نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۴، مرداد ماه ۱۳۸۷، از صفحه ۴۰۷ تا ۴۱۷

# طراحی شکل سدهای بتنی قوسی با استفاده از اسپیلاینهای هرمیتی

جلال اکبری<sup>۱</sup>، محمد تقی احمدی<sup>\*۲</sup> و پیتر یان پال<sup>۳</sup> <sup>۱</sup>دانشجوی دکتری بخش عمران – دانشکده فنی – دانشگاه تربیت مدرس <sup>۲</sup>استاد بخش عمران – دانشکده فنی – دانشگاه تربیت مدرس <sup>۳</sup>استاد دانشکده مهندسی عمران – دانشگاه صنعتی برلین آلمان (تاریخ دریافت ۸۵/۲/۳۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۶/۱۰، تاریخ تصویب ۸۶/۶/۱۰)

#### چکیدہ

درگذشته، مدل سازی بدنه سدها با استفاده از مجموعهای از چندجمله ای های درجه دو یا سه انجام میگرفت. لیکن جزئیاتی نظیر پیاده سازی محل درزهها، نقاط شروع ضخامت متغیر در قوس های افقی، حفاری در تکیهگاه ها و غیره نادیده گرفته می شدند. هم چنین در حالتی 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 شئ گرایی نسبی فرترن برای تحلیل المان محدود سدهای بتنی قوسی تهیه شده است. برنامه به طور خودکار شبکههای المان محدود را برای سد، تکیهگاه ها و مخزن در حالات مختلف بارگذاری تولید می کند. خروجی های برنامه به تنییر مکان های نقاط، تنش های اصلی، فرکانس های ارتعاش، شکل مودهای ارتعاشی و سایر اطلاعات مورد نیاز در بهینه سازی شکل مند. که در تعییر مکان های نقاط، تنش های اصلی، فرکانس های ارتعاش، شکل مودهای ارتعاشی و سایر اطلاعات مورد نیاز در بهینه سازی شکل می برنامه به که در دود کار شبکههای المان محدود را برای سد، تکیهگاه ها و مخزن در حالات مختلف بارگذاری تولید می کند. خروجی های برنامه شامل که در محود کار شبکه های المان محدود را برای سد، تکیه گراه شکل مودهای ارتعاشی و سایر اطلاعات مورد نیاز در بهینه سازی شکل می باشد

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

#### مقدمه

شکل هندسی سدهای بتنی قوسی تاثیر به سزایی در رفتار و اقتصاد آن دارد. هندسه بدنه انواع مختلفی دارد که به صورت سدهای قوسی دایرهای تک مرکزی (قلوس با شلعاع 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 دایرهای، پنج مرکزی با قوس دایره ای، سهمی، بیضی و لگاریتمی) میباشند. ایراد سدهای تک مرکـزی ایـن اسـت کـه معمـولاً تمرکز تنش در تکیه گاه ها قابل توجه است و صرفاً در درههای 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 خمـشی در قـوس سـهمی بمراتب کمتر از تنش در قوس دایرهای است. هم چنین حجم بدنه قوس دایرهای 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

عنوان هادی سهمی انتخاب شده و محور سهمی مار بر طره مرکزی می باشد.

در تحقیقات قبلی [۱۵–۸،۱۲،۱۰–۵]، 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 دقيقاً مشخص نمى شوند. هم چنين اين معادلات در حالتي که در شکل دره نقطه عطف باشد، نمی توانند هندسه سد را به خوبی مدل سازی نمایند. نکته دیگر آنکه طراحی سدها معمولاً بر سعى و خطا استوار است و آمادهسازى شبكه المان محدود به صورت غیر خودکار بسیار طاقت فرسا بوده و لازم است در هر مرحلهای که شکل سد عوض می شود، هندسه و شبکه المان محدود تعیین گردد. در زمینه تحلیل سدهای بتنى برنامههايي وجود دارند كه معمولا براى قوس افقى دایرهای تهیه شدهاند و نمی توان هندسه های سهموی را با آنها مدل و تحلیل نمود و تهیه فایل ورودی برای آنها به سادگی میسر نمیاشد که از جمله آنها می توان به برنامهايي چون ADAP88 ، EADAP و ADAP86 و EACD3D96

Email: mahmadi@modares.ac.ir , ۸۸۰۰۶۵۴۴ , ۸۸۰۰۶۵۴۴ ، Email: mahmadi@modares.ac.ir \* نویسنده مسئول : تلفن : ۸۸۰۰۶۵۴۴ , فاکس : ۶*۵۸۰۰۶۵۴۴* ، *WWW*.SID.ir فرمول بندی هندسه سد سیستمها مختصات

مطابق شکل (۱) هندسه ساختگاه در سیستم دکارتی با محورهای  $x_s, y_s, z_s$  تعیین می گردد. این سیستم مختصات در تمام مراحل طراحی ثابت می باشد. 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 میباشد. محور  $z_s$  قائم و به سمت بالاست. هندسه سد نیز در سیستم دکارتی با محورهای  $z_b, y_d$  می باشد. 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 می آورد. محورهای  $y_b, y_d$  نیز در صفحه افق قرار داشته و محور  $z_d$  از وجه بالا دست در تاج طره (درزه) مرکزی عبور و صفحه قائم  $z_s - z_s$ , را در نقطه C قطع می کند. محور  $z_d$  از نقطهٔ C گذشته و عمود بر صفحه طره و جهتش به سمت راست بدنه سد می باشد. رابطه هر نقطهٔ دلخواه در دو سیستم مختصات به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{S}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{S}} \\ \mathbf{z}_{\mathrm{S}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{C}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{C}} \\ \mathbf{z}_{\mathrm{C}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_{\mathrm{c}} & -\sin\theta_{\mathrm{c}} & \mathbf{0} \\ \sin\theta_{\mathrm{c}} & \cos\theta_{\mathrm{c}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{z}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix}$$
(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، c مختصات سیستم مختصات سد و  $\theta_c$  زاویه چرخش سیستم مختصات سد میباشد.



