



تحلیل ایمنی و ارزیابی رفتار لرزه ای سدهای بتنی قوسی

نورالدین صادقی^{*}، حسن میرزا بزرگ^۲

^{*} دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

(n.sadeghi17@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۸)

چکیده

بررسی رفتار لرزه ای و ارزیابی ایمنی لرزه ای سد های بتنی، بدلیل اهمیت ایمنی سد در هنگام زلزله مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. زیرا تخریب این سازه ها در اثر زلزله می تواند آثار منفی اقتصادی و اجتماعی در پی داشته باشد. در پژوهش حاضر، آنالیز دینامیکی غیر خطی سدهای بتنی وزنی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سد و مخزن انجام شده است. در طی این تحقیق تنش های اصلی حداقلی و حداکثری برای سد و مخزن U شکل با استفاده از قابلیت های نرم افزار Ansys اندازه گیری شده است. پژوهش حاضر به دنبال بررسی ارزیابی سدهای V شکل در شرایط لرزه یا زلزله است. نتایج تحقیق نشان می دهد که آنالیز استاتیکی با رفتار غیر خطی در توده سنگ با لایه های متوسط و ضعیف پایداری بیشتری نسبت به سیستم همگن ضعیف وجود دارد. ولی امکان تمرکز کرنش های پلاستیک در لایه های ضعیف بیشتر است. سایر نتایج این مطالعه نشان داد، تنش های فشاری در بررسی ایمنی سد، بحرانی نبوده و تنش های قوسی کششی ماکزیمم به طور عمده در ترازهای فوقانی بلوک های میانی و همچنین در مجاورت سطح تماس با تکیه گاه های جانبی حاصل شده است.

کلمات کلیدی

سد V شکل، سد U شکل، رفتار لرزه ای، سد بتنی قوسی، ANSYS.



Safety Analysis and Seismic Behavior of Concrete Arch Dams

Noureddin Sadeghi^{1*}, Hasan Mirzabozorg²

^{*1} PhD. candidate, Department of civil engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Assistant professor, Department of civil engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

(n.sadeghi17@gmail.com)

(Date of received: 20/07/2023, Date of accepted: 10/10/2023)

ABSTRACT

Investigation of seismic behavior and seismic safety evaluation of concrete dams has been the focus of many researchers due to the importance of dam safety during an earthquake. Because the destruction of these structures due to an earthquake can have negative economic and social effects. In the present study, the nonlinear dynamic analysis of gravity concrete dams has been done considering the effect of dam-reservoir interaction. In fact, the minimum and maximum principal stresses for the U-shaped dam and reservoir have been measured via ANSYS. Also, the present study seeks to investigate the evaluation of V-shaped dams in seismic conditions. The results show that the static analysis with non-linear behavior in the rock mass with medium and weak layers has more stability compared to the weak homogeneous system. But it is more possible to concentrate plastic strains in weak layers. Other results of this study showed that the compressive stresses in the safety check of the dam were not critical and the maximum tensile arc stresses were obtained mainly in the upper levels of the middle blocks and also in the vicinity of the contact surface with the side supports.

Keywords:

V-shaped dam, U-shaped dam, Seismic behavior, Concrete arch dam, ANSYS.



