

طراحی شکل سدهای بتنی قوسی با استفاده از اسپیلاین های هرمیتی

جلال اکبری^۱، محمد تقی احمدی^{۲*} و پیتریان پال^۳

^۱ دانشجوی دکتری بخش عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استاد بخش عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی برلین آلمان

(تاریخ دریافت ۸۵/۲/۳۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۶/۱، تاریخ تصویب ۸۶/۶/۱۰)

چکیده

در گذشته، مدل سازی بدنه سدها با استفاده از مجموعه ای از چندجمله ای های درجه دو یا سه انجام می گرفت. لیکن جزئیاتی نظیر پیاده سازی محل درزه ها، نقاط شروع ضخامت متغیر در قوس های افقی، حفاری در تکیه گاه ها و غیره نادیده گرفته می شدند. هم چنین در حالی که در قسمتی از شکل ساختگاه، نقطه عطفی وجود داشت، این معادلات فاقد دقت لازم بودند. در این مقاله یک فرمول بندی جدید برای طراحی شکل سدهای بتنی قوسی با الگوی قوس افقی سهموی ارائه شده است. در این تحقیق با استفاده از ۳۸ پارامتر جزئیات شکل هندسی سدها با معادلات اسپیلاین درجه سه مدل سازی می شود که این پارامترها برای استفاده در بهینه سازی شکل سد بعنوان متغیرهای طراحی تلقی می شوند. یکی از خواص این روش ایجاد شکل های هموارتر و انعطاف پذیرتر در مقایسه با روش بوفانگ می باشد. با استفاده از این فرمول بندی نرم افزاری براساس قابلیت های شیء گرایبی نسبی فرترن برای تحلیل المان محدود سدهای بتنی قوسی تهیه شده است. برنامه به طور خودکار شبکه های المان محدود را برای سد، تکیه گاه ها و مخزن در حالات مختلف بارگذاری تولید می کند. خروجی های برنامه شامل تغییر مکان های نقاط، تنش های اصلی، فرکانس های ارتعاش، شکل مودهای ارتعاشی و سایر اطلاعات مورد نیاز در بهینه سازی شکل می باشد که در تحقیقات آتی از آنها استفاده خواهد شد. نتایج تحقیق با نتایج تحلیل سد شهید رجایی مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: سدهای بتنی قوسی - شکل سد - اسپیلاین هرمیتی - تحلیل المان محدود

مقدمه

عنوان هادی سهمی انتخاب شده و محور سهمی مار بر طره مرکزی می باشد. در تحقیقات قبلی [۵-۱۲، ۱۰، ۸-۱۵]، شکل سد بر اساس معادلات چندگانه درجه سوم بر حسب ارتفاع سد مشخص می شد. در این روش برخی جزئیات هندسی سد نظیر نقاط شروع ناحیه ضخامت متغیر در قوسهای افقی دقیقاً مشخص نمی شوند. هم چنین این معادلات در حالی که در شکل دره نقطه عطف باشد، نمی توانند هندسه سد را به خوبی مدل سازی نمایند. نکته دیگر آنکه طراحی سدها معمولاً بر سعی و خطا استوار است و آماده سازی شبکه المان محدود به صورت غیر خودکار بسیار طاقت فرسا بوده و لازم است در هر مرحله ای که شکل سد عوض می شود، هندسه و شبکه المان محدود تعیین گردد. در زمینه تحلیل سدهای بتنی برنامه هایی وجود دارند که معمولاً برای قوس افقی دایره ای تهیه شده اند و نمی توان هندسه های سهموی را با آنها مدل و تحلیل نمود و تهیه فایل ورودی برای آنها به سادگی میسر نمی باشد که از جمله آنها می توان به برنامه هایی چون EADAP، ADAP88 و EACD3D96

شکل هندسی سدهای بتنی قوسی تاثیر به سزایی در رفتار و اقتصاد آن دارد. هندسه بدنه انواع مختلفی دارد که به صورت سدهای قوسی دایره ای تک مرکزی (قوس با شعاع ثابت در ارتفاع، قوس با زاویه مرکزی ثابت در ارتفاع و قوس با زاویه مرکزی و شعاع متغیر در ارتفاع) و سدهای قوسی چند مرکزی یا با شعاع متغیر (سه مرکزی با قوس دایره ای، پنج مرکزی با قوس دایره ای، سهمی، بیضی و لگاریتمی) می باشند. ایراد سدهای تک مرکزی این است که معمولاً تمرکز تنش در تکیه گاه ها قابل توجه است و صرفاً در دره های خاص عملکرد مطلوب دارند. قوس های چند مرکزی و انحنا متغیر باعث توزیع یکنواخت تنش در پوسته سد شده و در زلزله رفتار بهتری از آنها مشاهده شده است. برای یک ساختگاه مشخص، تنش برشی و خمشی در قوس سهمی بمراتب کمتر از تنش در قوس دایره ای است. هم چنین حجم بدنه قوس دایره ای بیشتر از قوس سهموی است [۱۳]. با توجه به این ملاحظات، ساخت سدهای با قوس سهمی نمود بیشتری در عمل پیدا کرده است. به عنوان یک الگوی رایج برای قوس سهموی طبق مکتب ژاپن لایه وسط قوس به

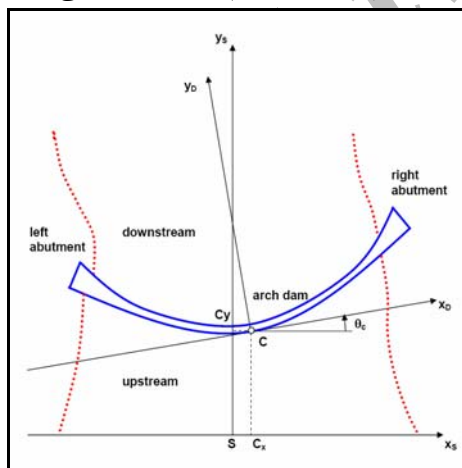
فرمول بندی هندسه سد

سیستم‌ها مختصات

مطابق شکل (۱) هندسه ساختگاه در سیستم دکارتی با محورهای x_S, y_S, z_S تعیین می‌گردد. این سیستم مختصات در تمام مراحل طراحی ثابت می‌باشد. محورهای x_S, y_S در صفحه افق بوده و جهت محور x_S بسمت راست بدنه سد می‌باشد. محور z_S قائم و به سمت بالاست. هندسه سد نیز در سیستم دکارتی با محورهای x_D, y_D, z_D می‌باشد. این سیستم مختصات جانمایی سد را در دره مشخص کرده که قابلیت تغییر داشته و امکان تغییر و چرخش سد را حول محور قائم فراهم می‌آورد. محورهای x_D, y_D نیز در صفحه افق قرار داشته و محور z_D از وجه بالا دست در تاج طره (درزه) مرکزی عبور و صفحه قائم $y_S - z_S$ را در نقطه C قطع می‌کند. محور x_D از نقطه C گذشته و عمود بر صفحه طره و جهتش به سمت راست بدنه سد می‌باشد. رابطه هر نقطه دلخواه در دو سیستم مختصات به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_c & -\sin\theta_c & 0 \\ \sin\theta_c & \cos\theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن S نقطه دلخواه در سیستم مختصات ساختگاه، C نقطه مبدأ برای سیستم مختصات سد، D نقطه دلخواه در سیستم مختصات سد، R ماتریس چرخش سیستم مختصات سد و θ_c زاویه چرخش سیستم مختصات سد می‌باشد.



شکل ۱: سیستم‌های مختصات سد و ساختگاه.

هندسه ساختگاه

هدف از این بخش تعیین سطح سنگ بستر سالم با استفاده از سطح توپوگرافی و عمق حفاری در تکیه‌گاه‌ها می‌باشد.

