

الگوی هندسی بهینه‌ی شکل سدهای قوسی بتنی

محمد رضایی پژند^{۱*}، خسرو خالقی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۸ پذیرش مقاله: اسفند ۱۳۸۸	سدهای قوسی بتنی که با الگوی هندسی بهینه‌ای طرح می‌شوند، حجم بتن مصرفی کمتری دارند. این گونه از سازه‌ها به دلیل سبک بودن در برابر زمین لرزه‌ها بهتر مقاومت می‌کنند و ارزان‌تر ساخته می‌شوند. الگوی بهینه‌ی سد باید کلیه‌ی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هندسی سازه را وارد تحلیل کند. در این پژوهش، نویسندگان چندین الگوهای هندسی برای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی را به کار می‌برند و کاراترین آن‌ها را انتخاب می‌نمایند. از حجم بدنه‌ی سازه به عنوان تابع هدف و قیدهای پرشمار هندسی و رفتاری برای سازگاری بهتر با طبیعت سد بهره جویی خواهد شد. روش اجزای محدود و برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی برای تحلیل و بهینه‌سازی به کار می‌روند و شکل بهینه‌ی چند سد به دست می‌آید. نتیجه‌ها آشکار می‌سازند که الگوی سهمی گونه، افزون بر دادن کمترین حجم سد، به شمار تکرار بهینه‌سازی کمتری نسبت به سایر شکل‌ها نیاز دارد.
واژگان کلیدی: بهینه‌سازی شکل سد قوسی الگوی هندسی بهینه برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی	

۱- مقدمه

تعریف نمود. همچنین، برای انجام بهینه‌یابی از فرآیند برنامه‌ریزی خطی پیاپی (SLP) بهره گرفت. پژوهش‌های بیشتر در زمینه‌ی بهینه‌یابی شکل سدهای قوسی توسط بوفانگ انجام پذیرفت [۱، ۳]. ایشان برای ایجاد هندسه‌ی سد در مقطع‌های افقی، الگوهای دایره‌ای یک و چند مرکزی، سهمی و بیضی را پیشنهاد کرد.

در سال ۲۰۰۹ میلادی، سیدیپور و همکاران اثر زمین لرزه را بر طرح بهینه‌ی سد قوسی مطالعه کردند. ایشان اندرکنش آب و سازه را وارد تحلیل ساختند. نامبردگان ترکیب چند راه حل بهینه‌سازی در سه مرحله را به کار گرفتند و شکل بهینه‌ی سد را به دست آوردند [۴]. در پژوهشی دیگر، اثر پی سنگی و آب بر شکل بهینه‌ی سد قوسی مطالعه شدند. در این کار از روش اجزای محدود و تحلیل دینامیکی بهره جستند. رفتار سد را خطی پنداشتند و اثر حرکت زمین لرزه را وارد محاسبات کردند. از بهینه‌سازی و شبکه عصبی برای پیدا کردن شکل

سد قوسی یک پوسته فضایی خم‌دار است که بار را به تکیه‌گاه‌ها و پی منتقل می‌نماید. به‌طور معمول، شکل سدهای قوسی بر پایه‌ی آزمون و خطا طرح می‌شود [۱]. آشکار است، طرح بهینه‌ی شکل سد قوسی دو عامل اقتصادی بودن و ایمنی را در بر می‌گیرد. پیدا کردن شکل بهینه‌ی سد قوسی بر پایه‌ی شرط‌های مرزی و قیدها و با شیوه‌های عددی بهینه‌سازی انجام می‌پذیرد. از میان این فن‌ها، یکی روش برنامه‌ریزی ریاضی است که کاستی‌های معمول راه‌کارهای تکراری را ندارد.

نخستین بار شارپه بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی را مطرح نمود [۲]. وی هندسه‌ی سد را با بهره جویی از چند جمله‌ای‌های ویژه برای سطح میانی و ضخامت سازه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrpajand@yahoo.com

۱. استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. کارشناس ارشد سازه

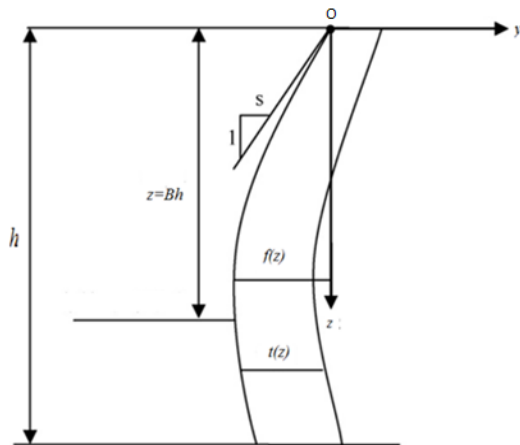
یادآوری باید کرد که در بیشتر طراحی سدها از روش سوم استفاده می‌کنند. این شیوه بر پایه‌ی الگوی بوفانگ استوار می‌باشد.

۳- شکل مقطع قائم مرکزی

یافتن خم مقطع قائم مرکزی با چند جمله‌ای درجه m ، به تعداد m متغیر طراحی نیاز است. در این مقاله، از تابع درجه دوم زیر برای مقطع قائم مرکزی بهره‌جویی خواهد شد [۹]:

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

در این رابطه، h ارتفاع سد و s شیب خم در تاج و B ضریب ارتفاعی است که در آن شیب خم صفر می‌گردد. این عامل‌ها در شکل ۱ به نمایش درآمده‌اند.



شکل ۱- مقطع قائم مرکزی

۴- ضخامت بدنه‌ی سد

با تقسیم ارتفاع سد به n قسمت، $n+1$ تراز ارتفاعی به دست می‌آید. بر این پایه، رابطه‌ی ضخامت طره‌ی قائم مرکزی سازه به قرار زیر می‌باشد [۱۰]:

$$t(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times t_i \quad (2)$$

مطلوب یک سد قوسی واقعی در این مطالعه استفاده نمودند [۵]. جدیدترین شیوه‌ی بهینه ساختن شکل سد قوسی را قلی زاده و سیدپور پیشنهاد کرده‌اند. این دو تن، با بهره جستن از فن‌های تکاملی، تواتر طبیعی سازه را پیش بینی نمودند و با محدود ساختن آن به طرح بهینه‌ی سد قوسی دست یافتند [۶].

یادآوری می‌کند، مسأله‌ی بهینه‌سازی شکل سد قوسی ابعاد بزرگ و شمار زیاد متغیر طراحی دارد. به این سبب، ارائه‌ی الگوی هندسی مناسب و روش بهینه‌یابی کارا برای تحلیل این سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، اثر تابع‌های شکل سازه در حجم بهینه‌ی سدهای قوسی مطالعه می‌شود. از الگوهای بیضی، دایره‌ای، هذلولی و سهمی در این پژوهش بهره‌جویی خواهد شد. با انجام تحلیل‌های گسترده، توانایی‌های این تابع‌ها در بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی پیدا می‌شوند. فرآیند عددی برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی در برنامه‌ی رایانه‌ای نویسندگان به کار می‌رود.

۲- الگوی هندسی

برای انجام بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی، الگوی هندسی سازه باید متناسب با رفتار سد انتخاب گردد. به سخن دیگر، الگوی هندسی سد به گونه‌ای باید باشد که پخش تنش را بهبود بخشد و بتواند بهره برداری مطلوبی از توان سازه و مقاومت مصالح داشته باشد. به چند روش زیر می‌توان الگوی هندسی سد قوسی را طرح‌ریزی نمود [۱، ۳]:

روش اول- تعیین خم‌های بالادست و پایین دست به طور مستقل و همزمان.

روش دوم- تعیین خم مرکزی و ضخامت مقطع‌های آن.

روش سوم- استفاده از خم مرز بالادست و ضخامت مقطع‌های آن.