۱- مقدمه

در میان انواع سدهای ساخته شده، سدهای قوسی از موقعیت ویژه‌ای برخوردار هستند. بیش تر از مصالح ساده‌ای که برای پر کردن دره در سدها مورد استفاده می‌گیرد، شکل این نوع سدها منعکس‌کننده دانش بروز در اندرکنش میان سازه و محیط اطراف سد می‌باشد. شکل‌های اصلی آنها به همراه مسائل زیباشناختی و استحکام ظاهری، از نظر مواد و مصالح اساساً عملکرد سدها را توجیه می‌کند که لازم است نیروهای بسیار بزرگ ناشی از جمع شدن آب را کنترل نمایند. نکته بسیار حائز اهمیت، مسائلی است که در سدهای قوسی بلند مرتبه (بالای ۲۰۰ متر) مطرح می‌شود. در این حالت نیروهای بسیار زیاد ناشی از فشار آب مخزن بر یک دیوار نازک وارد و توسط آن کنترل شود. لذا ایمنی سد، در شرایط عنوان شده موضوع مهمی است که در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که تاکنون هیچ سد بتنی در اثر تحریک زلزله دچار شکست نشده است، اما می‌توان تحلیل، طراحی و ارزیابی سدها را بخش مهمی از مهندسی زلزله دانست. در واقع تنها گزارشی که از شکست کامل سدهای بتنی موجود است، ناشی از شکست تکیه‌گاه سنگی فونداسیون می‌باشد. از طرف دیگر سه مورد مهم از خسارت سدهای بتنی رخ داده است که می‌توان به سد بتنی پایه‌دار Hsinfengkiang در چین تحت زلزله با بزرگی ۶/۵ در سال ۱۹۶۲، سد بتنی وزنی Koyana در هند تحت زلزله با بزرگی ۶/۵ در سال ۱۹۶۷ و سد بتنی پایه‌دار سفیدرود در ایران تحت زلزله با بزرگی ۷/۶ در سال ۱۹۹۲ اشاره نمود. [۱-۴]. پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی قوسی در طول زلزله یکی از مسائل پیچیده در دینامیک سازه‌ها می‌باشد و به عوامل متعددی از قبیل اندرکنش سد با فونداسیون و مخزن، فشار هیدرو دینامیکی ناشی از مخزن، اثرات فونداسیون ناهمگن، وجود درزهای اجرایی در بدنه سد و ترک خوردگی بتن و رفتار غیر الاستیک غیرخطی مصالح بتن بستگی دارد. [۵-۸]. با پیدایش روش اجزای محدود، روش‌های تحلیل سدهای بتنی قوسی تحت تأثیر آن قرار گرفت. برای اولین بار این روش در اواخر دهه ۱۹۵۰ در سدهای قوسی استفاده شد. در ابتدای کار، تحلیل‌ها الاستیک خطی بودند و با پیشرفت در این زمینه، تحلیل غیرخطی سدهای بتنی قوسی نیز با استفاده از این روش انجام شد. با ابداع روش‌های نوین تحلیل سازه‌ها، استفاده از این روش‌ها در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۹].

۲- سوابق مطالعاتی

باقری و کاظمی در سال ۲۰۰۴ قابلیت اطمینان را در فرآیند طراحی سدهای بتنی وزنی مقاوم سازی شده با گیره مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، یک مقایسه بین تراز ایمنی ایجاد شده توسط روش تنش مجاز و روش قابلیت اطمینان انجام پذیرفته است. در این پژوهش رفتار یک سد بتنی وزنی تحت بارهای استاتیکی و بار لرزه ای شبه استاتیکی بررسی شده است. در این مطالعه به منظور تعیین ضریب اطمینان و شاخص قابلیت اطمینان، بزرگ ترین بلوک از سد پابن فلت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد تحلیل مبتنی بر قابلیت اطمینان سدهای بتنی وزنی، شرایط ایمنی بالایی را در تحلیل پایداری سازه فراهم می‌کند [۱۰]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی به بررسی قابلیت اعتماد تنش‌های کششی در فونداسیون سد بتنی وزنی پرداختند. در این مطالعه معادله تابع حالت حدی به منظور تحلیل قابلیت اعتماد کششی در سطح فونداسیون ارائه شده است. از تحلیل اجزا محدود غیرخطی به منظور حصول طول ترک در سطح فونداسیون به منظور محاسبه قابلیت اعتماد استفاده شده است. در این مطالعه از سد وزنی بتن غلتکی لانگتن به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش مذکور قابل اعتماد بود [۱۱]. چیرا و همکاران در سال ۱۹۸۱ به تحلیل قابلیت اعتماد به روش اجزا محدود غیر خطی را در سدهای سنگریزه ای پرداختند. در این مطالعه به منظور بررسی قابلیت اعتماد دال بتنی در یک سد سنگریزه ای به کمک نرم افزار انسیس و تحت بارهای استاتیکی انجام شده است [۱۲].