بدین منظور مثلی را در توپوگرافی ساختگاه در نظر بگیرید

اشاره نمود. در این تحقیق روشی جدید برای طراحی شکل سدهای قوسی بر اساس الگوی سهموی (با انتخاب رویه بالادست به عنوان هادی سهمی) ارائه می‌شود، که در امتداد ارتفاع سد از سه مجموعه معادلات اسپیرالین هرمیتی استفاده می‌کند. این معادلات تمام جزئیات مدل سازی بدنه سد را پوشش می‌دهند. از خواص این فرمول بندی انعطاف پذیری شکل سد در برابر تغییرات پارامترها و ایجاد شکل های هموارتر در مقایسه با فرمول بندی بوفانگ می‌باشد [۵-۸].

برای این منظور برنامه‌ای به زبان فرترن تهیه شده است که از قابلیت های شی گرای نسبتی آن نظیر قطعه^۱، ارث‌بری^۲ کپسول سازی^۳، نوع داده^۴، اشاره گر^۵ و آرایه دینامیکی^۶ استفاده فراوانی شده است [۲]. قطعه یا کلاس یکی از قابلیت های بزرگ زبان های شی گرا می باشد که برنامه های اخیر مهندسی از این قابلیت استفاده می نمایند. با توجه به این که تحلیل و طراحی سدهای بتنی قوسی با داده های زیادی سر و کار دارد، به کارگیری قطعات یا کلاس ها و استفاده از خواص نظیر ارث‌بری منجر به توسعه سریع و کارآمد برنامه های بزرگ می شود؛ لذا در این تحقیق از امکانات فوق به نحو مطلوبی استفاده شده است [۵، ۲]. این برنامه در آینده دارای قابلیت تعیین شکل بهینه سدها خواهد گردید. در این نرم افزار با توجه به توپوگرافی ساختگاه سد و شکل دره، هندسه اولیه سد توسط طراح ساخته می شود.

سپس شبکه المان محدود برای تحلیل بدنه و تکیه‌گاه تولید شده و تحلیل استاتیکی و دینامیکی انجام می‌گیرد. اگر تنش های کششی و فشاری سد در محدوده مجاز بودند، این سد از نظر طراحی قابل قبول بوده (هر چند لزوماً بهینه نیست)، والا باید هندسه سد تعویض و تحلیل های جدید بر روی آن صورت گیرد. در این تحقیق هندسه سد با متغیرهای موقعیت سیستم مختصات سد و زاویه چرخش سد، برآمدگی قوس های قائم، ضخامت طره مرکزی، شعاع انحنای راس قوس های افقی در رویه بالادست، ضخامت قوس ها در محل برخورد سد با تکیه‌گاه ها، نقاط شروع ناحیه ضخامت متغیر و میزان حفاری در تکیه‌گاه ها تعیین می‌شود. هر کدام از این متغیرها در ۴ تراز طراحی مبنا H_c, H_u, H_m, H_b معلوم بوده و در نهایت هندسه بدنه سد توسط منحنی های اسپیرالین در دیگر ترازهای ارتفاعی مشخص می‌شود. پس از تکمیل بدنه سد، تکیه‌گاه های سد در صورت عدم وجود داده های توپوگرافی به شکل زین اسبی تولید شده، و پس از تحلیل سازه نتایج ارزیابی می‌گردد.

می‌آید. برای هموار شدن سطح از متوسط‌گیری بردارهای نرمال سطح مثلث‌ها استفاده می‌شود (رابطه ۸):

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m}(\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + \dots + \mathbf{n}_m) \quad (8)$$

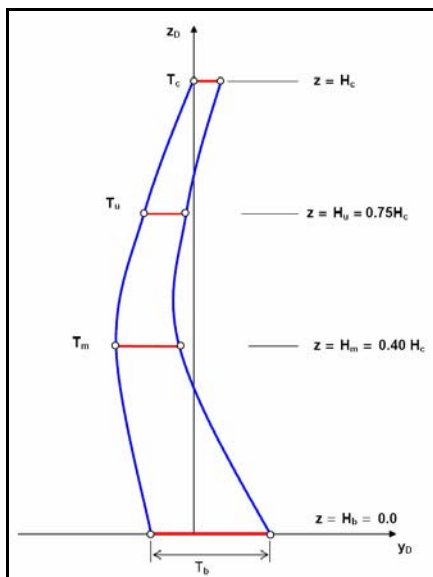
که در آن n بردار نرمال ناشی از هر مثلث و m تعداد مثلث‌های مجاور نقطه i می‌باشد. در نهایت مختصات صفحه سنگ سالم w_i که از روی نقاط توپوگرافی v_i به دست می‌آید. به صورت رابطه زیر است:

$$w_i = v_i + d_i \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} \quad (9)$$

شکل درزه مرکزی

شکل طره مرکزی توسط متغیرهای P_b, P_m, P_u, P_c و T_b, T_m, T_u, T_c تعیین شده (شکل ۳) و مختصات نقاط درون یابی در لبه‌های بالا دست و پایین دست پروفیل درزه به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} H_b: y_{u1} &= -P_b T_b, & y_{d1} &= (1 - P_b) T_b \\ H_m: y_{u2} &= -(1 + P_m) T_m, & y_{d2} &= -P_m T_m \\ H_u: y_{u3} &= -(1 + P_u) T_u, & y_{d3} &= -P_u T_u \\ H_c: y_{u4} &= 0, & y_{d4} &= T_c \end{aligned} \quad (10)$$



شکل ۳: مقطع طره مرکزی (بدون مقیاس).

برای تعیین پروفیل رویه‌های بالا دست (y_u) و پایین دست طره (y_d) مرکزی در ارتفاع دلخواه z از اسپلاین‌های درجه سوم به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$y_u = \text{Spline}(z, y_{ui}, H_i) \quad (11)$$

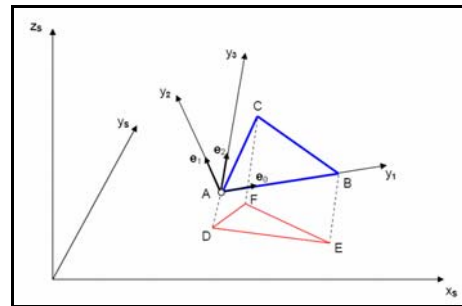
$$y_d = \text{Spline}(z, y_{di}, H_i) \quad (12)$$

و ضخامت طره مرکزی نیز در هر ارتفاع دلخواه از رابطه (۱۳) قابل محاسبه می‌باشد:

(شکل ۲). فرض کنید که مختصات گوشه‌های A, B, C مثلث مفروض v_1, v_2, v_3 باشند. مختصات سایت هر نقطه دلخواه P در صفحه‌ای که شامل مثلث است، به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$\mathbf{S} = v_1 z_1 + v_2 z_2 + v_3 z_3 \quad (2)$$

z_i مختصات مساحت $z_1 + z_2 + z_3 = 1$ و v_i مختصات گوشه i مثلث روی سطح توپوگرافی است.



شکل ۲: سیستم مختصات محلی و مثلث بندی ساختگاه.