۵-۱- سد دوقوسی بیضی گونه

همانند شکل ۲، پنداشته می‌شود که مرکز بیضی بر مبدأ محوره‌های مختصات قرار دارد. در چنین دستگاهی، رابطه‌های سد دوقوسی بیضی گونه در سطح بالادست و پایین دست به صورت زیر ارائه می‌گردند:

$$\frac{X^2}{R_{xu}^2} + \frac{Y^2}{R_y^2} = 1 \quad (۴)$$

$$\frac{X^2}{R_{xd}^2} + \frac{Y^2}{R_y^2} = 1 \quad (۵)$$

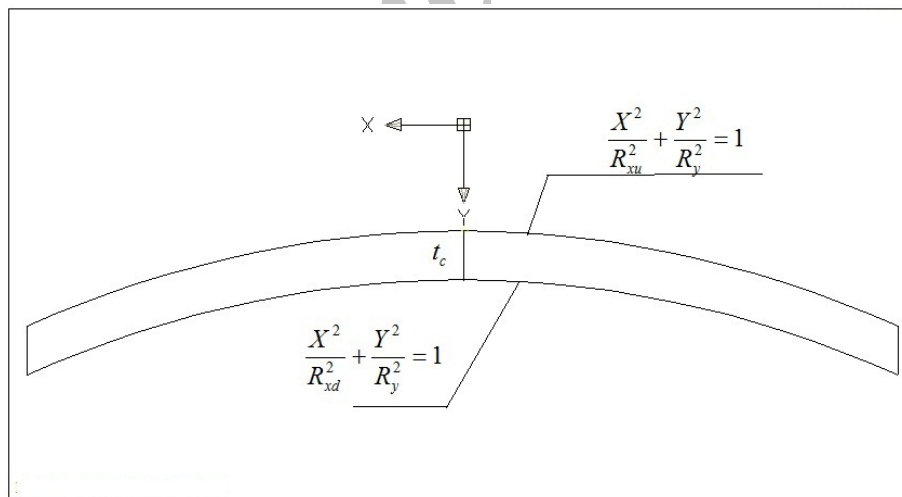
در این رابطه‌ها، R_y نیمی از قطر بیضی‌های بالادست و پایین دست در امتداد محور y می‌باشد. همچنین، R_x ها نیمی از قطر بیضی‌ها در امتداد محور x است. باید افزود، این عامل‌ها، متغیرهای طراحی این الگوی هندسی در بهینه‌سازی سد قوسی می‌باشند [۱۰].

$$L_i(z) = \frac{\prod_{k=1}^{n+1} z - z_k}{\prod_{k=1}^{n+1} z_i - z_k}, k \neq i \quad (۳)$$

در این جا، عامل z_i ارتفاع i ام مقطع قائم مرکزی را مشخص می‌کند.

۵- شکل مقطع افقی سد

برای تعریف کامل هندسه‌ی سد دوقوسی، افزون بر تعیین مقطع‌های قائم، نیاز به معرفی مقطع‌های افقی نیز می‌باشد. با توجه به نوع الگوی مقطع افقی، شکل آن به وسیله‌ی شماری متغیر طراحی تعیین می‌گردد. در این مقاله، از چهار الگوی بیضی، هذلولی، سهمی و دایره‌ای برای تعیین هندسه‌ی سد قوسی بهره جویی می‌شود. همچنین، توانایی هر یک از این تابع‌ها در بهینه‌سازی شکل سد بررسی خواهد شد. به چگونگی پخش تنش در بدنه سد نیز پرداخته می‌شود.



شکل ۲- الگوی سد دوقوسی بیضی گونه

۵-۲- سد دوقوسی هذلولی گونه

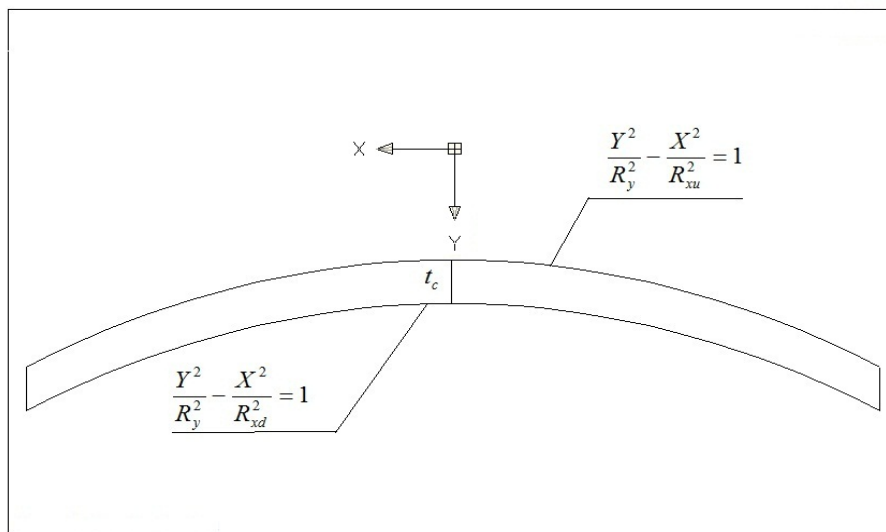
$$\frac{Y^2}{R_y^2} - \frac{X^2}{R_{xu}^2} = 1 \quad (۶)$$

$$\frac{Y^2}{R_y^2} - \frac{X^2}{R_{xd}^2} = 1 \quad (۷)$$

دستگاه مختصاتی که مبدأ محوره‌های آن بر مرکز هذلولی قرار دارد، همانند شکل ۳، اختیار می‌شود. رابطه‌های رویه‌ی بالادست و پایین دست سد دوقوسی هذلولی گونه در این دستگاه به قرار زیر در می‌آیند:

طراحی تعریف نمود.

در رابطه‌های کنونی، R_y ، R_{xu} و R_{xd} عامل‌های طراحی می‌باشند که می‌توان آن‌ها را بر پایه‌ی چند متغیر



شکل ۳- الگوی سد دوقوسی هذلولی گونه

شکل ۴ این سازه را نشان می‌دهد. رابطه‌ی سطح بالادست

سد به قرار زیر می‌باشد [۱۰]:

$$Y_u^2(x, z) = R_u^2 - X^2 \quad (8)$$

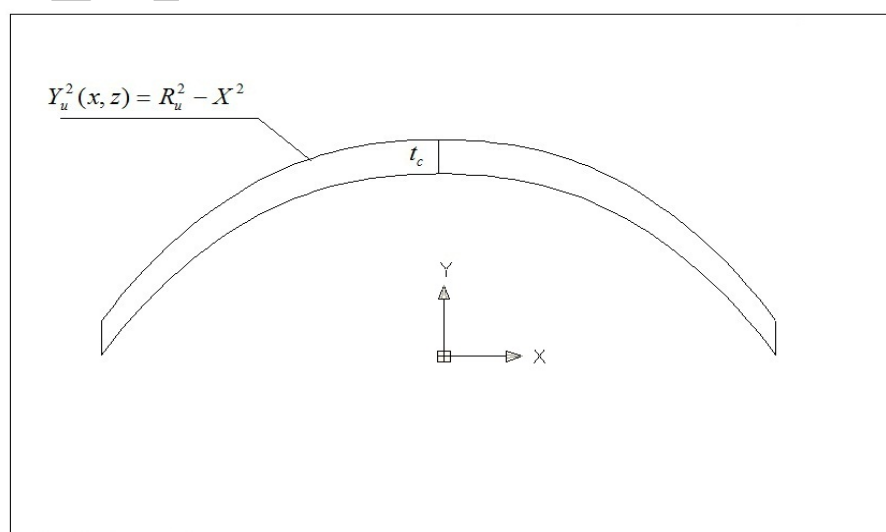
در این جا، R_u شعاع سطح بالادست قوس دایره‌ای می‌باشد و با رابطه‌ی زیر تعریف می‌گردد:

$$R_u(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times r_{ui} \quad (9)$$

در رابطه‌ی کنونی، r_{ui} شعاع سطح بالادست قوس دایره‌ای در تراز t ام می‌باشد.

۳-۵- سد دوقوسی دایره‌ای

شکل این سازه دایره‌ای یک مرکزی با ضخامت ثابت در راستای افق است. در این الگو، سطح بالادست با یک قوس دایره‌ای مشخص می‌گردد. افزون بر آن، با پنداشتن یک ضخامت ثابت، قوس سطح پایین‌دست، پیدا خواهد شد. شعاع متغیرخیم بالادست در ارتفاع‌های مختلف سبب ایجاد قوس در مقطع قائم و ایجاد سد دوقوسی می‌گردد.