شکل ۱: سیستم های مختصات سد و ساختگاه.

هندسه ساختگاه

هدف از این بخش تعیین سطح سنگ بستر سالم با استفاده از سطح توپوگرافی و عمق حفاری در تکیهگاه ها می باشد.

بدین منظور مثلثی 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 می شود، که در امتداد ارتفاع سد از سه مجموعه معادلات اسپیلاین هرمیتی استفاده می کند. 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 می باشد [ ۸-۵]. برای این منظور برنامهای به زبان فرترن تهیه شده است که از قابلیت های شئ گرایی نسبی آن نظیر قطعـه` ، ارثبـری ً كپسولسازي"، نـوع داده ، اشاره گـر ، و آرايـه دينـاميكي استفاده فراوانی شده است[۲]. قطعه یا کلاس یکی از قابلیت های بزرگ زبان های شئ گرا می باشد که برنامههای اخیر مهندسی از این قابلیت استفاده می نمایند. با توجه به این که تحلیل و طراحی سدهای بتنی قوسی با دادههای زیادی سر و کار دارد، به کارگیری قطعات با کالاس ها و استفاده از خواصی نظیر ارثبری منجر به توسعه سریع و کارآمد برنامههای بزرگ میشود؛ لذا در این تحقیق از امکانات فوق به نحو مطلوبی استفاده شده است[۲٫۵]. این برنامه در آینده دارای قابلیت تعیین شکل بهینه سدها خواهد گردید. در این نرم افزار با توجه به توپوگرافی ساختگاه سد و شكل دره، هندسهٔ اوليه سد توسط طراح ساخته مي شود. سپس شبکه المان محدود برای تحلیل بدنه و تکیه گاه تولید شده و تحلیل استاتیکی و دینامیکی انجام می گیرد. اگر تنش های کششی و فشاری سد در محدوده مجاز بودند، این سد از نظر طراحی قابل قبول بودهه (هـر چنـد لزومـاً بهینـه نیست)، والا باید هندسه سد تعویض و تحلیلهای 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 تكيه گاه ها، نقاط شروع ناحيه ضخامت متغير و میزان حفاری در تکیهگاه ها تعیین می شود. هر کدام از این معلوم بوده و  $H_c, H_u, H_m, H_b$  معلوم بوده و  $H_c, H_u, H_m, H_b$ در نهایت هندسه بدنه سد توسط منحنیهای اسپیلاین در دیگر ترازهای ارتفاعی مشخص می شود. پس از تکمیل بدنه سد، تکیه گاه های سد در صورت عدم وجود داده های توپوگرافی به شکل زین اسبی تولید شده، و پس از تحلیل سازه نتایج ارزیابی می گردد.

(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 مفروض در مفحهای که شامل مثلث است، به صورت رابطه (۲) می باشد.

$$\mathbf{S} = \mathbf{v}_1 \mathbf{z}_1 + \mathbf{v}_2 \mathbf{z}_2 + \mathbf{v}_3 \mathbf{z}_3 \tag{(Y)}$$

کوشه  $\mathbf{v}_i$  مختصات مساحت  $z_1 = z_2 + z_2 + z_3$  و  $\mathbf{v}_i$  مختصات گوشه  $z_i$  مثلث روی سطح توپوگرافی است.



با جای گذاری z<sub>3</sub> =1-z<sub>1</sub>-z<sub>2</sub> در رابطه (۲)، رابطه (۳) بدست میآید.

$$= \mathbf{v}_3 + (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)\mathbf{z}_1 + (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_3)\mathbf{z}_2$$

اگر  $0 \leq z_1, z_2, z_3$  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 می شود. بردار واحد  $\mathbf{e}_1$  از A به B انتخاب شده و بردار واحد  $\mathbf{e}_3$  به صورت عمود بر صفحه مثلث است.

$$\mathbf{e}_{1} = \frac{\mathbf{v}_{2} \cdot \mathbf{v}_{1}}{|\mathbf{v}_{2} \cdot \mathbf{v}_{1}|} \tag{(f)}$$

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

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

$$\mathbf{w}_{i} = \mathbf{v}_{i} + \mathbf{d}_{i}\mathbf{e}_{3} \tag{(2)}$$

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

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

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

میآید. برای هموار شدن سطح از متوسط گیری بردارهای نرمال سطح مثلث ها استفاده میشود (رابطه ۸):  $\mathbf{a} = \frac{1}{m} (\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_2 + ... + \mathbf{n}_m)$  (۸)  $\lambda$  (۸)  $\lambda$  در آن n بردار نرمال ناشی از هر مثلث و m تعداد مثلث های مجاور نقطه i میباشد. در نهایت مختصات صفحه سنگ سالم  $\mathbf{w}_i$  که از روی نقاط توپوگرافی  $\mathbf{v}_i$  به دست میآید. به صورت رابطه زیر است:  $\mathbf{w}_i = \mathbf{v}_i + \mathbf{d}_i \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|}$  (۹)

## شکل درزه مرکزی

شکل طره مرکزی توسط متغیرهای P<sub>b</sub>,P<sub>m</sub>,P<sub>u</sub>,P<sub>c</sub> و تعیین شده (شکل۳) و مختصات نقاط درون یابی در لبههای بالا دست و پایین دست پروفیل درزه به صورت زیر می باشد.

$$\begin{split} H_{b} : & y_{u1} = -P_{b}T_{b} , y_{d1} = (1 - P_{b})T_{b} \\ H_{m} : & y_{u2} = -(1 + P_{m})T_{m}, y_{d2} = -P_{m}T_{m} \\ H_{u} : & y_{u3} = -(1 + P_{u})T_{u} , y_{d3} = -P_{u}T_{u} \\ H_{c} : & y_{u4} = 0 , y_{d4} = T_{c} \end{split}$$
 (1.1)



شکل ۳: مقطع طره مرکزی (بدون مقیاس).

