامی متغیرهای طراحی تکرار می‌شود.

۱۰- نمونه‌های عددی

در ادامه‌ی کار، چند شکل سد با سه روش تقریبی بهینه‌سازی خواهد شد. همه‌ی این سدها دوقوسی بتنی است. الگوی هندسی سازه در این مقاله، سد دوقوسی سه‌می‌گونه است. با در نظر گرفتن ($n=5$) شمار متغیرهای طراحی ۲۰ و در ۶ تراز ارتفاعی خواهد بود.

متغیرهای طراحی به قرار زیراند:

$$X = \{s, \beta, t_{c1}, \dots, t_{c6}, r_{u1}, \dots, r_{u6}, r_{d1}, \dots, r_{d6}\} \quad (33)$$

در این بردار، متغیر δ شیب طرهی قائم مرکزی در تاج، β ضریب ارتفاعی است که در آن شیب طرهی قائم مرکزی صفر است، t_{ci} ضخامت طرهی قائم مرکزی در تراز i و r_{ui} و r_{di} به ترتیب، شعاع رویه‌ی بالادست و پایین دست سد قوسی در تراز i است.

الگویی و تحلیل سد به وسیله‌ی قابلیت زبان طراحی متغیرگونه‌ی نرم افزار انسیس انجام می‌شود. در این فرآیند، بدنی سد با جزء Solid65 شبکه بندی می‌شود. ترکیب بارگذاری سازه، از بارهای فشار آب ایستا و بار مرده‌ی وزن سد به دست می‌آید. همچنین، محل برخورد بدن سد با کناره‌های دره و پی به صورت گیردار است.

برای فرآیند بهینه‌سازی با روش تندترین کاهش از قابلیت طراحی بهینه‌ی نرم افزار انسیس، جستجوی مرتبه یکم استفاده می‌شود. برای راه‌کارهای برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی و نیز برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفته، نویسنده‌گان برنامه‌ای با زبان فرترن نوشتند. برای بهینه‌یابی هر سد، ۱۰ نقطه طراحی آغازین از فضای طراحی به کار

ژو راه‌کار کاسترو- چن را بهبود بخشید [۲۴]. وی برای محاسبه d^k زیر برنامه درجه دوم زیر را پیشنهاد کرد:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} d^t H d + \gamma \\ (f(x))' d \leq \gamma \\ g_i(x) + (\nabla g_i(x))' d \leq \omega \gamma \end{cases} \quad (31)$$

در این فن، جهت مرتبه‌دوم \bar{d} از حل یک دستگاه معادله‌ی خطی به دست می‌آید. این شیوه، با حل یک QP در هر تکرار، در مقایسه با روش کاسترو- چن، حجم کار کمتری دارد. همچنین، همگرایی آن ابرخطی است.

۹- محاسبه گرادیان تابع‌ها

یافتن مشتق‌های تابع هدف و قیدهای مسئله‌ی بهینه‌سازی سازه‌ها نسبت به متغیرهای طراحی، یکی از گام‌های مورد نیاز روش‌های برنامه‌ریزی بر پایه‌ی گرادیان است. این مشتق‌ها داده‌های مهمی برای انتخاب یک جهت جستجو برای رسیدن به طرح بهینه در دسترس قرار می‌دهد. به این سبب باید حساسیت طرح را نسبت به متغیرهای طراحی حساب کرد. روش‌های محاسبه گرادیان تابع‌ها به دو دسته‌ی تقسیم می‌شوند:

۱- شیوه‌های مشتق‌گیری مستقیم

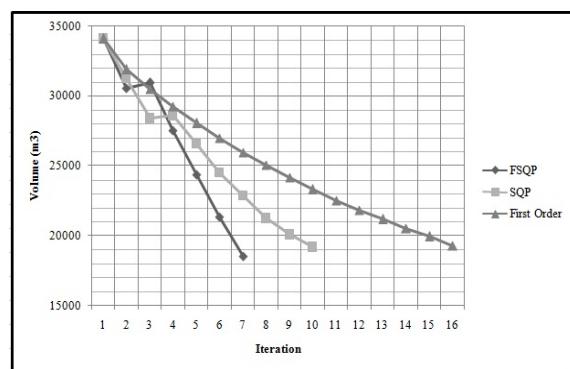
۲- روش‌های مبتنی بر حساب تغییرات.