در سال ۱۹۸۳، گروهی و همکاران، به منظور تخمین احتمال خرابی ناشی از لغزش در سدهای بتنی وزنی روشی را پیشنهاد دادند. ایمنی سد بر پایه تحلیل ریسک، روشی به منظور بیان کمی ریسک در سیستم سد مخزن به شمار می رود. در این مطالعه، از احتمالات یعنی اندازه گیری کمی احتمال شرطی پاسخ سیستم، برای یک رویداد بار متمرکز بر روی سد بتنی وزنی استفاده شده است. هدف از این روش، بهبود احتمال شرطی پاسخ سیستم سد مخزن براساس تکنیک های شبیه سازی عددی، همراه با تکنیک های قابلیت اعتماد و شبیه سازی مونت کارلو بوده است [۱۳]. نوروزی و همکاران در سال ۱۳۹۶ در پژوهشی به تحلیل عددی رفتار دینامیکی سد بتنی وزنی تحت بار انفجاری داخل مخزن پرداختند [۱۴]. نتایج به دست آمده حاکی از انطباق کامل نتایج می باشند. سپس تحلیل سیستم سد- مخزن- فونداسیون طی سناریوهای مختلف در نرم افزار با تحلیل دینامیکی صریح انجام گردید. نتایج نشان دادند که جابجایی یهای نقاط مختلف از بدنه سد در جهت افقی بیشتر از حالت قائم می باشد و در نظر گرفتن رفتار غیر خطی جابجایی ها را افزایش می دهد. علاوه بر آن مقایسه تغییر موقعیت ارتفاعی بار انفجاری نشان داد که قرار گرفتن بار انفجاری در قسمت میانه از مخزن، میزان شتاب بیشتری ایجاد می کند. توزیع موج تنش در بدنه سد با شروع انفجار از مقابل محل قرارگیری بار انفجاری در بدنه سد آغاز می شود که این تنش ها در پوسته بیرونی وجه پایین دست سد بیشتر از وجه بالادست و نزدیک نقطه انفجار می باشد. همچنین در نظر گرفتن رفتار غیر خطی در مقایسه با رفتار خطی تغییر محسوسی را در توزیع تنش سبب نمی شود. سوری و میرزابزرگ در پژوهشی به بررسی اثر میرایی وابسته به اندازه ی تنش در تحلیل لرزه ای غیرخطی سدهای بتنی وزنی پرداختند [۱۵]. در این مطالعه، ضریب میرایی برای هر المان به تنش اصلی آن وابسته بوده و بر اساس الگوریتم EDEDA (الگوریتم توسعه ی یافته ی انرژی تلف شده ی المان) محاسبه شده است. تحلیل سد بتنی وزنی Pine Flat نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی قادر است رفتار خطی و غیر خطی بدنه ی سد را به خوبی مدل سازی کند و نتایج قابل اعتمادتر و منطقی ارائه دهد. خیابوی و همکاران در پژوهشی به بررسی تاثیر زلزله های حوزه دور و نزدیک بر پاسخ لرزه ای سدهای بتنی وزنی پرداختند. نتایج این مطالعه، بیانگر بحرانی بودن رفتار دینامیکی سد در برابر رکوردهای حوزه نزدیک در مقایسه با رکوردهای حوزه ی دور می باشد [۱۶].