برای تعیین پروفیل رویههای بالا دست ( y<sub>u</sub>) و پایین دست طره ( y<sub>u</sub>) مرکزی در ارتفاع دلخواه z از اسپلاینهای درجه سوم به صورت زیر استفاده می شود:

- $y_u = Spline(z, y_{ui}, H_i)$ (11)
- $y_d = Spline(z, y_{di}, H_i)$  (17)

و ضخامت طره مرکزی نیز در هر ارتفاع دلخواه از رابطه (۱۳) قابل محاسبه می باشد: (٣)

$$T = y_{d} - y_{u} = Spline(z, y_{di}, H_{i}) - Spline(z, y_{ui}, H_{i})$$
(17)

ضخامت بدنه سد

با توجه به شکل (۴) وجه بالا دست سد به دو ناحیه یکی ناحیه ضخامت ثابت  $_{2}Z_{c}$  و دیگری ناحیه ضخامت متغیر در راست و چپ تقسیم میشود که با  $_{3}Z_{c}$  مشخص شدهاند. ضخامت بدنه سد در هر تراز در ناحیه  $_{2}Z_{c}$  مشخص طره مرکزی در همان تراز مساوی بوده و در نواحی  $_{3}Z_{c}$  و  $_{2}Z_{c}$  مخامت در همان تراز مساوی بوده و در نواحی  $_{2}Z_{c}$  و تا ضخامت در هر تراز به صورت سهمی از ضخامت در  $_{2}Z_{c}$  و تا ضخامت در تکیه گاه ها تغییر می کند. ضخامت بدنه سد در تکیه گاه های راست و چپ با پارامترهای  $_{3}T_{mr}$ ,  $T_{mr}$ ,  $T_{ur}$ ,  $T_{cr}$ ارتفاعی با توابع اسپیلاین به شکل زیر درون یابی می شود.  $T_{aR} = \text{Spline}(z, T_{iR}, H_{i}), T_{aL} = \text{Spline}(z, T_{iL}, H_{i})$ 



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

شکل قوسهای افقی

ناحيه 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  $y_D$  رأس به صورت تابعی از  $z_D$  از معادلات (۱۱) و (۱۲) به دست میآید. شعاع های انحنای r سهمی در چهار تراز مرجع  $H_b, H_m, H_u, H_c$  به عنوان متغیرهای طراحی مرجع  $R_b, R_m, R_u, R_c$ درون یابی میشود.

$$r = Spline(z, H_i, R_i)$$
(1 $\Delta$ )

که در آن  $H_i$  نقاط درون یابی و  $R_i$  شعاعهای انحنای قوس افقی در ۴ تراز مرجع می باشد. معادلهٔ سهمی AB با مختصات رأس  $(a_x,a_y)$  و شعاع انحنای r به صورت رابطه زیر (۱۶) میباشد:  $y = a_y + \frac{1}{2r}(x - a_x)^2$  (۱۶)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x \cdot a_x}{x} = \alpha \tag{1V}$$

فرض کنید نقطه P در منحنی AB دارای مختصات  $\mathbf{t}_p$  باشد. در این صورت بردار مماس واحد  $\mathbf{t}_p$  و بردار نرمال واحد  $\mathbf{n}_p$  در P به صورت روابط زیر (۱۸) و (۱۹) خواهد بود.

$$\mathbf{n}_{p} = \begin{bmatrix} n_{x} \\ n_{y} \end{bmatrix}_{p} = \begin{bmatrix} -t_{y} \\ t_{x} \end{bmatrix}$$
(1A)

$$\mathbf{t}_{\mathrm{p}} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{\mathrm{x}} \\ \mathbf{t}_{\mathrm{y}} \end{bmatrix}_{\mathrm{p}} = \begin{bmatrix} \overline{\sqrt{1 + \alpha^{2}}} \\ \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^{2}}} \end{bmatrix}$$
(19)

منحنی CD که از روی سهمی AB استخراج می شود، طوری است که ضخامت T در جهت  $\mathbf{n}_p$  ثابت می باشد چنانچه است که ضخامت T در جهت  $\mathbf{n}_p$  ثابت می باشد چنانچه یک سیستم مختصات محلی  $y_1,y_2$  با پایه های  $\mathbf{n}_p$  در نقطه P در نظر بگیرید محور  $y_2$  منحنی CD را در نقطه idea می کند. معادله قوس پایین دست آن از رابطه زیر به دست می آید:  $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_p + T\mathbf{n}$ 

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

$$\beta = \frac{dy_{Q}}{dx} = \frac{dy_{P}}{dx} + T \frac{dn_{y}}{dx} = \alpha (1 - \frac{T}{r} (1 + \alpha^{2})^{-1.5})$$
(71)

ضمن این که بردار مماس و نرمال واحد t<sub>o</sub> و n<sub>q</sub> بر منحنی CD در نقطه Q در روابط (۲۲) و (۲۳) ارائه شدهاند.