شکل ۴- الگوی سد دوقوسی دایره‌ای

۴-۵- سد دوقوسی سهمی گونه

می‌باشند. این عامل‌ها به صورت زیر حساب می‌شوند
[۱۰]:

$$r_u(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times r_{ui} \quad (12)$$

$$r_d(z) = \sum_{i=1}^{n+1} L_i(z) \times r_{di} \quad (13)$$

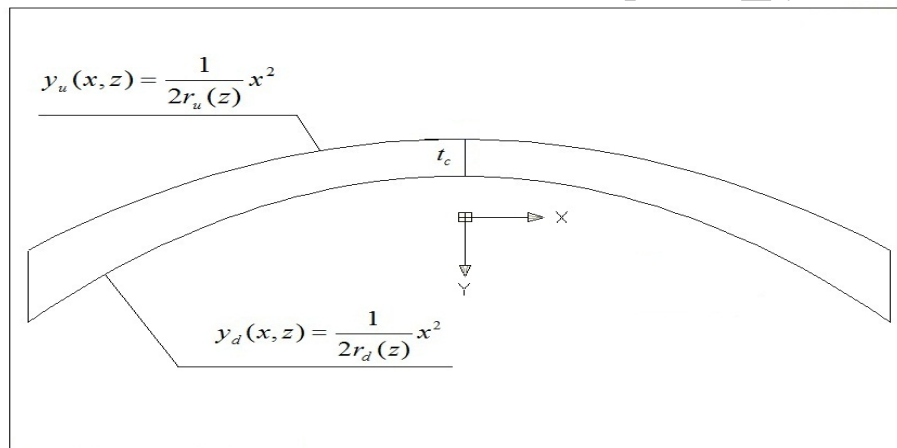
در این جا، r_{ui} و r_{di} ، به ترتیب، مقدارهای r_u و r_d در سطح i ام می‌باشند. این عامل‌ها به عنوان متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه‌سازی به کار می‌روند.

مقطع‌های افقی در این الگوی دو رابطه‌ی سهمی متفاوت که یکی برای رویه‌ی بالادست (y_u) و دیگری برای رویه‌ی پایین‌دست (y_d) است، تشکیل می‌گردد [۸]. این دو تابع به قرار زیر نوشته می‌شوند:

$$y_u(x, z) = \frac{1}{2r_u(z)} x^2 \quad (10)$$

$$y_d(x, z) = \frac{1}{2r_d(z)} x^2 + t(z) \quad (11)$$

در این رابطه‌ها، $r_u(z)$ و $r_d(z)$ ، به ترتیب، شعاع سهمی سطح بالادست و شعاع سهمی سطح پایین دست



شکل ۵- الگوی سد دوقوسی سهمی گونه

۶- بهینه‌سازی سد

Subject to $g_j(X) \leq 0; j = 1, 2, \dots, p$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u; i = 1, \dots, m$$

در این جا، $f(X)$ تابع هدف، X بردار متغیرهای طراحی، $g_j(X)$ بیانگر j امین قید و x_i^l و x_i^u ، به ترتیب، حد بالا و پایین متغیرهای طراحی است. همچنین، m و p ، به ترتیب، برابر با شمار متغیرهای طراحی و تعداد قیدها می‌باشند.

۱-۶- تابع هدف

تابع هدف به صورت رابطه‌ای برپایه‌ی هزینه‌های ساختمانی طرح نوشته می‌شود. ارزش این تابع

الگوی مسأله‌ی بهینه‌سازی، افزون بر به کارگیری کلیه‌ی ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و هندسی طرح، باید بتواند چگونگی رفتار سازه در برابر بارهای وارد را نیز ارائه نماید. همچنین، باید کلیه‌ی قیدهای طراحی و اجرایی مورد نیاز برای رسیدن به طرح مناسب را در بر بگیرد [۱۱]. رابطه‌های بهینه‌سازی شکل سد قوسی را می‌توان به صورت یک مسأله‌ی برنامه‌ریزی ناخطی مقید و به شکل زیر نوشت:

$$\text{Minimize } f(X) \quad (14)$$

$$0 \leq s \leq 0.3 \quad (16)$$

$$0.5 \leq B \leq 1.0 \quad (17)$$

در این رابطه‌ها، s و B ، به ترتیب، شیب خم قائم در تاج سد و ضریب ارتفاعی است که در آن شیب خم قائم صفر می‌گردد. چنانچه نیاز باشد، محدودیت عرض تاج سد و محدودیت عرض پایه‌ی سازه برای نیازهای ترافیکی و سایر عامل‌های طراحی، وارد تحلیل خواهد شد.

۶-۳-۲- محدودیت‌های تنشی

به صورت کلی، این قیدها با در نظر گرفتن تنش‌های فشار آب ایستا، فشار خاک، تغییرهای دما، بارهای مرده و بارهای پویا به کار می‌روند [۶]. در این پژوهش، قیدهای تنشی بر پایه‌ی بارگذاری فشار آب ایستا و وزن بدنه‌ی سد به صورت زیر محدود می‌شوند:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{1all} \quad (18)$$

$$\sigma_3 \leq \sigma_{3all} \quad (19)$$

در این رابطه‌ها، σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی کششی و فشاری‌اند. این تنش‌ها در گره‌ی جزء‌ها حساب خواهند شد. همچنین، σ_{1all} و σ_{3all} ، به ترتیب، مقدارهای مجاز تنش‌های کششی و فشاری می‌باشند. این مقدارها در این مقاله، به ترتیب، برابر با ۲۰ و ۸۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع پنداشته می‌شوند.

۶-۳-۳- محدودیت‌های پایداری

بسته به نوع و ارتفاع سد و شرط‌های تکیه‌گاهی سازه، قیدهای تضمین کننده‌ی پایداری سد در برابر لغزش وارد تحلیل می‌گردند. در سدهای قوسی دو نوع قید پایداری لغزشی وجود دارد که به طور معمول در سدهای کوچک یکی از این قیدها و در سدهای بزرگ قید دیگر حاکم می‌شود [۷]. برای سدهای کوچک، با ارتفاع کمتر از ۳۰ متر، قید زیر باید برقرار شود:

$$\theta \leq \theta_{all} \quad (20)$$

دربگیرنده‌ی هزینه‌های بتن بدنه‌ی سد و گود برداری پی سد می‌باشد [۱۲].

$$C(x) = c_1 v_1(x) + c_2 v_2(x) \quad (15)$$

در رابطه‌ی کنونی، v_1 و v_2 ، به ترتیب، حجم بتن ریزی بدنه‌ی سد و حجم خاکبرداری برای پی است. همچنین c_1 و c_2 ، هزینه‌های یکای بتن ریزی و کندن پی است. باید دانست، هزینه کندن پی خیلی کمتر از بهای بتن بدنه‌ی سد می‌باشد، بنابراین، حجم بدنه‌ی سد به عنوان تابع هدف به کار می‌رود.

۶-۲- متغیرهای طراحی

در بهینه‌سازی سازه‌ها، هر طرحی به شماری از متغیرهای مستقل بستگی دارد که به آن‌ها متغیرهای طراحی گویند [۱۳]. در مسأله‌ی بهینه‌سازی سدهای قوسی متغیرهای طراحی شامل عامل‌های تشکیل دهنده‌ی هندسه‌ی سازه می‌باشند. این متغیرها دربرگیرنده‌ی عامل‌های تعیین کننده‌ی موقعیت سد، عامل‌های مشخص کننده‌ی ضخامت طره‌ی مرکزی سد و عامل‌های نشان دهنده‌ی شکل مقطع افقی سد می‌باشند.