با جای گذاری $z_3 = 1 - z_1 - z_2$ در رابطه (۲)، رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\mathbf{S} = \mathbf{v}_3 + (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)z_1 + (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_3)z_2 \quad (3)$$

اگر $z_1, z_2, z_3 \geq 0$ باشد نقطه P داخل مثلث قرار دارد. برای این که مثلث متناظر در سطح توپوگرافی در سنگ بستر سالم به دست آید، (مثلث DEF)، یک سیستم مختصات محلی y_1, y_2, y_3 برای آن ساخته می‌شود. بردار واحد e_1 از A به B انتخاب شده و بردار واحد e_3 به صورت عمود بر صفحه مثلث است.

$$\mathbf{e}_1 = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{|\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1|} \quad (4)$$

$$\mathbf{n} = (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)(\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1), \quad \mathbf{e}_3 = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \quad (5)$$

و مختصات گوشه‌های مثلث DEF در صفحه سنگ سالم به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$w_i = v_i + d_i e_3 \quad (6)$$

که در آن w_i مختصات نقاط مثلث روی سطح سنگ سالم و d_i حداقل عمق حفاری عمود بر صفحه توپوگرافی است. معادله صفحه مثلث در سنگ سالم به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\mathbf{S} = \mathbf{w}_3 + (\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_2)z_1 + (\mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_3)z_2 \quad (7)$$

در حالت کلی برای مثلث‌های حاصل شده از مثلث بندی صفحه توپوگرافی، بردارهای نرمال متفاوتی خواهیم داشت. در نتیجه موقعیت نقاط مثلث‌های مجاور در سنگ سالم متفاوت بوده و سطح سنگ سالم ناهموار بدست

که در آن نقاط درون یابی و شعاعهای انحنای قوس افقی در ۴ تراز مرجع می باشد. معادله سهمی AB با مختصات رأس (a_x, a_y) و شعاع انحنای r به صورت رابطه زیر (۱۶) می باشد:

$$y = a_y + \frac{1}{2r}(x - a_x)^2 \quad (16)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x - a_x}{r} = \alpha \quad (17)$$

فرض کنید نقطه P در منحنی AB دارای مختصات $X_p = (x, y, z)$ باشد. در این صورت بردار مماس واحد t_p و بردار نرمال واحد n_p در P به صورت روابط زیر (۱۸) و (۱۹) خواهد بود.

$$n_p = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} -t_y \\ t_x \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$t_p = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}_p = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \sqrt{1 + \alpha^2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

منحنی CD که از روی سهمی AB استخراج می شود، طوری است که ضخامت T در جهت n_p ثابت می باشد چنانچه یک سیستم مختصات محلی y_1, y_2 با پایه های t_p, n_p در نقطه P در نظر بگیرید محور y_2 منحنی CD را در نقطه Q قطع می کند. معادله قوس پایین دست آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$X_Q = X_p + Tn \quad (20)$$

و مقدار β یا مشتق منحنی CD نیز از رابطه زیر به دست می آید.

$$\beta = \frac{dy_Q}{dx} = \frac{dy_p}{dx} + T \frac{dn_y}{dx} = \alpha \left(1 - \frac{T}{r} (1 + \alpha^2)^{-1.5}\right) \quad (21)$$

ضمن این که بردار مماس و نرمال واحد t_Q و n_Q بر منحنی CD در نقطه Q در روابط (۲۲) و (۲۳) ارائه شده اند.

$$n_Q = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}_Q = \begin{bmatrix} -t_y \\ t_x \end{bmatrix}_Q \quad (22)$$

$$t_Q = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}_Q = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta \\ \sqrt{1 + \beta^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ناحیه ضخامت متغیر

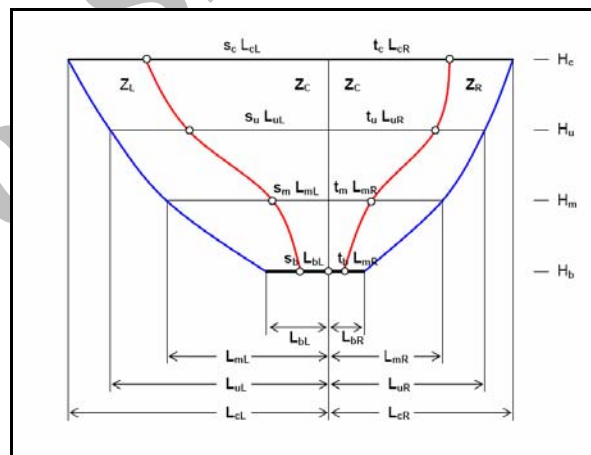
نقطه گذار U بین نواحی ضخامت ثابت و ضخامت متغیر در وجه بالا دست بوده و موقعیت آن وابسته به H_i و متغیرهای مختصات (s_b, s_m, s_u, s_c) و (t_b, t_m, t_u, t_c) می باشد (شکل ۵). مختصات x نقاط برخط طره قوس با سنگ بستر با L نمایش داده

$$T = y_d - y_u = \text{Spline}(z, y_{di}, H_i) - \text{Spline}(z, y_{ui}, H_i) \quad (13)$$

ضخامت بدنه سد

با توجه به شکل (۴) وجه بالا دست سد به دو ناحیه یکی ناحیه ضخامت ثابت Z_c و دیگری ناحیه ضخامت متغیر در راست و چپ تقسیم می شود که با Z_L و Z_R مشخص شده اند. ضخامت بدنه سد در هر تراز در ناحیه Z_c با ضخامت طره مرکزی در همان تراز مساوی بوده و در نواحی Z_L و Z_R ضخامت در هر تراز به صورت سهمی از ضخامت در Z_c تا ضخامت در تکیه گاه ها تغییر می کند. ضخامت بدنه سد در تکیه گاه های راست و چپ با پارامترهای $T_{br}, T_{mr}, T_{ur}, T_{cr}$ و $T_{bl}, T_{ml}, T_{ul}, T_{cl}$ تعیین می شوند. ضخامت در دیگر ترازهای ارتفاعی با توابع اسپلاین به شکل زیر درون یابی می شود.

$$T_{aR} = \text{Spline}(z, T_{iR}, H_i), T_{aL} = \text{Spline}(z, T_{iL}, H_i) \quad (14)$$



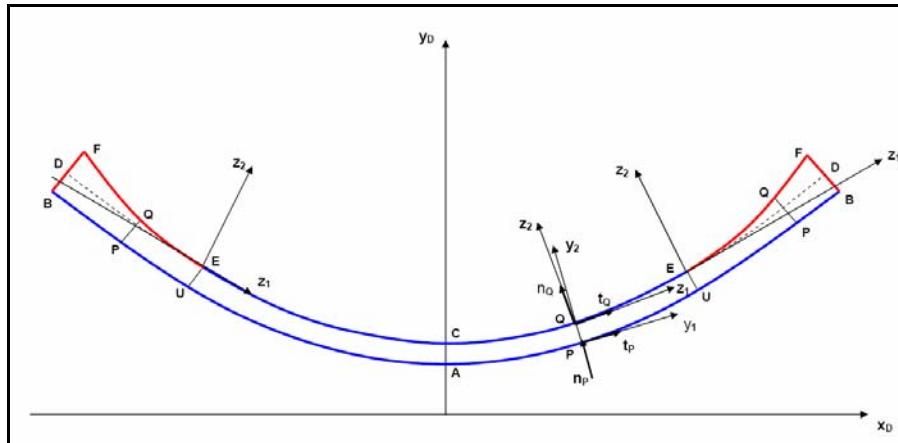
شکل ۴: ناحیه بندی ضخامت بدنه سد در وجه بالادست (بدون مقیاس).

شکل قوس های افقی

ناحیه ضخامت ثابت

فرض کنید یک قوس افقی در تراز دلخواه z به صورت شکل (۵) باشد. لبه بالا دست قوس یک سهمی است که رأس آن بر پروفیل طره مرکزی منطبق است. مختصات رأس به صورت تابعی از Z_D از معادلات (۱۱) و (۱۲) به دست می آید. شعاع های انحنای r سهمی در چهار تراز مرجع H_b, H_m, H_u, H_c به عنوان متغیرهای طراحی R_b, R_m, R_u, R_c معلوم و در ترازهای دلخواه از رابطه زیر درون یابی می شود.

$$r = \text{Spline}(z, H_i, R_i) \quad (15)$$



شکل ۵: ناحیه بندی ضخامت در قوس افقی دلخواه (بدون مقیاس).

$$z_2 = \frac{1}{2r_E} z_1^2, \quad r_E = \frac{z_{1F}^2}{2z_{2F}} \quad (27)$$

معادله منحنی پایین دست در سیستم مختصات محلی در ناحیه ضخامت متغیر به صورت زیر می باشد.

$$z_2 = z_{2F} \left(\frac{z_1}{z_{1F}} \right)^2 \quad (28)$$

در مختصات محلی موقعیت نقطه F نسبت به نقطه B طوری تعیین می گردد که ضخامت عمود بر وجه بالا دست در تکیه گاه برابر T_a باشد.