$$\mathbf{n}_{Q} = \begin{bmatrix} n_{x} \\ n_{y} \end{bmatrix}_{Q} = \begin{bmatrix} -t_{y} \\ t_{x} \end{bmatrix}_{Q}$$
(YY)  
$$\mathbf{t}_{Q} = \begin{bmatrix} t_{x} \\ t_{y} \end{bmatrix}_{Q} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^{2}}} \\ \frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^{2}}} \end{bmatrix}$$
(YY)

#### ناحيه ضخامت متغير

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



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

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

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

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

در مختصات محلی موقعیت نقطه F نسبت به نقطه E طوری تعیین می گردد که ضخامت عمود بر وجه نقطه Cr۹)  $\mathbf{X}_{F} = \mathbf{X}_{B} + T_{a} \mathbf{n}_{B}$ (۲۹) موقعیت  $\begin{bmatrix} Z_{1F} \\ Z_{2F} \end{bmatrix} = Z_{F}$ با جایگذاری رابطه (۲۹) در رابطه (۲۶) به رابطه زیر تبدیل می گردد.  $\mathbf{Z}_{F} = \mathbf{R}_{E}^{T} (\mathbf{X}_{B} - \mathbf{X}_{E} + T_{a} \mathbf{n}_{B})$ 

مختصات پائین دست در نواحی ضخامت متغیر نقطه P را در وجه بالا دست سهمی AB در ناحیه ضخامت متغیر EF در نظر بگیرید (شکل۵). بردار نرمال واحد  $\mathbf{n}_{P}$  در نقطهٔ P سهمی EF را در نقطهٔ Q نقطع می کند. مختصات نقطه Q در سیستم مختصات سد قطع می کند. مختصات نقطه Q در سیستم مختصات سد به صورت رابطه زیر بوده که در آن T ضخامت قوس در نقطهٔ دلخواه P می باشد. (۳۱) نقطهٔ دلخواه P می باشد. با جای گذاری رابطه (۲۶) در رابطه (۳۱) رابطه زیر به  $\mathbf{X}_{E} + \mathbf{R}_{E} \mathbf{Z}_{Q} = \mathbf{X}_{P} + \mathbf{T} \mathbf{n}_{P}$  (۳۲) دست می آید: که با ضرب خارجی بردار  $\mathbf{r}$  در آن رابطه زیر حاصل که با ضرب خارجی بردار  $\mathbf{r}$  در آن رابطه زیر حاصل میشود، که در آن  $L_{iR} = L_{bR}, L_{mR}, L_{uR}, L_{cR}$  عرض سد در سمت 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 میآید:

$$\overline{L}_{i} = S_{i} L_{iL} (\Upsilon F)$$

که در آن ، $\overline{R}_i$  به ترتیب عرض های راست و چپ در ۴ تراز مرجع میباشد. پهنای ناحیه ضخامت ثابت در ارتفاع دلخواه z با توابع زیر درون یابی میشود.

$$L_{Right} = Spline(z, \overline{R}_i, H_i)$$

$$L_{Left} = Spline(z, \overline{L}_i, H_i)$$
(Y $\Delta$ )

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 میشود. در نقطه E مختصات محلی تا  $z_1, z_2$  محاسبه میشود. در نقطه J مختصات محلی  $z_1, z_2$  به صورتی تعیین می گردد که  $t_B = t_B$  پایههای آن باشند. تبدیل مختصات نقطه دلخواه بین سیستم های  $x_D, y_D$ 

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{E}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{E}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{\mathrm{x}} & \mathbf{n}_{\mathrm{x}} \\ \mathbf{t}_{\mathrm{y}} & \mathbf{n}_{\mathrm{y}} \end{bmatrix}_{\mathrm{E}} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{\mathrm{1}} \\ \mathbf{z}_{\mathrm{2}} \end{bmatrix}$$
(YF)

سیستمهای مختصات برای نواحی ضخامت متغیر فرض کنید ضخامت قوس از T در نقطهٔ U تا T<sub>a</sub> در نقطه B تغییر کند و منحنی EF نیز یک سهمی با رأس E باشد که در نقطهٔ E بر منحنی CD مماس می باشد (شکل ۵). شعاع انحنای این سهمی ( <sub>F<sub>E</sub></sub> ) طوری انتخاب می شود که سهمی از نقطهٔ F عبور کند.

$$\mathbf{X}_{\mathrm{S}} = \mathbf{X}_{\mathrm{C}} + [\mathbf{R}] \mathbf{X}_{\mathrm{D}} = \mathbf{q}_{1} + \mathbf{q}_{2} \psi + \mathbf{q}_{3} \psi^{2}$$
 (F7)

$$\mathbf{q}_{1} = \begin{vmatrix} \mathbf{x}_{c} + \mathbf{x}_{E} \cos \theta_{c} - \mathbf{y}_{E} \sin \theta_{c} \\ \mathbf{y}_{c} + \mathbf{x}_{E} \sin \theta_{c} + \mathbf{y}_{E} \cos \theta_{c} \\ \mathbf{z}_{c} + \mathbf{a}_{c} \end{vmatrix}$$
(**f** $\mathbf{w}$ )

$$\mathbf{q}_{2} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{x_{E}} \cos\theta_{c} - \mathbf{t}_{y_{E}} \sin\theta_{c} \\ \mathbf{t}_{x_{E}} \sin\theta_{c} + \mathbf{t}_{y_{E}} \cos\theta_{c} \\ 0 \end{bmatrix}$$
(\*\*)

$$\mathbf{q}_{3} = \begin{bmatrix} n_{x_{E}} C_{d} \cos \theta_{c} - n_{y_{E}} C_{d} \sin \theta_{c} \\ n_{x_{E}} C_{d} \sin \theta_{c} + n_{y_{E}} C_{d} \cos \theta_{c} \\ 0 \end{bmatrix}$$
(\$\mathcal{F} \Delta)