در این مقاله، برای محاسبه مشتق‌ها از روش تفاوت محدود مرتبه یکم استفاده می‌شود. این راه کار بر پایه‌ی حساب تغییرات است. در این فن، متغیر طراحی Δx_i به اندازه‌ی مناسب $\Delta x_i > 0$ تغییر می‌کند. سپس، با استفاده از بردار متغیر طراحی جدید، سازه تحلیل می‌شود و مقدارهای جدید تابع هدف و محدودیت‌ها به دست می‌آیند. مشتق جزئی تابع f مبنی بر متغیرهای x_1, \dots, x_n نسبت به متغیر طراحی x_i با استفاده از تقریب تفاوت محدود مرتبه‌ی یکم زیر به دست می‌آید:

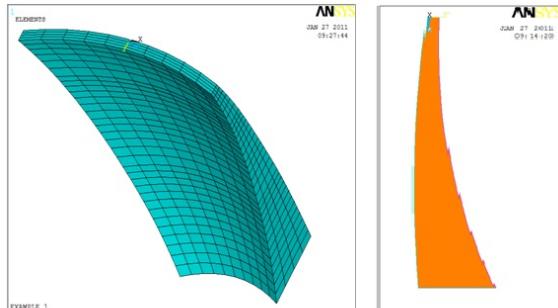
چرخه و زمان تحلیل را روش برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتی دارد.

جدول ۲ نتیجه بهینه‌سازی نمونه‌ی یکم

روش بهینه‌سازی	حجم بهینه	شمار چرخه	زمان بهینه‌سازی
FSQP	۱۸۵۰۹	۷	۳۱۴
SQP	۱۹۱۸۸	۱۰	۳۵۸
First order	۱۹۲۹۹	۱۶	۷۵۷



شکل ۵ شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی یکم

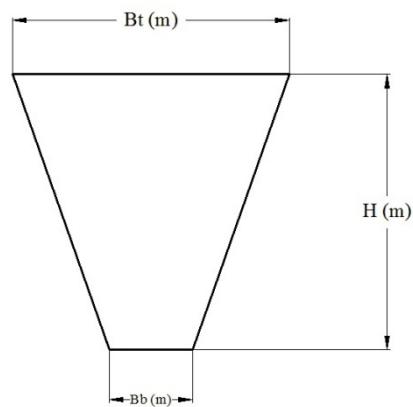


شکل ۶ شکل بهینه‌ی سد

نمونه‌ی دوم: سد قوسی سمینوی که با روش بار آزمون طراحی شده است و حجم بتن آن برابر، ۱۳۲۰۰۰ مترمکعب است، با سه فن تقریبی بهینه‌سازی می‌شود. در این مسئله، تنش مجاز کششی ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، تنش مجاز فشاری ۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است [۱۴, ۱۳].

نتیجه بهینه‌سازی سد سمینوی در جدول (۳) و شکل

می‌رود. برای هر نقطه‌ی آغازین، فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌شود. در کلیه‌ی سدها وزن مخصوص بتن برابر ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب کشسانی بتن $۰/۲ \times 10^5$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. همچنین، ضریب پواسون $۰/۲$ به کار می‌رود. شکل (۴) عامل‌های شکل دره برای سه نمونه‌ی عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ عامل‌های شکل دره

جدول ۱ مشخصه‌های هندسی نمونه‌های عددی

	$H(m)$	$Bt(m)$	$Bb(m)$
نمونه یکم	۶۰	۳۰	۶۰
نمونه دوم	۸۰	۶۰	۱۸۰
نمونه سوم	۱۰۰	۴۰	۲۴۰

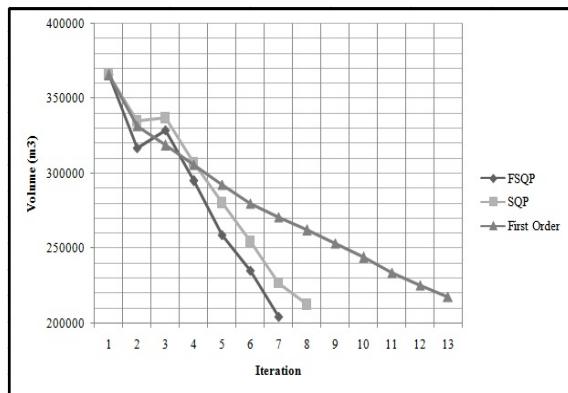
نمونه‌ی یکم: در این سد، تنش مجاز کششی ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، تنش مجاز فشاری ۸۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [۱۳]. نتیجه بهینه‌سازی این سد در جدول (۲) آمده است. شکل (۵)، روند کاهش تابع هدف را تا رسیدن به پاسخ بهینه را برای این نمونه عددی نشان می‌دهد و سازه بهینه سد در شکل (۶) به نمایش درمی‌آید. در تمامی جدول‌های این بخش، یکای حجم سد مترمکعب و یکای زمان ثانیه است.