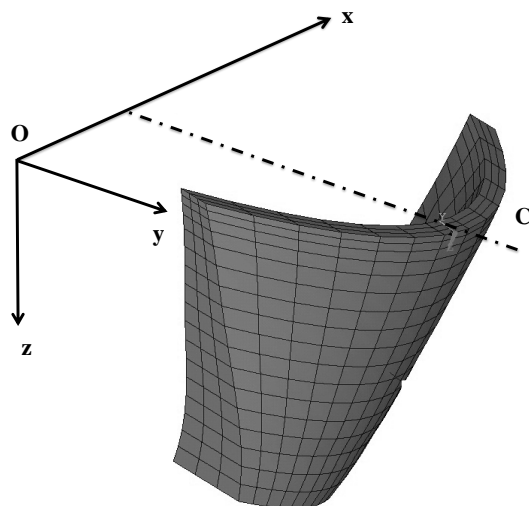
۳- روش تحقیق

مناسب بودن مدل هندسی در طراحی شکل سدهای بتنی قوسی بسیار مهم است. در فرایند طراحی شکل سدهای بتنی قوسی مقاطع افقی و قائم باید به گونه ای انتخاب گردند که متناسب با رفتار سازه ای سد باشند. به عبارت دیگر، طرح هندسی باید با وضعیت تنش سد قوسی همخوانی و مطابقت داشته باشد که در این صورت به بهره برداری مطلوب از پتانسیل سازه و استفاده معقولانه از مقاومت مصالح منتج خواهد شد. از سوی دیگر، به منظور تسهیل در ساخت و سادگی اجرا مدل هندسی نباید زیاد پیچیده باشد تا در پروژه های عملی قابل اجرا باشد [۱۷]. کناره مرزی سازه (محل تلاقی تکیه گاه های و بدنه سد) مطابق توپوگرافی منطقه می تواند تغییر کند. بنابراین، در ارتفاعات مختلف بایستی خطوط تراز مشخص گردد و با معادلات ریاضی، محل برخورد بدنه سد و تکیه گاه های به دست آید. در این مطالعه، شکل دره در امتداد ارتفاع به ۱۰ لایه تقسیم شده و محل تقاطع خطوط تراز سنگ سالم در دو طرف با خطوط شکسته بیان می گردد که مختصات گرهی آن ها، داده های ورودی اصلی می باشد [۱۸]. مختصات افقی نقطه C (تاج سد واقع بر وجه بالادست سد در مقطع قائم مرکزی) بدین قرار است (شکل ۱):

$$x_c = x_1 \quad y_c = y_1 \quad (1)$$



که X_c و Y_c مختصات مرجع می‌باشند. زاویه بین صفحه شعاعی مقطع قائم مرکزی با صفحه YOZ را هم می‌توان با X_3 نشان داد. X_1 X_2 و X_3 سه متغیر طراحی هستند که موقعیت محور سد را تعیین می‌نمایند. برای تعیین شکل یک سد قوسی، ابتدا طره مرکزی تعیین شده، سپس شکل مقاطع افقی در ترازهای مختلف مشخص می‌گردند [۱۹].



شکل ۱: موقعیت محور سد

پارامترهای طراحی با مختصات تغییر می‌کنند و با مختصه Z (مختصات ارتفاع از روی تاج به سمت پایین) به صورت چندجمله‌ای‌هایی از Z به فرم زیر نوشته می‌شوند [۲۰]:

$$f(z) = k_0 + k_1 z + k_2 z^2 + \dots + k_m z^m \quad (2)$$

که در آن پارامتر طراحی، Z مختصات قائم و $k_0, k_1, k_2, \dots, k_m$ ضرایب آن می‌باشند. تعداد پارامترهای طراحی به الگوی شکل قوس بدنه بستگی دارد و تابع $f(z)$ می‌تواند از نوع توابع Spline نیز در نظر گرفته شود. با فرض $z=0, z_1, z_2, \dots, z_m$ در رابطه‌ی فوق، دستگاه معادلاتی به صورت رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید. که در آن $f=f(z)$ بوده و با حل دستگاه فوق ضرایب $k_0, k_1, k_2, \dots, k_m$ به وسیله‌ی پارامترهای طراحی $f_0, f_1, f_2, \dots, f_m$ که در فرایند بهینه‌سازی عنوان متغیر به کار می‌روند و متغیرهای طراحی نامیده می‌شوند، تعیین خواهد شد. از مزایای این روش آن است که تمامی این متغیرهای طراحی داری معانی فیزیکی می‌باشند. بنابراین، در مجموع m متغیر طراحی برای تعریف سد وجود دارد که عبارت‌اند از X_1, X_2, \dots, X_m که سه متغیر X_1, X_2, X_3 تعیین‌کننده‌ی موقعیت سد بوده و X_4, X_5, \dots, X_m شکل سد را مشخص می‌کنند. برای یک سد تک قوسی، وجه بالادست طره مرکزی عموماً یک خط مستقیم است و تنها یک چندجمله‌ای از m برای تعیین ضخامت موردنیاز است و برای منحنی طره‌ی مرکزی یک سد دو قوسی یک چندجمله‌ای از مرتبه‌ی m (معمولاً ۲، ۳ یا m) برای تعیین وجه بالادست (میان تار مقطع) و یک چندجمله‌ای دیگر برای تعیین ضخامت مقطع موردنیاز است. این معادلات در ادامه ارائه شده‌اند [۱۴].