 $\mathbf{w}_{3} + (\mathbf{w}_{1} - \mathbf{w}_{3})z_{1} + (\mathbf{w}_{2} - \mathbf{w}_{3})z_{2} = \mathbf{q}_{1} + \mathbf{q}_{2}\psi + \mathbf{q}_{3}\psi^{2}$  (۴۶) (۷) با ضرب خارجی معادلهٔ فوق در  $e_{3}^{T}$  و استفاده از رابطه (۷) خواهیم داشت:

 $\mathbf{e}_{3}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\psi} = \mathbf{e}_{3}^{\mathrm{T}}\mathbf{q}_{1} + \mathbf{e}_{3}^{\mathrm{T}}\mathbf{q}_{2}\boldsymbol{\psi} + \mathbf{e}_{3}^{\mathrm{T}}\mathbf{q}_{3}\boldsymbol{\psi}^{2}$ (**fV**)

معادله درجه دوم فوق برای محاسبهٔ  $\psi$  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 تسهمی پائین دست طوری در بخش های قبل محاسبه شود (معمولاً این نقطه روی بردار نرمال گذرنده از B واقع شود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ بستر است). برای شود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ بستر است). برای مود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ مستر است). درای شود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ مستر است). نقاط شود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ مستر است). مرای شود (معمولاً این نقطه خارج از سنگ مستر است). مرای شود (معمولاً این مقطه خارج از سنگ مستر است). مرای شود (معمولاً این مقطه خارج از سنگ محتصات را که مختصات محتصات محتصات م که از امتداد دادن سهمی AB به دست آید.



شکل ۶: برخورد قوس افقی با تکیه گاه

در رابطه زیـر (۴۸) <sub>H</sub> عبارت از تقاطع سـهمی EF با سنگ بستر می باشد:

$$\begin{split} \mathbf{t}_{p}^{\mathrm{T}} \mathbf{X}_{\mathrm{E}} + \mathbf{t}_{p}^{\mathrm{T}} \mathbf{R}_{\mathrm{E}} \mathbf{Z}_{Q} = \mathbf{t}_{p}^{\mathrm{T}} \mathbf{X}_{p} \\ & \frac{\overline{B}}{2r_{\mathrm{E}}} z_{1Q}^{2} + \overline{A} z_{2Q} + \overline{C} = \mathbf{0} \\ & \overline{A} = t_{xp} r_{11} + t_{yp} r_{21} :: \overline{B} = t_{xp} r_{12} + t_{yp} r_{22} :: \overline{C} = t_{p}^{\mathrm{T}} (\mathbf{X}_{\mathrm{E}} - \mathbf{X}_{p}) \end{split}$$
(77)

که در آن  $\begin{bmatrix} t_x & n_x \\ t_y & n_y \end{bmatrix}_E r_{ij} = \mathbf{R}_E = \begin{bmatrix} t_x & n_x \\ t_y & n_y \end{bmatrix}_E$  مماس ها در نقطه P میباشند. با جای گذاری  $z_2$  از رابطه (۲۸) رابطه زیر حاصل میشود:

$$\frac{\overline{B}}{2r_{E}}z_{1}^{2}+\overline{A}z_{1}+\overline{C}=0$$
 (٣f)

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

$$\frac{\overline{B}}{2r_{E}}z_{L}^{2}+\overline{A}z_{2}+\overline{C}=0$$
 (°a)

$$z_2 = \frac{z_1^2}{2r_{\rm E}} \tag{(77)}$$

$$\mathbf{X}_{Q} = \mathbf{X}_{E} + \mathbf{R}_{E} \mathbf{Z}_{Q}$$
(٣Y)

$$\overline{T} = \mathbf{n}_{p}^{T} (\mathbf{X}_{Q} - \mathbf{X}_{P})$$
(\mathcal{T}\Lambda)

#### تقاطع قوس افقي با سنگ بستر

رابطه (۱۶) وجه بالا دست سهمی را در سیستم مختصات سد مشخص میکند. مختصات x<sub>P</sub> به عنوان پارامتر دلخواه ψ انتخاب میشود. با استفاده از رابطه (۱۶) داریم:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{z}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_{\mathrm{y}} \\ \mathbf{a}_{\mathrm{z}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{2r} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \boldsymbol{\psi}^{2} \end{bmatrix}$$
(79)

سهمی رابطه (۲۸) در وجه پایین دست ناحیه ضخامت متغیر در سیستم مختصات محلی به صورت زیر میباشد:  $z_2 = z_{2F} \left( \frac{Z_1}{Z_{1F}} \right)^2 = C_d Z_1^2$  (۴۰)

مختصات z<sub>۱</sub> نیز به عنوان پارامتر دلخواه در این سیستم مختصات انتخاب میشود که برای تعیین مختصات نقاط سد روی سهمی به کار می رود.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{y}_{\mathrm{D}} \\ \mathbf{z}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{a}_{z} \end{bmatrix}_{\mathrm{E}} + \begin{bmatrix} \mathbf{t}_{x} & \mathbf{n}_{x} \mathbf{C}_{d} \\ \mathbf{t}_{y} & \mathbf{n}_{y} \mathbf{C}_{d} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{\mathrm{E}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} \\ \boldsymbol{\psi}^{2} \end{bmatrix}$$
(۴1)

معادله سهمی در سیستم مختصات ساختگاه به صورت زیر در میآید:

$$y_{\rm G} = a_{\rm y} + \frac{1}{2r} (x_{\rm G} - a_{\rm x})^2 \qquad a_{\rm x} = 0$$
 (49)