در حل این مسئله، شماره چرخه شیوه‌ی مرتبه یکم از برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی بیشتر است. کمترین شماره

نتیجه‌های فرآیند بهینه‌سازی در جدول (۴) و شکل (۹) درج شده‌اند. همچنین، شکل بهینه‌ی طرهی قائم مرکزی و بدنی سد را شکل (۱۰) نمایش می‌دهد.

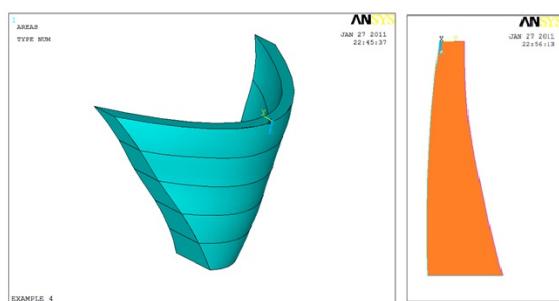
جدول ۴ نتیجه‌های بهینه‌سازی نمونه‌ی سوم

روش بهینه‌سازی	زمان بهینه‌سازی	روش بهینه	حجم بهینه	شمار چرخه	حجم بهینه سازی
FSQP	۲۰۴۵۲۰	FSQP	۱۶۹	۷	۲۰۶۹۸۰
SQP	۲۱۲۴۷۰	SQP	۱۹۵	۸	۱۰۶۳۶۵
First order	۲۱۷۶۸۲	First order	۵۳۰	۱۳	۱۵۸۸۴۰



شکل ۹ شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی سوم

حجم بهینه‌ی این سد با الگوهای هندسی پنج مرکزی و شعاع انحنای متغیر، به ترتیب، ۲۴۸۵۶۰ و ۲۴۲۷۷۷ مترمکعب به دست آمده است [۲۲]. باید افزود، با افزایش پهنای دهانه دره، نیروهای فشاری بیشتری در قوس‌ها ایجاد می‌شود که نیاز به ضخامت بیشتری در طرهی قائم دارد.



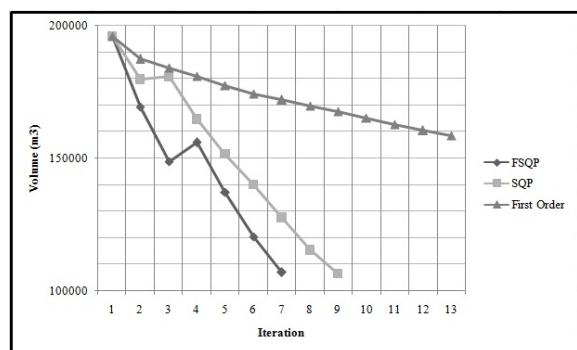
۱- طرهی قائم مرکزی سد

شکل ۱۰ سد بهینه‌ی سوم

(۷) می‌آید. همچنین، شکل (۸) سازه‌ی بهینه را نمایش می‌دهد.

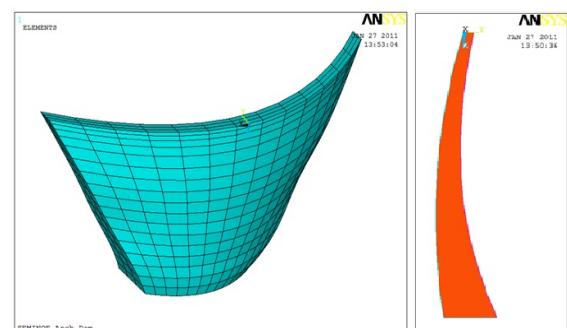
جدول ۳ نتیجه بهینه‌سازی نمونه‌ی دوم

زمان بهینه‌سازی	شمار چرخه	حجم بهینه سازی	روش بهینه سازی
۲۱۱	۷	۱۰۶۹۸۰	FSQP
۳۵۸	۹	۱۰۶۳۶۵	SQP
۵۷۷	۱۳	۱۵۸۸۴۰	First order



شکل ۷ شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی دوم

پژوهش‌گران دیگر طرح بهینه‌ی این سازه را با الگوی هندسی بیضی‌گونه و نیز شعاع انحنای متغیر پیدا کرده‌اند. حجم بهینه‌ی سد با این الگوها، به ترتیب، ۱۱۵۴۱۲ و ۱۰۹۵۰۰ متر مکعب بوده است [۱۴, ۱۳].