۶-۳-۳- قیدهای بهینه‌سازی

در مسأله‌ی بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی، محدودیت‌ها شامل سه دسته می‌باشند. آن‌ها، قیدهای هندسی، تنشی و پایداری نام دارند. در ادامه‌ی مقاله، قیدهای بهینه‌سازی سدهای دو قوسی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۶-۳-۱- محدودیت‌های هندسی

برای آسان کردن اجرای سد، میزان شیب و برآمدگی در سطح‌های بالادست و پایین دست نسبت به پنجه‌ی سد باید محدود گردند [۸، ۱۴]. از این رو، نابرابری‌های زیر برای این قیدها به کار می‌روند:

$$\begin{cases} \min(\nabla f(x))^t d + \frac{1}{2} d^t H d \\ g_j(x) + (\nabla g_j(x))^t d \leq 0; j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (22)$$

در برنامه‌ی کنونی، $d_x = x^{k+1} - x^k$ بردار جستجو، H^k ماتریس هسیان، $\nabla f(x)$ بردار گرادیان تابع هدف و $\nabla g_j(x)$ بردار گرادیان محدودیت‌ها می‌باشند. همچنین، در این برنامه‌ریزی درجه دوم، $d^k = (1 - \rho)d_0^k + \rho d_1^k$ و $0 < \rho \leq 1$ است. باید دانست، d_0^k یک جهت کاهشی برای تابع هدف $f(x)$ می‌باشد. برای یافتن جهت پذیرفتنی در هر مرحله از جهت اصلاحی d_1^k استفاده می‌گردد که از حل برنامه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\min \|d_1\|^2 + \max\{(\nabla f)^t d_1; \max\{g_j(x) + (\nabla g_j(x))^t d_1\}\} \quad (23)$$

باید دانست، گاهی در حل زیر برنامه‌ی درجه دوم حالتی به وجود می‌آید، که در نزدیکی پاسخ بهینه پذیرفتنی، طول گام برابر با یک نمی‌گردد و همگرایی مرتبه‌ی دوم به دست نمی‌آید. این پدیده را اثر ماراتوس می‌نامند. برای دوری جستن از اثر ماراتوس، جهت اصلاحی مرتبه‌ی دوم \bar{d} با حل یک زیر برنامه‌ی درجه دوم دیگر حساب می‌گردد. این عامل به قرار زیر پیدا می‌شود [۱۸]:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|\bar{d}\|^2 \\ g_j(x + \bar{d}) + (\nabla g_j(x))^t \bar{d} = -\|\bar{d}\|^r \end{cases} \quad (24)$$

جهت پذیرفتنی با استفاده از رابطه‌ی زیر در دسترس قرار می‌گیرد:

$$x^{k+1} = x^k + t d^k + t^2 \bar{d}^k \quad (25)$$

عامل t ، نخستین عدد از مجموعه‌ی $\{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\}$

می‌باشد که دو رابطه‌ی زیر را برقرار نماید:

$$f(x^{k+1}) \leq f(x^k) + \alpha t (\nabla f(x))^t d; \alpha \in (0, \frac{1}{2}) \quad (26)$$

$$g_j(x^{k+1}) \leq 0; j = 1, \dots, p \quad (27)$$

برنامه‌ی کنونی بر پایه‌ی شیوه‌ی پانیر تیتس می‌باشد که حجم محاسبه‌ی بالایی دارد. ژو و جیان این راه‌کار را بهبود بخشیدند و حجم محاسبه‌ی آن را کاهش دادند [۱۹، ۲۰].

در رابطه‌ی کنونی، θ زاویه‌ی بین واکنش تکیه‌گاه‌های قوس و امتداد تکیه‌گاه‌ها است و θ_{all} کمینه‌ی زاویه‌ی مجاز می‌باشد، که به‌طور معمول ۳۰ درجه می‌پندارند. از سوی دیگر، برای سدهای بزرگ محدودیت زیر باید برای تأمین پایداری لغزشی به کار رود:

$$\phi^l \leq \phi_i \leq \phi^u \quad (21)$$

در این نابرابری‌ها، ϕ_i زاویه مرکزی سد قوسی در ترازهای ارتفاعی گوناگون می‌باشد. به‌طور معمول، این قیده‌ها زاویه‌ی مرکزی قوس‌های رابه $90 \leq \phi_i \leq 130$ درجه محدود می‌نماید.

۷- روش بهینه‌سازی

آشکار می‌باشد، از میان فن‌های بهینه‌سازی، آن گونه‌ای شیوه‌ی مناسب است که افزون بر وارد کردن جنبه‌ی ریاضی مسئله، بتواند راه‌کارهای کاربردی را وارد تحلیل کند. فرآیند فراوانی را می‌توان برای بهینه‌سازی سدهای قوسی به کار گرفت. در این مقاله، از روش برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی بهره‌جویی می‌شود که شرح کوتاهی از آن در ادامه می‌آید.

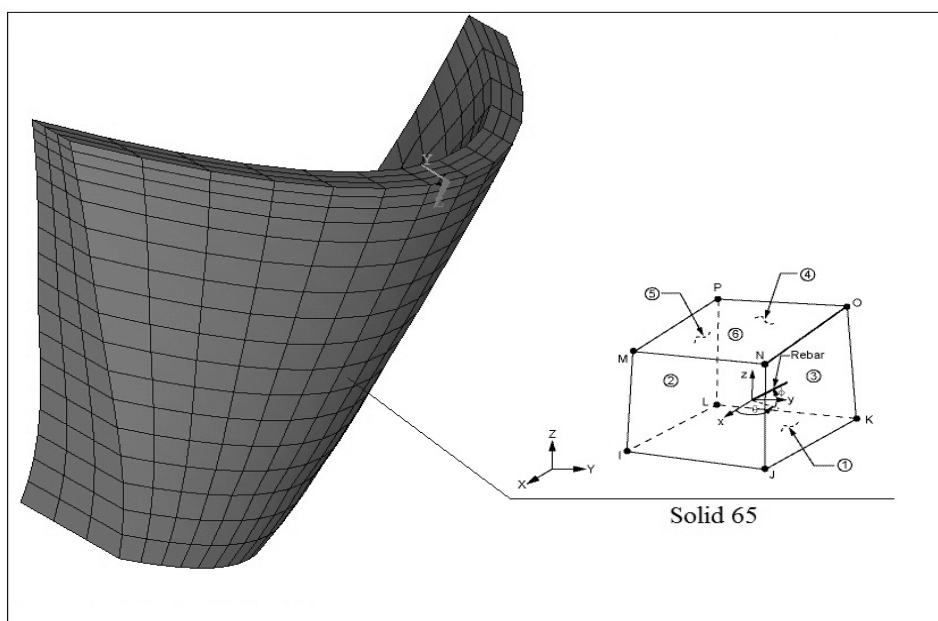
۸- برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی

راه‌کار جهت پذیرفتنی دارای دو گونه همگرایی خطی و ابرخطی است [۱۵]. پانیر و تیتس با استفاده از زیربرنامه درجه دوم، به فرآیند جدیدی به نام برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی دست یافتند [۱۶]. این شیوه، به دلیل استفاده از زیر برنامه‌ی درجه دوم، همگرایی ابرخطی دارد. برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی پذیرفتنی یکی از جدیدترین و توانمندترین راه‌کارهای برنامه‌ریزی درجه دوم پیاپی می‌باشد. رابطه‌های ریاضی این برنامه به صورت زیر می‌باشند [۱۷]:

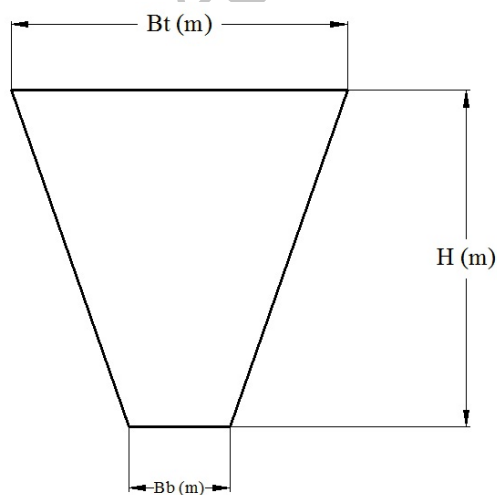
طراحی تعریف می‌گردد. سپس، با تغییر دادن عامل‌ها، تغییرهایی در متغیرهای طراحی در هر چرخه از بهینه سازی به وجود می‌آید و این فرآیند به طرح جدیدی از سد می‌انجامد [۲۲]. از جزء Solid65 برای ایجاد بدنه‌ی سد و شبکه بندی استفاده می‌گردد. این جزء هشت گره دارد و در هر گره آن سه درجه آزادی وجود دارد. شکل ۶ این جزء را نشان می‌دهد [۲۳]. در تمامی تحلیل‌های این اثر، خطی بودن رفتار سازه، کوچک بودن تغییر شکل‌ها و تغییر مکان‌ها و ناچیز بودن اثر دما پنداشته می‌شوند.