$$\mathbf{X}_F = \mathbf{X}_B + T_a \mathbf{n}_B \quad (29)$$

موقعیت $Z_F = \begin{bmatrix} z_{1F} \\ z_{2F} \end{bmatrix}$ با جایگذاری رابطه (۲۹) در رابطه (۲۶) به رابطه زیر تبدیل می گردد.

$$\mathbf{Z}_F = \mathbf{R}_E^T (\mathbf{X}_B - \mathbf{X}_E + T_a \mathbf{n}_B) \quad (30)$$

مختصات پائین دست در نواحی ضخامت متغیر

نقطه P را در وجه بالا دست سهمی AB در ناحیه ضخامت متغیر EF در نظر بگیرید (شکل ۵). بردار نرمال واحد \mathbf{n}_p در نقطه P سهمی EF را در نقطه Q قطع می کند. مختصات نقطه Q در سیستم مختصات سد به صورت رابطه زیر بوده که در آن \bar{T} ضخامت قوس در نقطه دلخواه P می باشد.

$$\mathbf{X}_Q = \mathbf{X}_P + \bar{T} \mathbf{n}_p \quad (31)$$

با جای گذاری رابطه (۲۶) در رابطه (۳۱) رابطه زیر به دست می آید:

$$\mathbf{X}_E + \mathbf{R}_E \mathbf{Z}_Q = \mathbf{X}_P + \bar{T} \mathbf{n}_p \quad (32)$$

که با ضرب خارجی بردار t_p در آن رابطه زیر حاصل می گردد.

می شود، که در آن $L_{iR} = L_{bR}, L_{mR}, L_{uR}, L_{cR}$ عرض سد در سمت راست و $L_{iL} = L_{bL}, L_{mL}, L_{uL}, L_{cL}$ عرض سد در سمت چپ می باشد. پهنای ناحیه ضخامت ثابت پس از تقاطع قوس بالا دست با سنگ بستر از رابطه زیر (۲۴) به دست می آید:

$$\bar{R}_i = t_i L_{iR} \quad (24)$$

$$\bar{L}_i = s_i L_{iL}$$

که در آن \bar{L}_i, \bar{R}_i به ترتیب عرض های راست و چپ در \bar{L}_i تراز مرجع می باشد. پهنای ناحیه ضخامت ثابت در ارتفاع دلخواه z با توابع زیر درون یابی می شود.

$$L_{Right} = \text{Spline}(z, \bar{R}_i, H_i) \quad (25)$$

$$L_{Left} = \text{Spline}(z, \bar{L}_i, H_i)$$

نقطه E در وجه پایین دست در همان درزی واقع است که U نیز روی آن قرار دارد و مختصات آن با روابط (۱۶) تا (۲۰) محاسبه می شود. در نقطه E مختصات محلی تا z_1, z_2 به صورتی تعیین می گردد که \mathbf{n}_E و t_E پایه های آن باشند. تبدیل مختصات نقطه دلخواه بین سیستم های x_D, y_D و z_1, z_2 به صورت رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\mathbf{X}_D = \mathbf{X}_E + \mathbf{R}_E \mathbf{Z} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x & n_x \\ t_y & n_y \end{bmatrix}_E \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

سیستمهای مختصات برای نواحی ضخامت متغیر

فرض کنید ضخامت قوس از T در نقطه U تا T_a در نقطه B تغییر کند و منحنی EF نیز یک سهمی با رأس E باشد که در نقطه E بر منحنی CD مماس می باشد (شکل ۵). شعاع انحنای این سهمی (r_E) طوری انتخاب می شود که سهمی از نقطه F عبور کند.

$$\mathbf{X}_S = \mathbf{X}_C + [\mathbf{R}]\mathbf{X}_D = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2\psi + \mathbf{q}_3\psi^2 \quad (۴۲)$$

$$\mathbf{q}_1 = \begin{bmatrix} x_c + x_E \cos\theta_c - y_E \sin\theta_c \\ y_c + x_E \sin\theta_c + y_E \cos\theta_c \\ z_c + a_z \end{bmatrix} \quad (۴۳)$$

$$\mathbf{q}_2 = \begin{bmatrix} t_{x_E} \cos\theta_c - t_{y_E} \sin\theta_c \\ t_{x_E} \sin\theta_c + t_{y_E} \cos\theta_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴۴)$$

$$\mathbf{q}_3 = \begin{bmatrix} n_{x_E} C_d \cos\theta_c - n_{y_E} C_d \sin\theta_c \\ n_{x_E} C_d \sin\theta_c + n_{y_E} C_d \cos\theta_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۴۵)$$

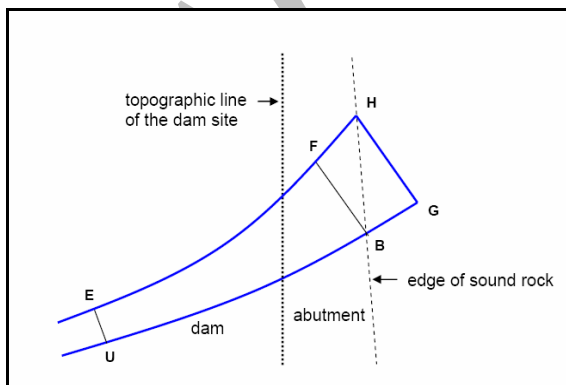
در نقطه تقاطع صفحه مثلث سنگ بستر معادله (۷) و سهمی رابطه (۱۶) به صورت زیر می باشد:

$$\mathbf{w}_3 + (\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_3)z_1 + (\mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_3)z_2 = \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2\psi + \mathbf{q}_3\psi^2 \quad (۴۶)$$

با ضرب خارجی معادله فوق در \mathbf{e}_3^T و استفاده از رابطه (۷) خواهیم داشت:

$$\mathbf{e}_3^T \psi = \mathbf{e}_3^T \mathbf{q}_1 + \mathbf{e}_3^T \mathbf{q}_2 \psi + \mathbf{e}_3^T \mathbf{q}_3 \psi^2 \quad (۴۷)$$

معادله درجه دوم فوق برای محاسبه ψ حل می شود، که در واقع مختصات x نقاط برخورد قوس با سنگ بستر می باشد. نقاط B و H در شکل (۶) نقاط برخورد وجه بالا دست و پائین قوس با سنگ بستر است. نقطه F در سهمی پائین دست طوری در بخش های قبل محاسبه گردید که این نقطه روی بردار نرمال گذرنده از B واقع شود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ بستر است). برای تعیین نقطه برخورد نهایی قوس با ساختگاه تفاضل مختصات x_D نقاط G و B برابر تفاضل مختصات x_D نقاط F و H است. مختصات y_D نقطه G طوری است که از امتداد دادن سهمی AB به دست آید.



شکل ۶: برخورد قوس افقی با تکیه گاه

در رابطه زیر (۴۸) عبارت از تقاطع سهمی EF با سنگ بستر می باشد:

$$\mathbf{t}_p^T \mathbf{X}_E + \mathbf{t}_p^T \mathbf{R}_E \mathbf{Z}_Q = \mathbf{t}_p^T \mathbf{X}_P$$

$$\frac{\bar{B}}{2r_E} z_1^2 + \bar{A} z_2 + \bar{C} = 0 \quad (۳۳)$$

$$\bar{A} = t_{xp} r_{11} + t_{yp} r_{21} \quad \bar{B} = t_{xp} r_{12} + t_{yp} r_{22} \quad \bar{C} = \mathbf{t}_p^T (\mathbf{X}_E - \mathbf{X}_P)$$