۲- شکل بهینه‌ی سد

شکل ۸ سد بهینه‌ی سمینوی

نمونه‌ی سوم: در این سد تنش فشاری و کششی بتن، به ترتیب، ۵۰ و ۲۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است [۱۴].

تعداد تحلیل‌ها افزایش می‌یابد و مشتق‌گیری ازتابع‌های هدف و محدودیت‌ها طولانی‌تر خواهد شد. چون راهکار برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتی سرعت همگرایی خوبی دارد، در نتیجه، این فن برای مسأله بهینه‌سازی با شمار متغیرهای طراحی زیاد مناسب است. باید افروزد، قید محدودیت قوس مرکزی، که از قیدهای پایداری سازه است، در تمام فرآیند بهینه‌سازی و در سه روش به صورت قید نافعال می‌ماند. از دیدگاه کمینه بودن تابع هدف و زمان فرآیند بهینه‌سازی، بهترین پاسخ با روش برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتی به دست می‌آید.

۱۱- نتیجه‌گیری

اهمیت سدهای قوسی برای همه‌ی کشورها آشکار است. با وجود این، به دلیل حجم مصالح مصرفی زیاد، این سدها هزینه‌ی ساخت بسیار بالایی دارند. بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی افزون بر کاهش مصالح و هزینه‌ها می‌تواند به بهره‌وری مطلوب از توان سازه‌ای کمک کند. در این پژوهش، یک الگوی هندسی ساده و کاربردی برای الگوسازی سد دوقوسمی به کار رفت. بهینه‌سازی این گونه سازه‌ها، مسأله‌ای ناخطری با شمار متغیرهای طراحی زیاد می‌باشد. به طور معمول، برای یافتن پاسخ بهینه‌ی سد ها از روش‌های تقریبی بهره می‌جویند.

تجربه‌های عددی این مقاله نشان داد که روش تندترین کاهش، به کندی به سوی نقطه‌ی بهینه پیش می‌رود. در نتیجه، شمار چرخه‌های لازم برای دستیابی به پاسخ بهینه زیاد است. به سبب توانایی محدود و زمان‌بر، راهکار نرم افزار انسیس برای بهینه‌سازی سدهای دوقوسمی توصیه نمی‌شود.

یکی از کاراترین روش‌ها برای بهینه‌سازی سدهای دوقوسمی، فن برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی است. با وجود توان بالای این راه کار، مشکل‌هایی هم وجود دارد. از آن میان، می‌توان به ناسازگاری زیر برنامه‌ی درجه دوم و احتمال پدیده‌ی ماراتوس اشاره کرد. این عیوب‌ها با به کارگیری فن برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتی بر طرف می‌شود. استفاده از راهکار برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی سبب می‌شود که سرعت فرآیند بهینه‌سازی زیاد شود. همچنین، شمار چرخه‌های مورد نیاز برای رسیدن پاسخ بهینه کاهش یابد.

برپایه‌ی تجربه‌های عددی تحلیل‌ها، آشکار شد که تغییر نقطه‌های آغازین تفاوت زیادی در همگرایی مسأله ایجاد نمی‌کند. به طور معمول، با زیاد شدن متغیرهای طراحی،

۱۲- منابع

- [۱] ابوالبشری، محمدحسن، «مبانی بهینه‌سازی سازه‌ها»، دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات دانشگاه، چاپ اول، ۱۳۸۲
- [۲] ابریشمی، جلیل. وهاب رجایی، ناصر، «سدهای بتئی طرح و اجرا»، انتشارات آستان قدس رضوی، ۱۳۸۴.
- [۳] Sharpe, R., "The Optimum Design Of Arch Dams", Institution Of Civil Engineers (ICE), paper 72005, pp. 73-98, 1969.
- [۴] Bofang, Z., "Shape Optimization of Arch Dams for Static and Dynamic Loads", Journal of Structural Engineering, (118), pp. 1310-1330 1992.
- [۵] تجلی، ف. احمدی، م. محرمی، ح، «بهینه سازی شکل سدهای بتئی قوسی به منظور بهبود عملکرد در برابر زلزله»، مجله فنی مهندسی مدرس شماره ۳۵، ۱۳۸۸.
- [۶] Seyedpoor, S. M. Gholizadeh, S., "Optimum Shape Design of Arch Dams by a Combination of Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation and Genetic Algorithm Methods", Advances in Structural Engineering, (11), pp. 501-510. 2008.