۹- پنداره‌های تحلیل

در این پژوهش، اندازه‌های شکل نخستین سازه، بارگذاری‌ها و ضریب‌های اطمینان طراحی بر پایه‌ی معیارهای آیین‌نامه‌ی USBR می‌باشند [۲۱]. از بارهای فشار آب ایستا و وزن مرده‌ی بدنه‌ی سد برای تحلیل ایستایی سد بهره‌جویی شده است. در این مقاله، قابلیت زبان طراحی عاملدار نرم افزار ANSYS برای الگوسازی و تحلیل سد به‌کار رفته است. بر پایه‌ی این زبان رایانه‌ای، عامل‌های الگوی هندسی سد قوسی برحسب متغیرهای



شکل ۶- جزء Solid65



شکل ۷- عامل‌های شکل دره

۱۰- نمونه‌های عددی

در ادامه کار، چندین سد دوقوسی بتنی با الگوهای مختلف هندسی بهینه سازی خواهند شد. تمامی الگوهای هندسی در شش تراز ارتفاعی تقسیم بندی می‌شوند. بنابراین، در همه‌ی الگوهای هندسی شش متغیر ضخامت طره قائم مرکزی وجود دارد. شکل ۷ عامل‌های شکل دره‌ی سد را نشان می‌دهد. در این مقاله، چهار نمونه‌ی سد دوقوسی، که مشخصه‌های هندسی و مکانیکی آن‌ها در جدول ۱ آمده‌اند، تحلیل خواهند شد [۱۴، ۲۴].

جدول ۱- مشخصه‌های هندسی و مکانیکی سدها

	$H(m)$	$Bt(m)$	$Bb(m)$	$E(kg/cm^2)$	ν
نمونه‌ی یکم	80	180	60	2.2×10^5	0.2
نمونه‌ی دوم	100	240	40	2×10^5	0.2
نمونه‌ی سوم	143	221	16	2.7×10^5	0.2
نمونه‌ی چهارم	180	250	70	2×10^5	0.2

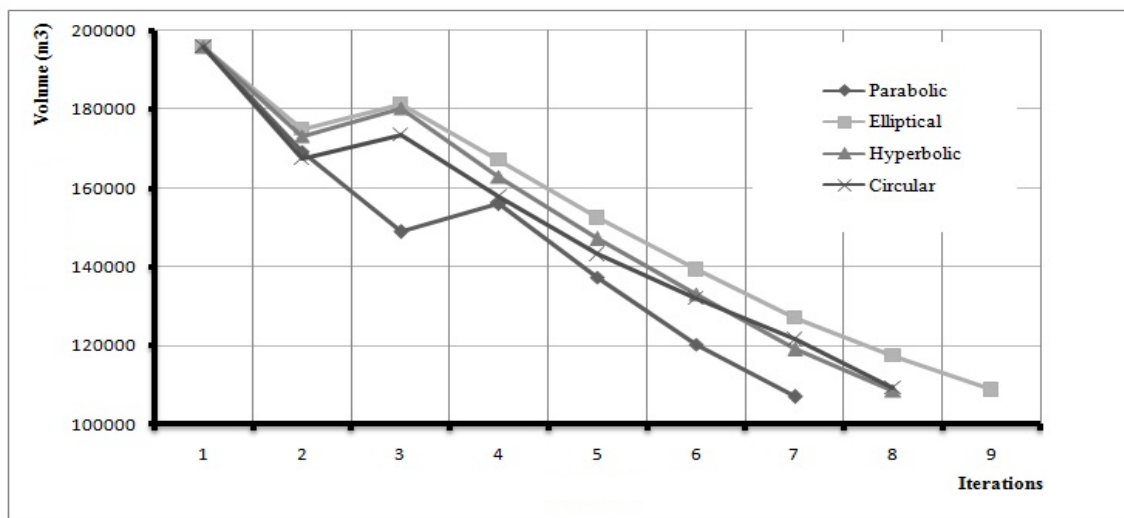
برنامه‌ی رایانه‌ای بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی بتنی بر پایه‌ی روش برنامه‌ریزی درجه دوم پیایی پذیرفتنی و توسط نویسندگان با زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده است. حجم این چهار نمونه‌ی سد با بهره‌جویی از این برنامه‌ی رایانه‌ای بهینه شده‌اند. جدول ۲ حجم بهینه‌ی سازه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲- حجم بهینه‌ی سد با چهار الگوهای هندسی (متر مکعب)

الگوهای هندسی	نمونه‌ی یکم	نمونه‌ی دوم	نمونه‌ی سوم	نمونه‌ی چهارم
بیضی گونه	۱۰۸۷۴۰	۲۰۷۲۳۰	۲۱۵۱۶۰	۳۲۲۶۱۰
هذلولی گونه	۱۰۸۵۵۰	۲۰۸۱۵۰	۲۱۴۵۴۰	۳۲۱۹۳۰
دایره‌ای	۱۰۹۳۵۰	۲۱۰۴۲۰	۲۱۷۱۷۰	۳۲۴۳۸۰
سه‌می گونه	۱۰۶۹۸۰	۲۰۴۵۲۰	۲۱۰۳۰۰	۳۱۶۴۸۰

شکل‌های ۸ تا ۱۱ روند کاهش حجم بدنه‌ی سد را تا رسیدن به سازه‌ی بهینه برای این نمونه‌های عددی نشان می‌دهند. همچنین، در این نمودارها شمار تکرارهای بهینه‌سازی برای چهار تابع هندسی به نمایش در می‌آیند.

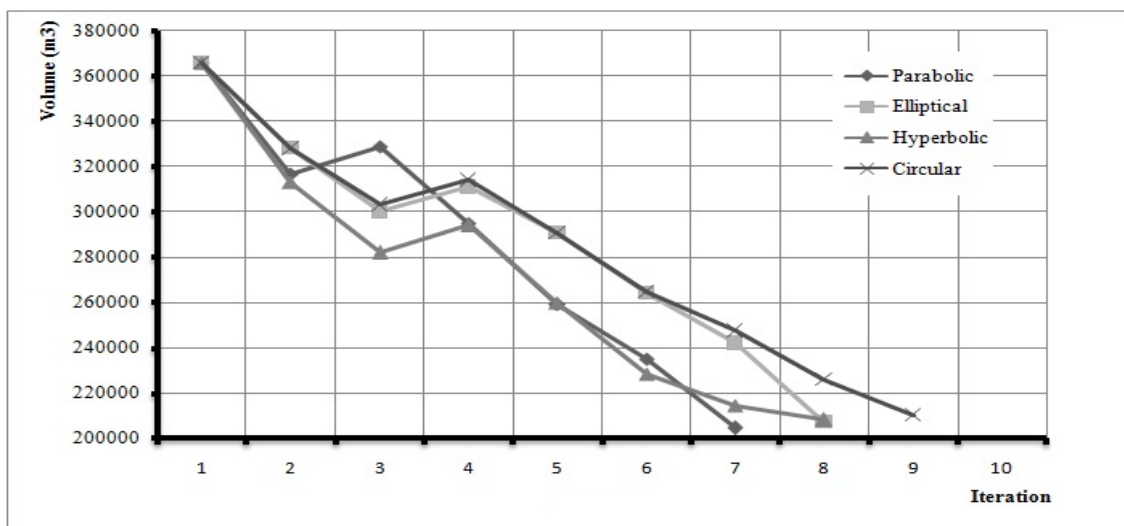
شکل‌های ۸ تا ۱۱ روند کاهش حجم بدنه‌ی سد را تا رسیدن به سازه‌ی بهینه برای این نمونه‌های عددی نشان می‌دهند. همچنین، در این نمودارها شمار تکرارهای بهینه‌سازی برای چهار تابع هندسی به نمایش در می‌آیند.



شکل ۸- شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی اول

بر پایه‌ی نتیجه‌های شکل ۸، حجم بهینه‌ی سد برای الگوهای دایره‌ای و هذلولی با هشت تکرار به دست آمده‌اند. شکل بیضی به نه تکرار نیاز دارد. سد سه‌می گونه با کمترین شمار تکرار (۷) به شکل بهینه همگرا شده است.