که در آن t_{xp}, t_{yp} و $r_{ij} = \mathbf{R}_E = \begin{bmatrix} t_x & n_x \\ t_y & n_y \end{bmatrix}_E$ مماس ها در نقطه P می باشند. با جای گذاری z_2 از رابطه (۲۸) رابطه زیر حاصل می شود:

$$\frac{\bar{B}}{2r_E} z_1^2 + \bar{A} z_1 + \bar{C} = 0 \quad (۳۴)$$

معادله (۳۴) دو ریشه دارد که ریشه منفی آن به سمت چپ و ریشه مثبت آن به سمت راست مربوط می شود. در نهایت معادله ناحیه ضخامت متغیر \bar{T} در هر تراز دلخواه به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\bar{B}}{2r_E} z_1^2 + \bar{A} z_2 + \bar{C} = 0 \quad (۳۵)$$

$$z_2 = \frac{z_1^2}{2r_E} \quad (۳۶)$$

$$\mathbf{X}_Q = \mathbf{X}_E + \mathbf{R}_E \mathbf{Z}_Q \quad (۳۷)$$

$$\bar{T} = \mathbf{n}_p^T (\mathbf{X}_Q - \mathbf{X}_P) \quad (۳۸)$$

تقاطع قوس افقی با سنگ بستر

رابطه (۱۶) وجه بالا دست سهمی را در سیستم مختصات سد مشخص می کند. مختصات x_p به عنوان پارامتر دلخواه ψ انتخاب می شود. با استفاده از رابطه (۱۶) داریم:

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2r} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ \psi^2 \end{bmatrix} \quad (۳۹)$$

سهمی رابطه (۲۸) در وجه پایین دست ناحیه ضخامت متغیر در سیستم مختصات محلی به صورت زیر می باشد:

$$z_2 = z_{2F} \left(\frac{z_1}{z_{1F}} \right)^2 = C_d z_1^2 \quad (۴۰)$$

مختصات z_1 نیز به عنوان پارامتر دلخواه در این سیستم مختصات انتخاب می شود که برای تعیین مختصات نقاط سد روی سهمی به کار می رود.

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ a_z \end{bmatrix}_E + \begin{bmatrix} t_x & n_x C_d \\ t_y & n_y C_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_E \begin{bmatrix} \psi \\ \psi^2 \end{bmatrix} \quad (۴۱)$$

معادله سهمی در سیستم مختصات ساختگاه به صورت زیر در می آید:

المان محدود گام های زیر به کار می رود.

۱- وارد کردن نقاط مشخصه شکل دره یا مختصات نقاط توپوگرافی ساختگاه برای مثلث بندی مطابق روابط (۱) تا (۹).

۲- به دست آوردن پروفیل و ضخامت طره مرکزی با روابط (۱۰) تا (۱۳).

۳- محاسبه شعاع انحنای قوسهای افقی در ترازهای مختلف از رابطه (۱۵).

۴- بدست آوردن مختصات نقاط رویه بالادست مطابق رابطه (۱۶).

۵- یافتن مختصات نقاط بین نواحی ضخامت ثابت و ضخامت متغیر از روابط (۱۷) تا (۳۸).

۶- محاسبه مختصات نقاط برخورد قوس ها با سنگ بستر از روابط (۳۹) تا (۴۹).

شبکه المان محدود و بار گذاری ها

پس از ساخته شدن هندسه سد و تکیه گاه ها، شبکه المان محدود برای سه حالت بار گذاری به صورت خودکار تولید می شود. تعداد لایه های المان بندی در امتدادهای ضخامت و ارتفاع سد در اختیار کاربر است. شماره گذاری نقاط به صورتی است که عرض باند در ماتریس سختی کمینه باشد هر چند نحوه شماره گذاری المان ها چندان اهمیتی ندارد. چندین شبکه المان محدود برای بار گذاری وزن در نظر گرفته شده است که به تعداد دفعات تزریق بستگی دارد. به طور مثال اگر کاربر سه مرحله تزریق در نظر بگیرد، در مرحله اول بدنه سد تا $\frac{H}{3}$ مدل شده و به صورت طره های زوج و فرد مجزا تحلیل می شوند تا پایداری آنها کنترل شود. در مرحله دوم تمام طره ها تا $\frac{H}{3}$ بصورت پوستره یکپارچه فرض شده و از ارتفاع $\frac{H}{3}$ تا $\frac{2H}{3}$ بصورت طره های زوج و فرد تحلیل و کنترل پایداری روی آنها صورت می گیرد. در مرحله آخر طره ها تا $\frac{2H}{3}$ پوستره یک پارچه فرض شده و از $\frac{2H}{3}$ تا تاج سد به صورت زوج و فرد مجزا بار گذاری و تحلیل می شوند. در هر مرحله تنش های مرحله قبل با تنش های حاصل از بار گذاری طره های مجزا جمع می شوند. در نهایت پوستره کاملاً یک پارچه (تزریق شده) برای سایر بار گذاری ها آماده می شود. در مدل المان محدود برای بار گذاری

$$x_G = x_B + (x_H - x_F) \quad (۴۸)$$

$$y_G = a_y + \frac{1}{2r}(x_G - a_x)^2 \quad a_x = 0 \quad (۴۹)$$

درون یابی هرمیتی

با توجه به شکل (۷) فرض کنید محاسبه مقدار $f(z)$ در ارتفاع دلخواه z مورد نظر باشد. مقادیر f در ۴ نقطه درون یابی H_b, H_m, H_u, H_c به صورت f_b, f_m, f_u, f_c معلوم می باشند. از بین این ۴ نقطه، ۳ قطعه منحنی درجه ۳ می گذرد که مقدار f در هر قسمت به صورت زیر می باشد:

$$f = Q \bar{f}^T \quad (۵۰)$$

$$\bar{f} = \{f_b, h_1 f'_b, f_m, h_1 f'_m, f_u, h_1 f'_u, f_c, h_1 f'_c\}$$

$$Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$$

$$Q_1 = 2 - 3z + z^3, Q_2 = 1 - z - z^2 + z^3$$

$$Q_3 = 2 + 3z - z^3, Q_4 = -1 - z + z^2 + z^3 \quad (۵۱)$$

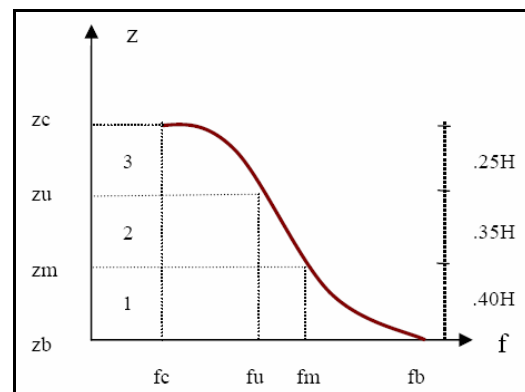
مقادیر f'_i در ۴ تراز مبنا نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} 4315 & 40125 & -6528 & 224 \\ 1342 & 9394 & 4697 & 671 \\ -1435 & -9795 & 13056 & -448 \\ 1342 & 9394 & 4697 & 671 \\ 175 & -8625 & -2988 & 1484 \\ 671 & 4697 & 4697 & 671 \\ -175 & 8625 & -26688 & 3284 \\ 1342 & 9394 & 4697 & 671 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f'_b \\ f'_m \\ f'_u \\ f'_c \end{bmatrix} \quad (۵۲)$$

در نهایت مقادیر $f(z)$ در تراز دلخواه z از رابطه زیر (۵۳) محاسبه می شود:

$$f(z) = \frac{1}{4} [Q_1 f_b + Q_2 h_1 f'_b + Q_3 f_m + Q_4 h_1 f'_m] \quad (۵۳)$$

$$h_1 = 200, h_2 = 175, h_3 = 125$$

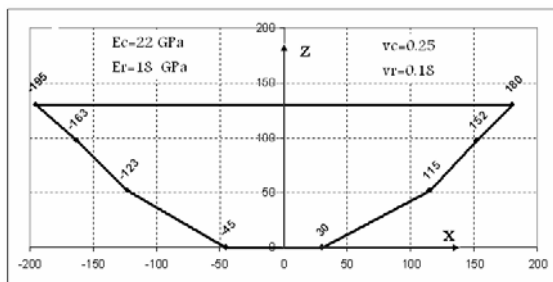


شکل ۷: درون یابی هرمیتی

مراحل پیاده سازی کامپیوتری

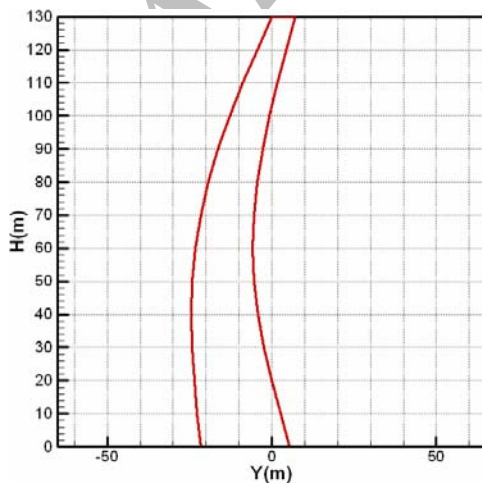
برای طراحی شکل هندسی سد و تولید شبکه های