 $\mathbf{x}_{\mathrm{G}} = \mathbf{x}_{\mathrm{B}} + (\mathbf{x}_{\mathrm{H}} - \mathbf{x}_{\mathrm{F}})$ 

# درون یابی هرمیتی

با توجه به شکل (۷) فرض کنید محاسبه مقدار (۲) در ارتفع دلخواه z مورد نظر باشد. مقادیر f در  $f_z$ نقطه درون یابی  $f_b, f_m, f_u, f_c$  معروم میباشند. از بین این ۴ نقطه، ۳ قطعه منحنی درجه ۳ میگذرد که مقدار f در هر قسمت به صورت زیر می باشد:

$$\vec{\mathbf{f}} = \mathbf{Q} \mathbf{f}^{T}$$

$$\vec{\mathbf{f}} = \{\mathbf{f}_{i}, \mathbf{h}_{i} \mathbf{f}_{i}', \mathbf{f}_{i+1}, \mathbf{h}_{i} \mathbf{f}_{i+1}'\}$$

$$\mathbf{Q} = \{\mathbf{Q}_{1}, \mathbf{Q}_{2}, \mathbf{Q}_{3}, \mathbf{Q}_{4}\}$$

$$(\Delta \cdot )$$

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

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

مقادیر '<sub>f</sub>i در ۴ تراز مبنا نیز از رابطه زیر به دست میآید: مقادیر ۲٬ ۲۰ ۲ میآید:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{b}' \\ \mathbf{f}_{u}' \\ \mathbf{f}_{c}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{4313}{1342} & \frac{40123}{9394} & \frac{40323}{4697} & \frac{224}{671} \\ \frac{-1435}{1342} & \frac{-9795}{9394} & \frac{13056}{4697} & \frac{-448}{671} \\ \frac{175}{671} & \frac{-8625}{4697} & \frac{-2988}{4697} & \frac{1484}{671} \\ \frac{-175}{1342} & \frac{8625}{9394} & \frac{-26688}{4697} & \frac{3284}{671} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{b} \\ \mathbf{f}_{u} \\ \mathbf{f}_{c} \end{bmatrix}$$
 ( $\Delta \Upsilon$ )

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

$$f(z) = \frac{1}{4} [Q_1 f_1 + Q_2 h_1 f_1' + Q_3 f_{i+1} + Q_4 h_1 f_{i+1}']$$
  
h\_i = .200, h\_i = .175, h\_i = .125 (\Delta \Upsilon)



## شبکه المان محدود و بارگذاری ها

پس از ساخته شدن هندسه سد و تکیهگاه ها، شبکه المان محدود برای سه حالت بارگذاری 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 هرچند نحوه شماره گذاری المان ها چندان اهمیتی ندارد. چندین شبکه المان محدود برای بارگذاری وزن در نظر گرفته شده است که به تعداد دفعات تزریق بستگی دارد. به طور مثال اگر کاربر سه  $\frac{H}{3}$  مرحله تزریق در نظر بگیرد، درمرحله اول بدنه سد تا مدل شده و به صورت طرههای زوج و فرد مجزا تحلیل می شوند تا پایداری آنها کنترل شود. در مرحله دوم تمام طرهها تا  $rac{\mathrm{H}}{3}$  بصورت پوسته یکپارچه فرض شده و از ارتفاع تا  $\frac{2H}{3}$  تا  $\frac{2H}{3}$  بصورت طرەھای زوج و فرد تحلیل و کنترل پایداری روی آنها صورت می گیرد. درمرحله آخر طرهها تا به از  $\frac{2H}{3}$  پوسته یک پارچه فرض شده و از  $\frac{2H}{3}$  تا تاج سد به  $\frac{2H}{3}$ صورت زوج و فرد مجزا بارگذاری و تحلیل میشوند. در هر مرحله تنش های مرحله قبل با تنش های حاصل از بارگذاری طرههای مجزا جمع می شوند. در نهایت پوسته کاملاً یک پارچه (تزریق شده) برای سایر بارگذاری ها آماده می شود. در مدل المان محدود برای بارگذاری

هيدرواستاتيک مخزن سد مدل نمي شود، بلکه نيروي حاصل از فشار هیدرواستاتیک در رویه بالادست بدنه سد و مخزن بر گردها محاسبه و اعمال می گردد. در نهایت شبکه المان محدود برای حالت دینامیکی ساخته شده و تحلیل دینامیکی انجام می شود. برای بدنه سد از المان های جامد هشت گرهی و برای ناحیه برخورد سد با تکیهگاه ها از المان های گوهای شش گرهی یا المان جامد هشت گرهی تحول یافته استفاده شده است. برای بهبود بخشیدن به نتایج تحلیل تنش های مرز بدنه و پی، شبکه المان بدنه سد طوری طراحی شده است که المان های مثلثی که در محل برخورد سد و تكيه گاه به وجود مى آيند به لايه بالايى منتقل شوند (شكل١١). شبكهبندى تكيه گاه ها به دلخواه کاربر به صورت غیریکنواخت شبکهبندی می شود. به طوری که ابعاد المان ها در محل برخورد با سد کم و به تدريج با دور شدن از سد ابعاد آنها افزايش مي يابد (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 بارگذاری های استاتیک و زلزله ساخته شده و نتایج هر شبکه به صورت مجزا در فایل هایی ذخیره میشوند. در نهایت نتایج سه بارگذاری با هم جمع آثار میشوند. تحلیل المان محدود در این برنامه توسط EFEAP انجام می گیرد، که نسخه بازنگری شده FEAPpv می باشد[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 بندی های بخش ۲ و با فرض شکل دره به صورت منشوری، هندسه سد با استفاده از ۳۸ متغیر طراحی زیر ساخته میشود:

$$\begin{split} \overline{X}_{1} &= \{ x_{c} = 0, y_{c} = 0, \theta_{c} = 0 \} \\ \overline{X}_{2} &= \{ P_{c} = 1, P_{u} = .10, P_{m} = .30, P_{b} = .80 \} \\ \overline{X}_{3} &= \{ T_{c} = 7, T_{u} = 12.5, T_{m} = 18.5, T_{b} = 27 \} \\ \overline{X}_{4} &= \{ R_{c} = 168, R_{u} = 129, R_{m} = 97, R_{b} = 76 \} \\ \overline{X}_{5} &= \{ T_{cr} = T_{cl} = 7, T_{ur} = T_{ul} = 17, T_{mr} = T_{ml} = 24, T_{br} = T_{bl} = 27 \} \\ \overline{X}_{6} &= \{ t_{c} = s_{c} = 0.5, t_{u} = s_{u} = 0.5, t_{m} = s_{m} = 0.5, t_{b} = s_{b} = 0.50 \} \\ \overline{X}_{7} &= \{ d_{cr} = d_{cl} = 5, d_{ur} = d_{ul} = 5, d_{mr} = d_{ml} = 5, d_{b} = 5 \} \end{split}$$

که در آن  $x_c, y_c, \theta_c$  متغیرهای جانمایی محور سد در ساختگاه،  $P_c, P_u, P_m, P_m, P_b$  پارامترهای برآمدگی رویههای بالا دست و پایین دست طره مرکزی،  $T_c, T_w, T_m, T_b$  ضخامت طره مرکزی،  $R_c, R_u, R_m, R_b$  شعاع انحنای رأس سهمی در رویه بالا دست،  $T_c, T_u, T_m, T_b$  شعاع انحنای رأس سهمی در تکیهگاه های راست و چپ،  $T_c, T_u, T_m, T_b$  فخامت شروع ناحیه ضخامت متغیر در راست و چپ در ۴ تراز  $H_c=H, H_u=.75H, H_m=.40H, H_b=0$  و ا  $h_c=H, H_u=.75H, H_m=.40H, H_b=0$  های مرجع درون یابی  $h_c, h_u, H_m$  و مقاری در تکیهگاه های راست و چپ در ترازهای  $H_c, H_u, H_m$  و  $H_c, H_u, H_m$  و مقاری در تکیه گاه های راست و چپ در ترازهای  $H_c, H_u, H_m$  و معمق حفاری در تکیه گاه های

نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۴، مرداد ماه ۱۳۸۷



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 قوس های افقی، ستون چهارم ضخامت سد در تکیهگاه های 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.



طراحی شکل سد های بتنی .....

جدول ۱ : مشخصات هندسی سد در ترازهای مختلف.					
H(m)	T(m)	R(m)	Ta(m)	Li(m)	Angel
•	۲۷/۰۰	۲۶/۰۰	۲۷/۰۰	۱۰۶/۸۱	۲۰/۱۹
١٠	20/61	<b>۲۹/۶۱</b>	78/08	18./62	VX/84
۲.	۲۳/۸۳	λ٣/٣٢	78/10	104/71	<u>አ</u> ۵/۷۹
٣.	77/78	۸۷/۲۳	20/08	179/97	٩١/٧٧
۴۰	۲۰/۷۶	۹١/۴۳	۲۴/۹۳	200/21	٩۶/٧٠
۵۰	१९/۲९	٩۶/٠٣	۲۴/۱۷	۲۳۱/۷۴	۱۰۰/۷۰
۶.	١٧/٨٧	1 • 1/17	73/74	۲۵۸/۱۰	۱۰۳/۸۴
٧٠	18/48	1.8/98	۲۲/۰۸	የለዮ/٣٣	۱ <i>۰۶</i> /۰۹
٨٠	۱۵/۰۹	११९/४९	۲۰/۶۰	٣•٩/٩٣	1.4/47
٩٠	18/84	१८१/४१	۱۸/۷۲	874/40	۱۰۷/۸۲
۱۰۰	17/11	۱۳۱/۵۸	18/88	۳۵۷/۵۱	۱۰۷/۲۹
11.	1./48	142/71	۱۳/۵۲	۳۷۹/۱۱	۱۰۶/۰۱
17.	٨/٧۵	100/14	1./٣۴	۳۹۹/۸۲	۱۰۴/۳۸
13.	٧/٠٠	١۶٨/٠٠	٧/٠٠	42./21	1.4/21



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



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

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

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 رعنایی 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 تکیه گاه ها (مؤلفان)

جدول ۲ : مقایسه مشخصات سد شهید رجایی				
حجم بدنه (مترمكعب)	ضريب رعنايي			
۵۸۹۰۰۰	14/4	مؤلفان		
۶.۳	14/+	James a.h		

جناون ۱. فليير مان في ملك (فحين اللك فياني).				
ناج طره مرکزی (mm) [م]	حداکثر تغییر مکان : انا	مؤلفه	بارگذاری	
مرجع[۲]	مولقان			
•/••	•/••	U <sub>D</sub>		
-•/٢١	-•/••۵	V <sub>D</sub>	وزن	
۳۸/۵–	-\lambda/\lambda)	$W_{\rm D}$		
•/••	•/••	U <sub>D</sub>		
۳۱/۶۰	۳۷/۴۰	V <sub>D</sub>	وزن+آب	
-•/Y۶	-•/۵١	W <sub>D</sub>		

تغيير مكان تاج سد (تحليل استاتيكي).	حدول ۳:
-------------------------------------	---------