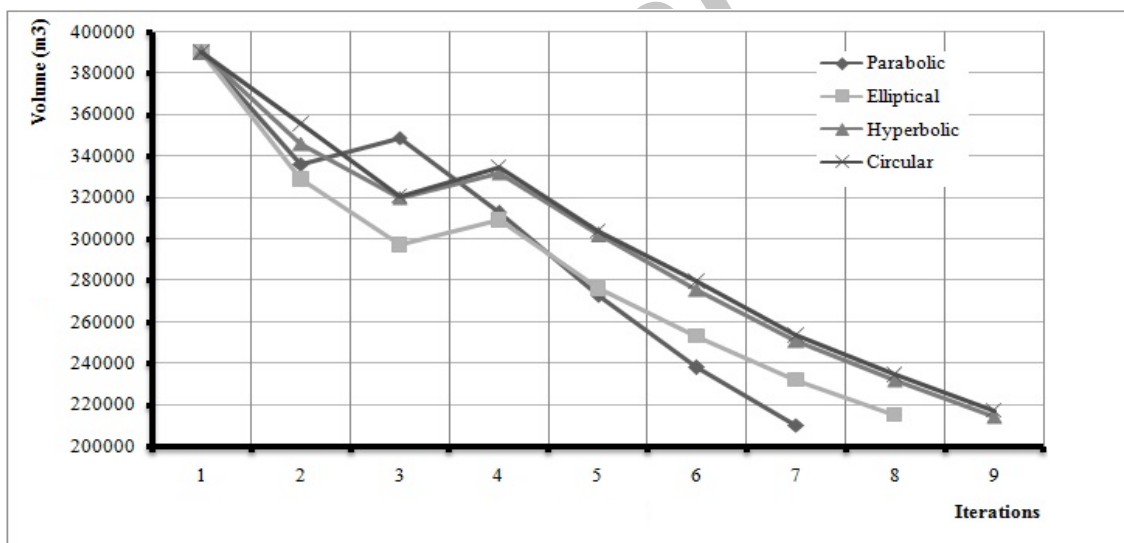
بر پایه‌ی نتیجه‌های شکل ۸، حجم بهینه‌ی سد برای الگوهای دایره‌ای و هذلولی با هشت تکرار به دست آمده‌اند. شکل بیضی به نه تکرار نیاز دارد. سد سه‌می گونه با کمترین شمار تکرار (۷) به شکل بهینه همگرا شده است.



شکل ۹- شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی دوم

با بیشترین شمار تکرار (۹) به شکل بهینه همگرا شده است.

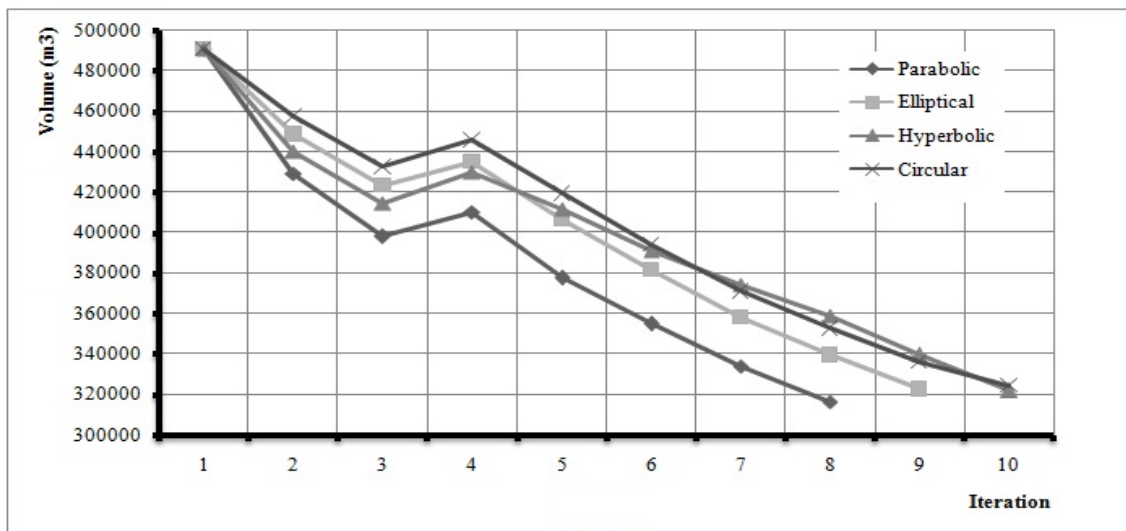
آن گونه که شکل ۹ نشان می‌دهد، حجم بهینه‌ی سد برای الگوهای بیضی و هذلولی با هشت تکرار به دست آمده‌اند. شکل سهمی به هفت تکرار نیاز دارد. سد دایره‌ای



شکل ۱۰- شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی سوم

شکل بیضی به هشت تکرار نیاز دارد. سد سهمی گونه با کمترین شمار تکرار (۷) به شکل بهینه همگرا شده است.

بر پایه‌ی نتیجه‌های شکل ۱۰، حجم بهینه‌ی سد برای الگوهای دایره‌ای و هذلولی با نه تکرار به دست آمده‌اند.



شکل ۱۱- شمار چرخه‌های بهینه‌سازی در نمونه‌ی چهارم

مشخص شوند، رابطه‌ی زیر تنش فون مسیز f_p را در دسترس قرار می‌دهد [۱۴]:

$$f_p = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (28)$$

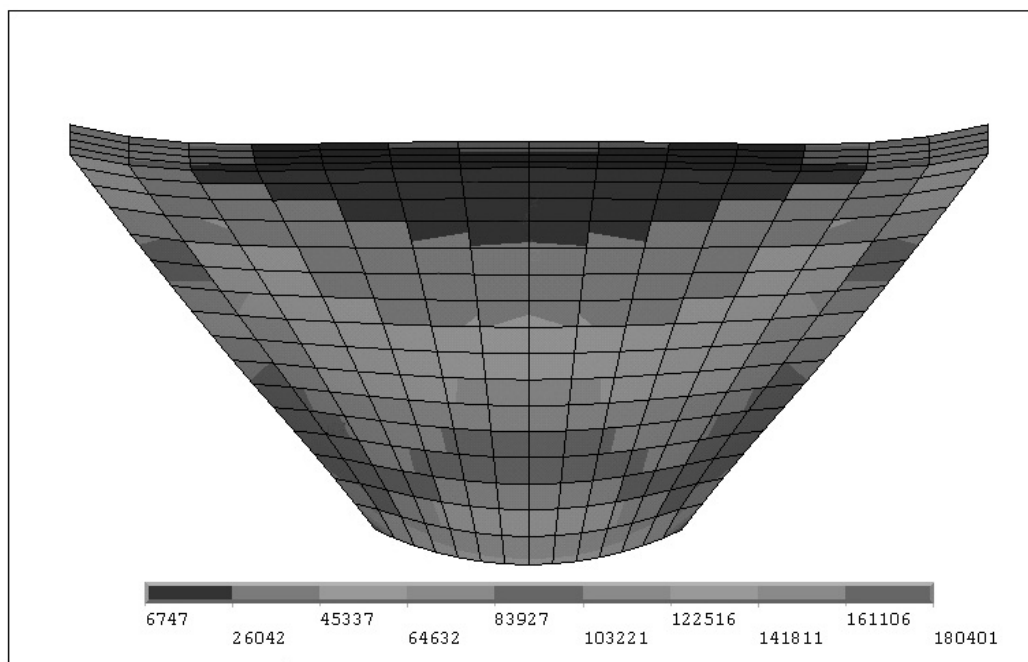
پس از انجام بهینه‌سازی، اثر شکل هندسی سدها بر پخش تنش یکی از سازه‌ها بررسی می‌شود. شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نحوه‌ی پخش تنش فون مسیز را در بدنه‌ی سد قوسی نمونه‌ی عددی اول برای چهار الگوی هندسی گوناگون نشان می‌دهد. باید افزود که تنش‌ها در گره‌های جزءها محاسبه شده‌اند و یکای آن‌ها کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد.