که در آن x_c, y_c, θ_c متغیرهای جانمایی محور سد در ساختگاه، P_c, P_u, P_m, P_b پارامترهای برآمدگی رویه‌های بالا دست و پایین دست طره مرکزی، T_c, T_u, T_m, T_b ضخامت طره مرکزی، R_c, R_u, R_m, R_b شعاع انحنای رأس سهمی در رویه بالا دست، $T_{cl}, T_{ul}, T_{ml}, T_{bl}$ و $T_{cr}, T_{ur}, T_{mr}, T_{br}$ ضخامت تکیه‌گاه‌های راست و چپ، t_c, t_u, t_m, t_b و s_c, s_u, s_m, s_b نقاط شروع ناحیه ضخامت متغیر در راست و چپ در ۴ تراز مرجع درون یابی $H_c=H, H_u=75H, H_m=40H, H_b=0$ و d_{cl}, d_{ul}, d_{ml} و d_{cr}, d_{ur}, d_{mr} عمق حفاری در تکیه‌گاه‌های راست و چپ در ترازهای H_c, H_u, H_m و d_b عمق حفاری در پی می‌باشد.



شکل ۸: شکل دره و داده‌های تحلیل المان محدود

در شکل (۹) پروفیل طره مرکزی نشان داده شده و در جدول (۱) مشخصات هندسی سد در ترازهای مختلف برای مسئله مورد مطالعه ارائه شده است. که در آن ستون اول بیانگر ارتفاع سد، ستون دوم ضخامت طره مرکزی، ستون سوم شعاع انحنای قوس‌های افقی، ستون چهارم ضخامت سد در تکیه‌گاه‌های چپ و راست، ستون پنجم طول قوس افقی و ستون آخر بیانگر زاویه مرکزی بر حسب درجه می‌باشد. شبکه‌های المان محدود سد در اشکال (۱۰) تا (۱۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۹: پروفیل طره مرکزی

هیدرواستاتیک مخزن سد مدل نمی‌شود، بلکه نیروی حاصل از فشار هیدرواستاتیک در رویه بالادست بدنه سد و مخزن بر گره‌ها محاسبه و اعمال می‌گردد. در نهایت شبکه المان محدود برای حالت دینامیکی ساخته شده و تحلیل دینامیکی انجام می‌شود. برای بدنه سد از المان‌های جامد هشت گرهی و برای ناحیه برخورد سد با تکیه‌گاه‌ها از المان‌های گوه‌ای شش گرهی یا المان جامد هشت گرهی تحول یافته استفاده شده است. برای بهبود بخشیدن به نتایج تحلیل تنش‌های مرز بدنه و پی، شبکه المان بدنه سد طوری طراحی شده است که المان‌های مثلی که در محل برخورد سد و تکیه‌گاه به وجود می‌آیند به لایه بالایی منتقل شوند (شکل ۱۱). شبکه‌بندی تکیه‌گاه‌ها به دلخواه کاربر به صورت غیریکنواخت شبکه‌بندی می‌شود. به طوری که ابعاد المان‌ها در محل برخورد با سد کم و به تدریج با دور شدن از سد ابعاد آنها افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). مراحل تحلیل به این صورت است که برنامه با وارد شدن ۳۸ متغیر طراحی، شکل سد را تولید می‌کند. سپس شبکه‌های بارگذاری وزن ساخته شده و پایداری طره‌ها کنترل می‌گردد و نتایج تحلیل ذخیره می‌شوند. در صورت پایدار بودن طره‌ها شبکه‌های المان محدود بارگذاری‌های استاتیک و زلزله ساخته شده و نتایج هر شبکه به صورت مجزا در فایل‌هایی ذخیره می‌شوند. در نهایت نتایج سه بارگذاری با هم جمع آثار می‌شوند. تحلیل المان محدود در این برنامه توسط EFEAP انجام می‌گیرد، که نسخه بازنگری شده FEAPPv می‌باشد [۱۱، ۱۶].

مطالعه موردی (سد شهید رجایی)

سد شهید رجایی بر روی رودخانه تجن در نزدیکی شهر ساری مرکز استان مازندران احداث شده است. با استفاده از فرمول بندی‌های بخش ۲ و با فرض شکل دره به صورت منشوری، هندسه سد با استفاده از ۳۸ متغیر طراحی زیر ساخته می‌شود:

$$\bar{X}_1 = \{x_c=0, y_c=0, \theta_c=0\}$$

$$\bar{X}_2 = \{P_c=1, P_u=.10, P_m=.30, P_b=.80\}$$

$$\bar{X}_3 = \{T_c=7, T_u=12.5, T_m=18.5, T_b=27\}$$

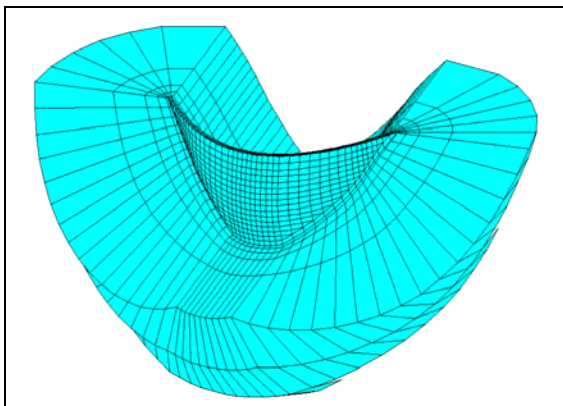
$$\bar{X}_4 = \{R_c=168, R_u=129, R_m=97, R_b=76\}$$

$$\bar{X}_5 = \{T_{cr}=T_{cl}=7, T_{ur}=T_{ul}=17, T_{mr}=T_{ml}=24, T_{br}=T_{bl}=27\}$$

$$\bar{X}_6 = \{t_c=s_c=0.5, t_u=s_u=0.5, t_m=s_m=0.5, t_b=s_b=0.50\}$$

$$\bar{X}_7 = \{d_{cr}=d_{cl}=5, d_{ur}=d_{ul}=5, d_{mr}=d_{ml}=5, d_b=5\}$$

شبکه‌بندی شده است. با توجه به جدول (۲) حجم بدنه سد در این تحقیق ۵۸۹۰۰۰ متر مکعب می‌باشد که در مقایسه با ۶۰۳۰۰۰ متر مکعب طرح موجود، حدود ۲/۷ درصد کمتر است. ضریب رعنائی سد در این تحقیق ۱۷/۴ و در طرح موجود ۱۸ می‌باشد. نتایج تحلیل المان محدود برای بارگذاری های ثقلی و ثقلی + فشارهیدرواستاتیک در جداول (۳) تا (۵) ارائه شده‌اند. در جدول (۶) فرکانس های طبیعی سد خالی با مرجع [۹] مقایسه شده است. به علاوه در این تحقیق مدول الاستیسیته دینامیکی ۱/۳ برابر مدول الاستیسیته حالت استاتیکی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۲: شبکه المان محدود سد و تکیه‌گاه ها (مؤلفان)

جدول ۲: مقایسه مشخصات سد شهید رجایی

حجم بدنه (مترمکعب)	ضریب رعنائی	
۵۸۹۰۰۰	۱۷/۴	مؤلفان
۶۰۳۰۰۰	۱۸/۰	طرح موجود

جدول ۳: تغییر مکان تاج سد (تحلیل استاتیکی).