- [۱۵] شعبانعلی، محمد رضا، «تحلیل المان محدود به کمک ANSYS»، موسسه علمی فرهنگی نص، چاپ دوم، بهار ۱۳۸۲.
- [۱۶] Moaveni, S., "Finite Element Analysis , Theory And Application With Ansys" ISBN 0-13-785098-0.
- [۱۷] رضایی پژند، م. سرافرازی، س. ر، «مهندسی سیستمها (سامانه‌ها) و بهینه‌سازی»، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۴.
- [۱۸] Boggs, P.T. Tolle, J.W., "Sequential Quadratic Programming for Large-scale Nonlinear Optimization", Journal of Computation and Applied Mathematics, (124), pp.123-137, 2000.
- [۱۹] Powell, M. J. D., "A Fast Algorithm for Nonlinearity Constrained Optimization Calculations", Numerical Analysis, (11), pp. 144-157, 1977.
- [۲۰] Lawrence, C. T. Tits, A. L., "A Computational Efficient Feasible Sequential Quadratic Programming Algorithm", SIAM J. Optim, 11, (4), pp 1092-1118, 2001.
- [۲۱] Kostreva, M. M, Chen, X., "A Superlinearly Convergent Method of Feasible Directions", Applied Mathematics and Computation, (116), pp. 231-244, 2000.
- [۲۲] Jian, J. B. Tang, C. M, Hu, Q. J, Zheng, H.Y., "A Feasible Descent SQP Algorithm for General Constrained Optimization Without Strict Complementarity", Journal of Computation and Applied Mathematics, (180), pp.391-412, 2005.
- [۲۳] Zhu, Z., A Simple Feasible SQP Algorithm for Inequality Constrained optimization", Applied Mathematics and Computation, Article in Press, 2006.
- [۲۴] Zhu, Z. Zhang, K., "A New SQP Method Of Feasible Directions for Nonlinear Programming", Applied Mathematics and Computation, (148), pp.121-134, 2004.
- [۷] Seyedpoor, S. M. Salajegheh, J. Salajegheh, E., "Shape Optimal Design Of Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction Using A Grading Strategy And Approximation Concepts", Applied Mathematical Modelling, (34), pp. 1149-1163. 2010.
- [۸] Hamidian, D. Seyedpoor, S. M., "Shape Optimal Design Of Arch Dams Using An Adaptive Neuro-fuzzy Inference System And Improved Particle Swarm Optimization", Applied Mathematical Modelling, (34), pp.1574–1585. 2010.
- [۹] Akbari, J. Ahmadi, M. T. Moharrami, H., "Advances in concrete arch dams shape optimization", Applied Mathematical Modelling, (35), pp.3316–3333. 2011.
- [۱۰] اکبری، ج. احمدی، م. ت، «طراحی یک برنامه‌ی تحلیل سدهای بتنی قوسی شیء-گرا با فرترن ۹۰»، هفتمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [۱۱] Shouyi, L. Lujun, D. Lijuan, Z. Zhou, W., "Optimization Design Of Arch Dam Shape With Modified Complex Method", Advances in Engineering Software, (40), pp.804–808. 2009.
- [۱۲] Zhang, X. Li, S. Chen, Y., "Optimization Of geometric Shape Of Xiamen Arch Dam", Advances in Engineering Software, (40), pp. 105–109, 2009.
- [۱۳] حمیدیان، د. سلاجقه، ج، «بهینه سازی شکل سدهای دو قوسی بتنی با استفاده از روش تقریب سازی»، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، کد مقاله ۱۳۹۷-۱۳۸۳، ۱۳۸۳.
- [۱۴] صفاری، ح، «طراحی بهینه سدهای بتنی دو قوسی»، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی، ۱۳۷۹.

Abstracts

«Research Note»

یادداشت تحقیقاتی:

طرح شکل بهینه‌ی سدهای دوقوسی بتنه با سه روش تقریبی

محمد رضایی پژند ، بهروز احمدی ندوشن ، خسرو خالقی

استاد دانشگاه فردوسی مشهد سازه

استادیار دانشگاه یزد سازه

دانشجوی کارشناسی ارشد مشهد