بر پایه‌ی پخش تنش شکل ۱۲، بیشینه‌ی تنش در تکیه‌گاه‌های کناری سد قوسی بیضی نمایان می‌باشد و مقدار آن برابر با ۱۸۰۴۰۱ کیلوگرم بر متر مربع است.

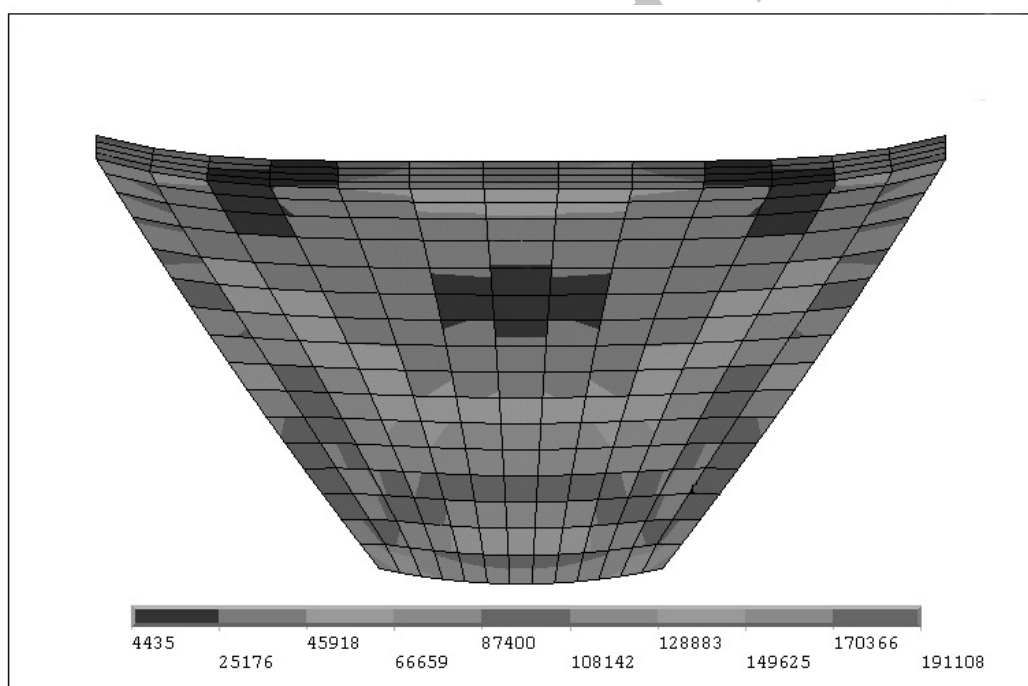
آن گونه که شکل ۱۱ نشان می‌دهد، حجم بهینه‌ی سد برای الگوهای دایره‌ای و هذلولی با ده تکرار به دست آمده‌اند. شکل بیضی به نه تکرار نیاز دارد. سد سهمی گونه با کمترین شمار تکرار (۸) به شکل بهینه همگرا شده است.

۱۱- پخش تنش

یکی دیگر از معیارهای کارایی سد های بتنی، چگونگی پخش تنش در این سازه‌ها است. در ادامه کار، به اثر شکل هندسی سد در این پدیده‌ی مهم پرداخته می‌شود. اگر تنش‌های اصلی، به ترتیب، با نشانه‌های σ_1 ، σ_2 و σ_3



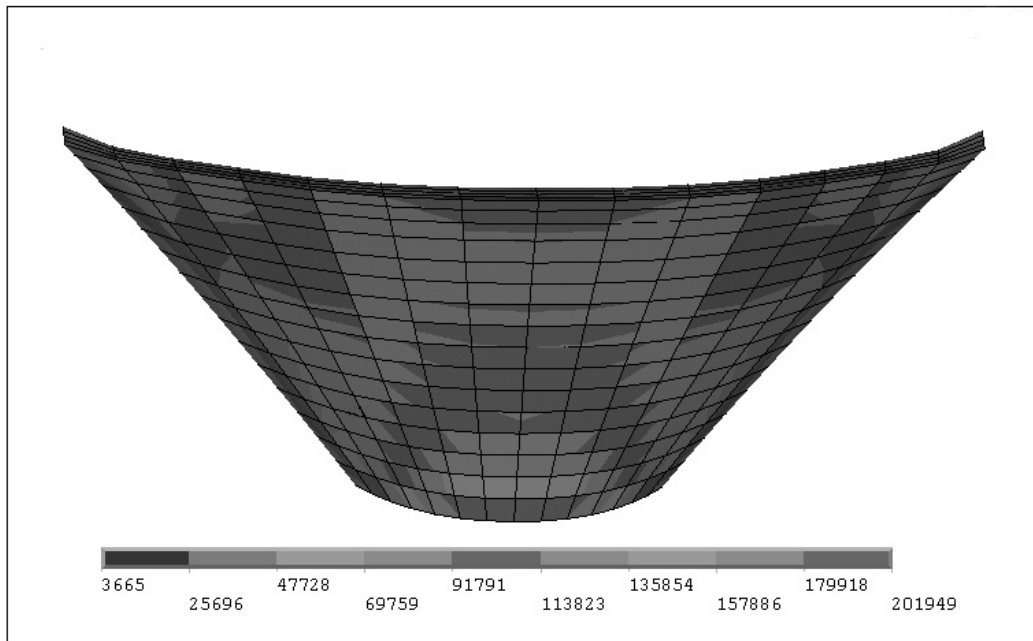
شکل ۱۲- پخش تنش فون میسز در الگوی بیضی



شکل ۱۳- پخش تنش فون میسز در الگوی هذلولی

وجود می‌آید و مقدار آن برابر با ۱۹۱۱۰۸ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد.

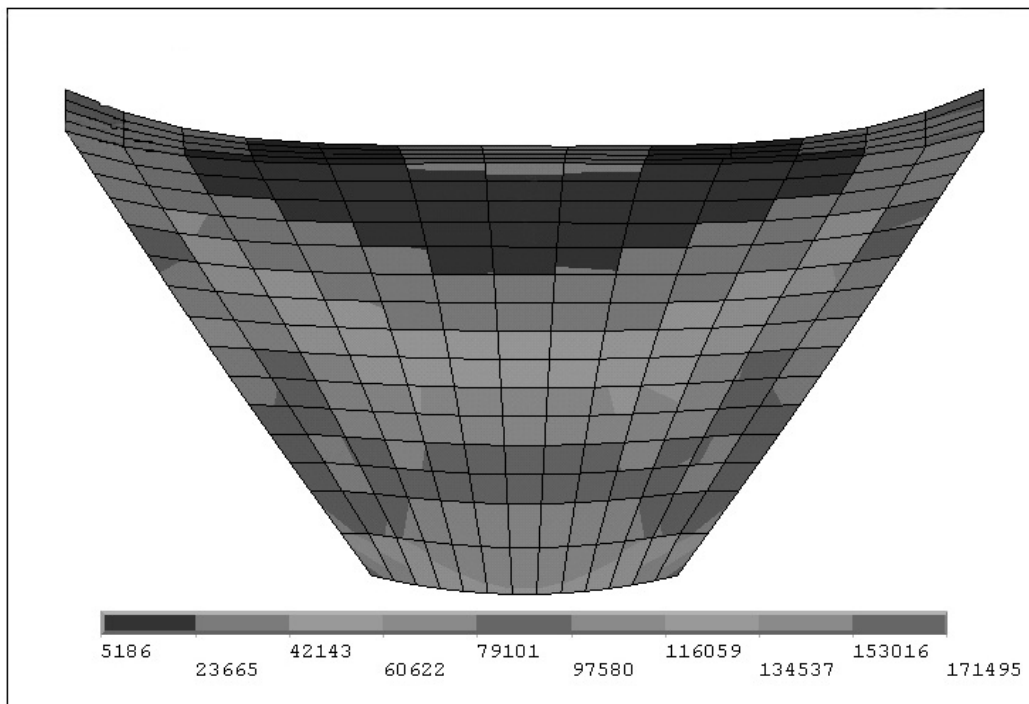
آن گونه که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، بیشینه‌ی تنش فون میسز در تکیه‌گاه‌های کناری و کف سد قوسی هذلولی به



شکل ۱۴- پخش تنش فون میسز در الگوی دایره‌ای

باید افزود، بیشینه‌ی تنش در الگوی دایره‌ای در تکیه‌گاه کف سد قوسی ایجاد می‌شود.