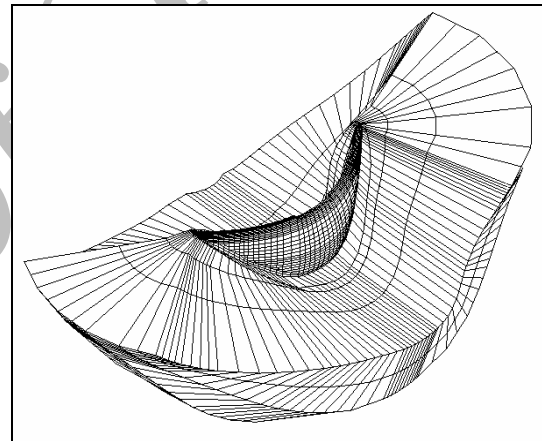
بارگذاری	مؤلفه	حداکثر تغییر مکان تاج طره مرکزی (mm)	
		مؤلفان	مرجع [۹]
وزن	U_D	۰/۰۰	۰/۰۰
	V_D	-۰/۰۰۵	-۰/۲۱
	W_D	-۸/۸۱	-۵/۸۳
وزن+آب	U_D	۰/۰۰	۰/۰۰
	V_D	۳۷/۴۰	۳۱/۶۰
	W_D	-۰/۵۱	-۰/۷۶

جدول ۴: حداکثر تنش کششی σ_1 (MPa) (تحلیل استاتیکی)

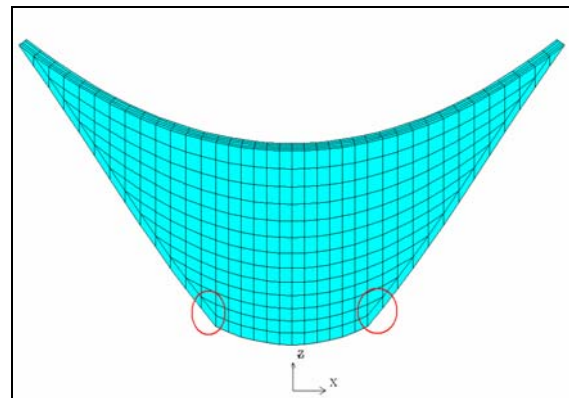
بارگذاری	بالادست		پایین دست	
	مؤلفان	مرجع [۹]	مؤلفان	مرجع [۹]
وزن	۰/۹۱	۰/۷۹	۰/۹۰	۰/۶۴
وزن+آب	۳/۰۱	۵/۵۹	۰/۲۸	۰/۴۱

جدول ۱: مشخصات هندسی سد در ترازهای مختلف.

H(m)	T(m)	R(m)	Ta(m)	Li(m)	Angel
۰	۲۷/۰۰	۷۶/۰۰	۲۷/۰۰	۱۰۶/۸۱	۷۰/۱۹
۱۰	۲۵/۴۱	۷۹/۶۱	۲۶/۵۶	۱۳۰/۴۲	۷۸/۶۴
۲۰	۲۳/۸۳	۸۳/۳۲	۲۶/۱۰	۱۵۴/۸۲	۸۵/۷۹
۳۰	۲۲/۲۸	۸۷/۲۳	۲۵/۵۶	۱۷۹/۹۲	۹۱/۷۷
۴۰	۲۰/۷۶	۹۱/۴۳	۲۴/۹۳	۲۰۵/۶۱	۹۶/۷۰
۵۰	۱۹/۲۹	۹۶/۰۳	۲۴/۱۷	۲۳۱/۷۴	۱۰۰/۷۰
۶۰	۱۷/۸۷	۱۰۱/۱۳	۲۳/۲۴	۲۵۸/۱۰	۱۰۳/۸۴
۷۰	۱۶/۴۸	۱۰۶/۹۶	۲۲/۰۸	۲۸۴/۳۳	۱۰۶/۰۹
۸۰	۱۵/۰۹	۱۱۳/۷۹	۲۰/۶۰	۳۰۹/۹۳	۱۰۷/۴۲
۹۰	۱۳/۶۴	۱۲۱/۹۱	۱۸/۷۲	۳۳۴/۴۵	۱۰۷/۸۲
۱۰۰	۱۲/۱۱	۱۳۱/۵۸	۱۶/۳۶	۳۵۷/۵۱	۱۰۷/۲۹
۱۱۰	۱۰/۴۶	۱۴۲/۸۱	۱۳/۵۲	۳۷۹/۱۱	۱۰۶/۰۱
۱۲۰	۸/۷۵	۱۵۵/۱۴	۱۰/۳۴	۳۹۹/۸۲	۱۰۴/۳۸
۱۳۰	۷/۰۰	۱۶۸/۰۰	۷/۰۰	۴۲۰/۲۱	۱۰۲/۷۱



شکل ۱۰: شبکه المان محدود سد و تکیه‌گاه ها (مرجع ۹).



شکل ۱۱: شبکه المان محدود برای بهبود وضعیت تنش (مؤلفان)

در مدل المان محدود این تحقیق، سد دارای ۱۳۵۲ و تکیه‌گاهها دارای ۱۱۷۸ المان است. مدل دارای ۳۳۰۲ گره (۹۹۰۶ درجه آزادی) می‌باشد. سد در راستای ضخامت دارای ۴ لایه بوده و پی نیز مطابق شکل (۱۲)

جدول ۵: حداکثر تنش فشاری σ_3 (MPa) (تحلیل استاتیکی)

بارگذاری	بالادست		پایین دست	
	مؤلفان	مرجع [۹]	مؤلفان	مرجع [۹]
وزن	-۴/۰۰	-۴/۹۰	-۱/۹۲	-۲/۰۰
وزن+آب	-۵/۲۰	-۴/۲۰	-۶/۰۰	-۵/۶۰

جدول ۶: فرکانس های طبیعی ارتعاش

شماره مد	فرکانس سد (Hz)	
	مؤلفان	مرجع [۹]
۱	۲/۳۶۵۱۱	۲/۴۰۵۳۹
۲	۲/۸۱۸۳۰	۳/۰۱۱۸۰
۳	۳/۵۶۵۲۲	۳/۴۸۲۷۴
۴	۴/۶۱۰۹۶	۴/۸۲۴۶۲
۵	۵/۱۸۰۶۷	۵/۴۷۳۵۹
۶	۵/۸۸۰۵۵	۶/۲۰۲۱۹
۷	۵/۹۷۳۶۰	۶/۲۱۴۹۹
۸	۷/۲۳۷۷۴	۷/۹۵۵۷۰
۹	۷/۷۳۸۸۲	۸/۱۴۵۷۶
۱۰	۷/۸۴۰۲۶	۸/۶۵۱۳۶
۱۱	۸/۴۵۷۵۹	۹/۷۲۳۳۵
۱۲	۸/۷۳۹۷۸	۹/۹۳۸۰۳
۱۳	۹/۱۱۱۹۰	۱۰/۶۶۵۷۸
۱۴	۹/۵۷۳۴۲	۱۱/۲۸۸۶۰
۱۵	۱۰/۳۶۶۵	۱۱/۴۹۵۳۶

نتیجه گیری و بحث

با توجه به این که مسئله مورد مطالعه با دو روش کاملاً متفاوت مدل سازی می شود، انتظاری در خصوص تطبیق دقیق شکل و مدل المان محدود وجود ندارد. تفاوت ماهوی چندجمله ای های درجه سه و توابع اسپیلاین منجر به هندسه های متفاوتی شده که بر شبکه های المان محدود و در نهایت روی نتایج تحلیل ها تاثیر گذار می باشد. نتایج المان محدود در این تحقیق به برخی پارامترها مانند انحنای طره بسیار حساس بوده ضمن این که تنظیم متغیرها به طوری که مدل سازی حاضر دقیقاً مشخصات سد مورد مطالعه را بدهد، دشوار می باشد. با این وجود، مقادیر جداول (۲) تا (۶) نمایانگر تطبیق نسبی نتایج دو روش است. علاوه بر تفاوت در مدل سازی هندسی، عامل دیگر اختلاف نتایج در این است که در تحقیق حاضر شکل دره منشوری فرض شده و شبکه المان محدود تکیه گاه مطابق شکل (۱۲) به صورت زین اسبی طراحی شده است. این عامل و با توجه به مدول