(تحليل استاتيكي)	$\sigma_1$ (MPa) کششی $\sigma_1$	دول ۴ : حداکثر تنش ً
------------------	----------------------------------	----------------------

پايين دست		بالادست		م انقرار
مرجع [٩]	مؤلفان	مرجع [٩]	مؤلفان	باركداري
•/84	٠/٩٠	٠/٧٩	٠/٩١	وزن
٠/۴١	•/٢٨	۵/۵۹	٣/٠١	وزن+آب

جدول ۵: حداکثر تنش فشاری(MPa) (تحلیل استاتیکی  $\sigma_3$ 

پايين دست		بالادست		ا گذار
مرجع [٩]	مؤلفان	مرجع [٩]	مؤلفان	بارتدارى
-۲/۰۰	-1/97	-۴/٩٠	-۴/۰۰	وزن
-۵/۶·	-۶/۰۰	-4/2+	-۵/۲۰	وزن+آب

جدول ۶: فرکانس های طبیعی ارتعاش

ں سد(Hz)	شماره م	
مرجع [٩]	مؤلفان	سمارہ مد
۲/۴۰۵۳۹	2/38011	١
۳/۰۱۱۸۰	۲/۸۱۸۳۰	٢
٣/۴٨٢٧۴	2768677	٣
4/8222	4/81098	۴
۵/۴۷۳۵۹	۵/۱۸۰۶۷	۵
5/20219	۵/۸۸۰۵۵	۶
%/४१४११	۵/۹۷۳۶۰	۷
٧/٩۵۵٧٠	٧/٢٣٧٧۴	٨
٨/١۴۵٧۶	٧/٧٣٨٨٢	٩
٨/۶۵١٣۶	٧/٨۴٠٢۶	١.
٩/٧٣٣۵	٨/۴۵۷۵٩	))
ঀ/ঀৼ৾৾৸৽ৼ	٨/٧٣٩٧٨	١٢
1+/88041	९/١١١٩+	١٣
11/7225	٩/۵٧٢۴٢	14
11/49848	1+/8880	۱۵

# نتیجه گیری و بحث

با توجه به این که مسئله مورد مطالعه با دو روش کاملاً متفاوت مدل سازی میشود، انتظاری در خصوص تطبيق دقيق شكل و مدل المان محدود وجود ندارد. تفاوت ماهوی چندجملهای های درجه سه و توابع اسپیلاین منجر به هندسههای متفاوتی شده که بر شبکههای المان محدود و در نهایت روی نتایج تحلیل ها تاثیر گذار می باشد. نتایج المان محدود در این تحقیق به برخى پارامترها مانند انحناى طره بسيار حساس بوده ضمن این که تنظیم متغیرها بهطوری که مدل سازی حاضر دقيقاً مشخصات سد مورد مطالعه را بدهد، دشوار می باشد. با این وجود، مقادیر جداول (۲) تـا (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 باتوجه 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 میباشد. عامل دیگر در مدل سازی محل سرریز در مرجع [۹] میباشد، که در این تحقیق از مدل سازی آن صرفنظر شده است. عامل مهم در تفاوت تنش ها استفاده از برون یابیهای متفاوت در تصویر 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 قابلیتهای 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 اسپیلاینهای 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 درزهها 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 سازهای آن را کنترل نماید. هم چنین برای تعیین شکل بهینه سدها در تحقیقات آتی، این پارامترها متغیرهای طراحی مسئله بهینهسازی را کاملاً پوشش خواهند داد. این ۳۸ متغیر طراحی طوری در نظر گرفته شدهاند که شکل بهینه بدست آمده تمام ضوابط و محدودیت های طراحی و اجرا را به خوبی پوشش دهند.
- با توجه به انعطاف پذیری بیشتر اسپیلاینها در مقایسه
   با چند جملهای های توانی، در شرایط یکسان، حجم
   بدنه سد در روش اسپیلاین کمتر است.

- این برنامه تحلیل خطی استاتیکی و دینامیکی را برای سدهای بتنی قوسی برای سه حالت بارگذاری غالب انجام میدهد. دادههای 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 تحليل بارگذاری های وزن، هیدرواستاتیک و دینامیک می پردازد و قابل قبول بودن طرح را کنترل و به طراح اعلام مي كند.
  - کاربرد این برنامه برای طراحی سدهای جدید و کنترل سدهای ساخته شده بسیار آسان میباشد.
  - در این برنامه از قابلیت های شئ-گرایی، پایگاه دادهها، مديريت حافظه و مدولار بودن زبان فرترن استفاده فراوانی شده است. این امر به توسعه نرم افراز 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, 2<sup>nd</sup> 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-Ghods & 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. ansd Taylor, R. L. (1989). The Finite Element Method, Vol. 1, McGraw-Hill, London, 4th ed.. واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن ۲۰۰۵ - Encapsulation 4 - Type
- 1 Module 2 - Inheritance
- 5 Pointer 6 - Dynamic array

شایانی خواهد نمود. هر چند قدرت شئ-گرایی زبان

فرترن در مقایسه با زبان های برنامه نویسیC++ ، C

• با توسعه این نرم افزار و با در نظر گیری ۳۸ پارامتر ذکر

شده به عنوان متغیرهای طراحی در مسئله

بهینه سازی، میتوان 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 بهینهسازی و محاسبات

گرادیان ها به آن اضافه شود، نرم افزار جامع

بهینهسازی شکل سدهای بتنی قوسی به دست میآید.

• صحت نتايج المان محدود مدل حاضر با نتايج تحليل

سد شهید رجایی مورد مقایسه قرار گرفت.

Java چندان قابل توجه نمی باشد.