بر پایه‌ی پخش تنش شکل ۱۴، بیشینه‌ی تنش سد دایره‌ای برابر با ۲۰۱۹۴۹ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد.



شکل ۱۵- پخش تنش فون میسز در الگوی سهمی‌گونه

سهمی‌گونه برابر با ۱۷۱۴۹۵ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد.

آن‌گونه که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، بیشینه‌ی تنش‌ها در تکیه‌گاه‌های کناری و کف سد قوسی سهمی شکل به وجود می‌آید. بیشینه‌ی تنش فون میسز در الگوی

باشد. در این پژوهش، برای بهینه‌سازی سد قوسی از روش برنامه‌ریزی درجه دوم پیایی پذیرفتنی بهره‌جویی شد. این فن یکی از کاراترین و توانمندترین شیوه‌ی برنامه‌ریزی درجه دوم است که توانایی همگرایی خوبی به پاسخ بهینه نیز دارد. بر پایه‌ی پاسخ‌های دریافتی از فرآیند بهینه‌سازی، شکل هندسه‌ی سهمی گونه، افزون بر کمتر کردن تابع هدف، روند همگرایی خوبی نسبت به سایر الگوها دارد. نتیجه‌های عددی نشان دادند که هر چه ارتفاع سد افزایش یابد، هزینه‌های الگوی سهمی گونه نسبت به شکل‌های دیگر کاهش می‌یابد. جمع تکرارهای چهار بهینه‌سازی برای سهمی ۲۹، بیضی ۳۴، هذلولی ۳۴ و دایره‌ای ۳۶ می‌باشند. بنابراین، الگوی سهمی گونه، افزون بر دادن کمترین حجم سد، نیاز به شمار تکرار بهینه‌سازی کمتری نسبت به سایر شکل‌ها دارد. بنابراین، سد سهمی شکل با زمان کمتری بهینه‌یابی می‌شود. افزون بر این‌ها، سد با شکل سهمی پخش تنش‌های بهتری را نشان می‌دهد. منظور از بهبود تنش‌ها، بهتر شدن تغییرهای تنش‌ها در بدنه‌ی سد و به ویژه تکیه‌گاه‌ها است. این بهبود پخش تنش‌ها در شکل نهایی الگوها و نسبت به یکدیگر می‌باشند.

بر پایه‌ی چگونگی پخش تنش فون میسز در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، الگوهای هندسه‌ی هذلولی و سهمی تغییرهای تنش بهتری نسبت به سایر الگوها دارند. همچنین، بیشترین تنش‌های این دو الگو در تکیه‌گاه‌های کناری و کف ایجاد شده‌اند. با وجود این‌ها، الگوی هندسه‌ی سهمی مقدار تنش کمتری را نشان می‌دهد. خاطر نشان می‌کند، در بیشتر نمونه‌های عددی این مقاله، سدهای سهمی شکل کارایی بهتری در پخش تنش از خود نمایان کرده‌اند.

۱۲- نتیجه‌گیری

سدهای قوسی سازه‌هایی هستند که هزینه‌ی ساخت بسیار بالایی دارند. در این مقاله، برای کاهش هزینه‌ی سد با بهره‌گیری از چندین الگوی هندسه‌ی، حجم بدنه‌ی سد قوسی بهینه‌یابی شد. آشکار می‌باشد، شکل سازه‌ای که افزون بر کمتر کردن هزینه‌ها بتواند سازگاری بهتری با محدودیت‌های طراحی داشته باشد، مناسب‌تر است. همچنین، الگوی هندسه‌ی سهمی باید مجموعه‌ی کاملی از متغیرهای طراحی برای بهینه‌سازی شکل سازه را داشته

مراجع

- [1] Bofang, Z. (1992), "Shape optimization of arch dams for static and dynamic loads", Journal of structural engineering, Vol. 118, pp. 1310-1330.
- [2] Sharpe, R. (1992), "The optimum design of arch dams", Institution of civil engineers (ICE), Vol. 72005, pp. 73-98.
- [3] Yao, T.M., Choi, K.K. (1992), "Shape optimal design of an arch dam", Journal of structural engineering, Vol. 115, pp. 2401-2405.
- [4] Seyedpoor, S.M., Salajegheh, J., Salajegheh, E., Gholizadeh, S. (2009), "Optimum design of arch dams subjected to earthquake loading by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and particle swarm algorithms", Applied soft computing journal, Vol. 11, pp. 39-48.
- [5] Seyedpoor, S.M., Salajegheh, J., Salajegheh, E. (2010), "Shape optimal design of arch dams including dam-water-foundation rock interaction using a grading strategy and approximation", Applied mathematical modeling, Vol. 34, pp. 1149-1163.
- [6] Gholizadeh, S., Seyedpoor, S.M. (2011), "Optimum design of arch dams for frequency limitations", International journal of optimization in civil engineering, Vol. 1, pp. 1-14.

- [7] Seyedpoor, S.M., Gholizadeh, S. (2008), "Optimum shape design of arch dams by a combination of simultaneous perturbation stochastic approximation and genetic algorithm methods", *Advances in structural engineering*, Vol. 11, pp. 501-510.
- [8] Hamidian, D., Seyedpoor, S.M. (2010), "Shape optimal design of arch dams using an adaptive neuro-fuzzy inference system and improved particle swarm optimization", *Applied mathematical modeling*, Vol. 34, pp. 1574-1585.
- [9] Shouyi, L., Lujun, D., Lijuan, Z., Wei, Z. (2009), "Optimization design of arch dam shape with modified complex method, *Advances in engineering software*", Vol. 40, pp. 804-808.
- [10] Bofang, Z. (1990) "Optimal design of arch dam, *Journal of dam engineering*, Vol. 1, pp. 131-145.
- [11] Antoniou, A., Lu, W.S. (2007), "Practical optimization: algorithm and engineering practical, Springer, New York.
- [12] Xiao-fei, Z., Shou-yi, L., Yao-long, C. (2009), "Optimization of geometric shape of xiamen arch dam", *Advances in engineering software*, Vol. 40, pp. 105-109.
- [13] Arora, J.S. (2004), "Introduction to optimum design", University of Iowa, ISBN 0-12-064155-0, second edition.
- [14] Seyedpoor, S.M., Salajegheh, J., Salajegheh, E., Gholizadeh, S. (2009), "Optimum shape design of arch dams for earthquake loading using a fuzzy inference system and wavelet neural networks", *Engineering optimization*, Vol. 41 pp. 473-493.
- [15] Kostreva, M.M., Chen, X. (2000), "A superlinearly convergent method of feasible directions", *Applied mathematics and computation*, Vol. 116, pp. 231-244.
- [16] Panier, E.R., Tits, A.L. (1993), "On combining feasibility descent and super linear convergence in inequality constrained optimization", *Mathematical programming*, Vol. 59, pp. 261-276.
- [17] Lawrence, C.T., Tits, A.L. (2001), "A computationally efficient feasible sequential quadratic programming algorithm, *SIAM J. Optim.*, Vol. 11, pp. 1092-1118.
- [18] Wright, S.J., Nocedal, J. (2006), "Numerical optimization, Springer", New York.
- [19] Zhu, Z. (2006), "A simple feasible SQP algorithm for inequality constrained optimization", *Applied mathematics and computation*, Vol. 182, pp. 987-998.
- [20] Jian, J.B., Tang, C.M., Hu, Q.J., Zheng, H.Y. (2005), "A feasible descent SQP algorithm for general constrained optimization without strict complementarity", *Journal of computation and applied mathematics*, Vol. 180, pp. 391-412.
- [21] U. S. B. R. (1977), "Design of arch dam", Design manual for concrete arch dams, U.S. Government printing office.
- [22] ANSYS Help System, Release 12.0.
- [23] Moaveni, S. "Finite element analysis", Theory and application with ansys, ISBN 0-13-785098-0.
- [24] Creager, W.P., Justin, J.D., Hinds, J. (1969), "Engineering for dams", Jons Wiley, Inc.