الاستیسیته ثابت برای تمام نواحی تکیه گاه منجر به تفاوت هایی در نتایج شده است. هم چنین در مرجع [۹] تحلیل ها با استفاده از المان های درجه دوم ۲۰ و ۱۵ گرهی صورت گرفته است که با مدل این تحقیق دارای درجات آزادی متفاوت می باشد. عامل دیگر در مدل سازی محل سرریز در مرجع [۹] می باشد، که در این تحقیق از مدل سازی آن صرف نظر شده است. عامل مهم در تفاوت تنش ها استفاده از برون یابی های متفاوت در تصویر تنش ها از نقاط گوس به رویه های بالادست و پایین دست سد بوده و از عوامل اختلاف در فرکانس ها، شکل دره، شکل بدنه سد، جرم و حفره سرریز و روش قطری کردن ماتریس جرم می باشد. در مدل المان محدود این تحقیق از روش درایه های قطری هر سطر (روش متمرکز) در قطری کردن ماتریس جرم استفاده شده است.

به طور خلاصه در این تحقیق به قابلیت های نرم افزار تحلیل سدهای بتنی قوسی با فرمول بندی جدید پرداخته شد که نتایج حاصل از آن به صورت زیر می باشد:

- با استفاده از فرمول بندی ارائه شده براساس اسپیلاین های هرمیتی، شکل هندسی سدهای بتنی قوسی مدل سازی می شود. در تحقیقات قبلی شکل سد بر اساس معادلاتی بیان می شد که جزئیاتی نظیر نقاط شروع ناحیه ضخامت متغیر در قوس های افقی، محل درزه ها و میزان حفاری در تکیه گاه ها پوشش داده نمی شدند. هم چنین در حالتی که در شکل دره نقطه عطف موجود باشد، توابع پیشین نمی توانند هندسه سد را با به خوبی مدل سازی نمایند.
- با در نظر گرفتن این نکته که شکل سد تأثیر به سزایی در رفتار و اقتصاد آن دارد، هدف اصلی در نظر گرفتن پارامترهایی بوده که بتواند هندسه سد را به خوبی مدل کرده و رفتار سازه ای آن را کنترل نماید. هم چنین برای تعیین شکل بهینه سدها در تحقیقات آتی، این پارامترها متغیرهای طراحی مسئله بهینه سازی را کاملاً پوشش خواهند داد. این ۳۸ متغیر طراحی طوری در نظر گرفته شده اند که شکل بهینه بدست آمده تمام ضوابط و محدودیت های طراحی و اجرا را به خوبی پوشش دهند.
- با توجه به انعطاف پذیری بیشتر اسپیلاین ها در مقایسه با چند جمله ای های توانی، در شرایط یکسان، حجم بدنه سد در روش اسپیلاین کمتر است.

شایانی خواهد نمود. هر چند قدرت شیء-گرایی زبان فرترن در مقایسه با زبان های برنامه نویسی C، C++ و Java چندان قابل توجه نمی باشد.

- با توسعه این نرم افزار و با در نظرگیری ۳۸ پارامتر ذکر شده به عنوان متغیرهای طراحی در مسئله بهینه سازی، می توان شکل بهینه سدهای بتنی قوسی را برای بارهای استاتیکی و زلزله به دست آورد. با توجه به استفاده از قابلیت های جدید فرترن و سادگی توسعه کد مزبور، اگر الگوریتم بهینه سازی و محاسبات گرادینان ها به آن اضافه شود، نرم افزار جامع بهینه سازی شکل سدهای بتنی قوسی به دست می آید.
- صحت نتایج المان محدود مدل حاضر با نتایج تحلیل سد شهید رجایی مورد مقایسه قرار گرفت.

• این برنامه تحلیل خطی استاتیکی و دینامیکی را برای سدهای بتنی قوسی برای سه حالت بارگذاری غالب انجام می دهد. داده های ورودی فقط شامل هندسه دره، مختصات نقاط توپوگرافی ساخت گاه (در صورت وجود) و خواص مصالح می باشند. برنامه به طور خودکار محاسبات لازم را انجام داده، سپس به تحلیل بارگذاری های وزن، هیدرواستاتیک و دینامیک می پردازد و قابل قبول بودن طرح را کنترل و به طراح اعلام می کند.

- کاربرد این برنامه برای طراحی سدهای جدید و کنترل سدهای ساخته شده بسیار آسان می باشد.
- در این برنامه از قابلیت های شیء-گرایی، پایگاه داده ها، مدیریت حافظه و مدولار بودن زبان فرترن استفاده فراوانی شده است. این امر به توسعه نرم افزار کمک

مراجع

- 1 - Akabri, J. and Ahmadi, M. T. (2006). *7th International Conference on Civil Engineering*, Tarbiat Modares University, Tehran, May 15-17. A Fortran Object-Oriented Program for Design of Concrete Arch Dams.
- 2 - Koniham, M. (1995). *Fortran 90*, Fatemi, Press. Fatemi, Press, 2nd edition, (in Farsi).
- 3 - Ahmadi, M. T. and Pahl, P. J. (2003). *A research proposal for Design optimization of concrete Arch Dams for Enhanced Seismic Response*, Tarbiat Modares University and Technical Berlin University
- 4 - Akin, E. D. (2001). *Object Oriented Programming via FORTRAN 90/95*, Rice University, Mechanical Eng. and Material Science Department, Houston Texas.
- 5 - Bofang, Z., Rao, B., Jia, J. and Li, Y. (1992). "Shape optimization of arch dams for static and dynamic loads." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No.11, PP. 2996-3015.
- 6 - Bofang, Z. (1991). "Internal force expansion method for stress reanalysis in structural optimization." *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7, No.4, PP. 295-298.
- 7 - Bofang, Z. (1990). "Optimum design of arch dams." *Dam Engineering*, Vol. I, Issue 2, PP. 131-145.
- 8 - Bofang, Z. (1987). "Shape optimization of arch dams." *International Water Power & Dam Construction*, Vol. 39, No.3, PP. 43-51.
- 9 - Mahab-Ghodss, (1994). *Shahid Rajaee Dam static and Dynamic Elastic Stress Analysis of Dam Body*, Mahab-Ghodss & Stucky Electro Watt, JV. Tehran
- 10 - Ricketts, R. E. and Zienkiewicz, O. C. (1975). "Shape optimization of concrete dams." *Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams*. Quadrant Press, Swansea, London, UK, PP. 1179-1206.
- 11 - Taylor, R. L. (1986-2003). *FEAP: A Finite Element Analysis Program*, University of California at Berkeley, Department of Civil and Environmental Eng.
- 12 - Yao, T. M. and Choi, K. K. (1989). "Shape optimal design of an arch dam." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No.9, PP. 2401-2405.
- 13 - Yisheng, Li. (2000). "The optimum type of arch rings and the conic arch dam." *Dam Engineering*, Vol. viii No. 1, PP. 145-152.
- 14 - Wassermann, K. (1984). "Three dimensional shape optimization of arch dams with prescribed shape functions." *Journal Of Structural Mechanics*, Vol. 11, No.4, PP. 465-489.
- 15 - Wassermann, K. (1983). "Shape optimization of arch dams using finite element techniques." *Journal of Structural Mechanics*, Vol.9, PP. 93-97.
- 16 - Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. (1989). *The Finite Element Method*, Vol. 1, McGraw-Hill, London, 4th ed..

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | | |
|-------------|-------------------|-------------------|----------|
| 1 - Module | 2 - Inheritance | 3 - Encapsulation | 4 - Type |
| 5 - Pointer | 6 - Dynamic array | | |