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & z_1 & z_1^2 & \dots & z_1^m \\ 1 & z_2 & z_2^2 & \dots & z_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & z_m & z_m^2 & \dots & z_m^m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{Bmatrix} \quad (3)$$

۴- مدلسازی بدنه سد

الف- منحنی رویه‌ی بالادست طره‌ی مرکزی در ارتفاع در طراحی منحنی رویه‌ی بالادست طره‌ی مرکزی از یک چندجمله‌ای مرتبه‌ی ۲ استفاده شده است:

$$y_{cc} = x_4 z + \frac{x_5}{2x_3 H} z^2 \quad (4)$$

که در آن: H ارتفاع طره‌ی مرکزی و X4 و X5 دو متغیر طراحی هستند که شرایط زیر را ارضا می‌کنند:

$$\frac{dy_{cc}}{dz} = \begin{cases} x_4 & z = 0 \\ 0 & z = x_5 H \end{cases} \quad (5)$$

ب- چند جمله‌ای مرتبه ۳ برای تعیین ضخامت طره مرکزی در ارتفاع

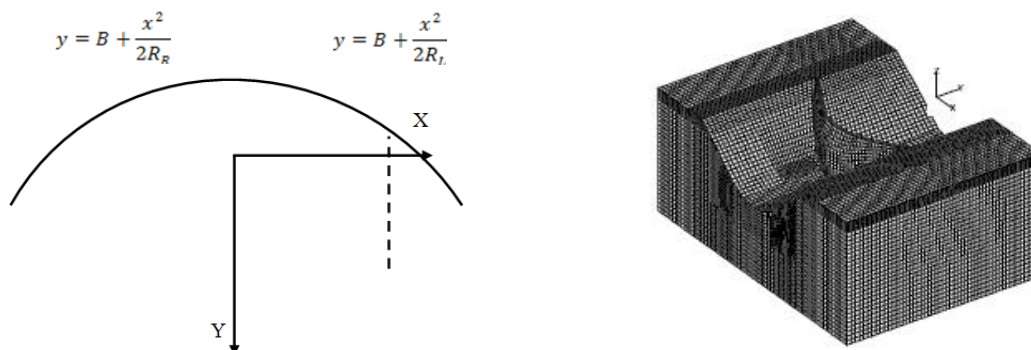
$$\begin{aligned} T_C = x_7 + (\alpha_3 x_7 + \alpha_4 x_8 + \alpha_5 x_9 + \alpha_6 x_{10}) \left(\frac{z}{H}\right) \\ + (\beta_3 x_7 + \beta_4 x_8 + \beta_5 x_9 + \beta_6 x_{10}) \left(\frac{z}{H}\right)^2 \\ + (\gamma_3 x_7 + \gamma_4 x_8 + \gamma_5 x_9 + \gamma_6 x_{10}) \left(\frac{z}{H}\right)^3 \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن، X7, X8, X9, X10 به ترتیب ضخامت طره مرکزی در $z/H=0$, $z/H=b$, $z/H=c$ و $z/H=1$ می‌باشند و مقادیر b و c نیز از متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. پارامترهای α , β و γ بر اساس مرتبه در نظر گرفته شده برای توابع تعیین کننده پارامترهای طراحی به دست می‌آیند. ابعاد طرح اولیه طره مرکزی مطابق باراهنمای طراحی سدهای قوسی که توسط USBR ارائه شده است، در سیستم SI تعیین می‌شود. بر اساس این روش که مبتنی بر مطالعه آماری بر روی شکل سدهای بتنی قوسی موجود در جهان می‌باشد، ضخامت طره مرکزی از روابط زیر در ترازهای مختلف به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} T_{crest} &= 0.1 \times (H + 1.2L_1) \\ T_{base} &= \sqrt[3]{0.001HL_1L_2 \left(\frac{H}{122}\right)^{\left(\frac{H}{122}\right)}} \\ T_{0.45H} &= 0.95T_{base} \end{aligned} \quad (7)$$



که در آن L_1 فاصله مستقیم دو تکیه‌گاه در تراز تاج و L_2 فاصله مستقیم دو تکیه‌گاه در فاصله 0.15 ارتفاع از کف رودخانه می‌باشد. شکل مقاطع سد قوسی ممکن است به یکی از برگه‌های قوس تک مرکزی، قوس چندمرکزی (۲،۳ و یا چندمرکزی)، قوس سهموی، قوس بیضوی، قوس هذلولوی و قوس مارپیچ لگاریتمی باشد. در مطالعه حاضر، از قوس سهموی برای مدل‌سازی مقاطع افقی بدنه‌ی سد استفاده شده است. با تعیین ضخامت بدنه در امتداد قوس در هر تراز معین، شکل مقطع افقی تعیین می‌گردد. محور میان تار مقطع افقی سد سهموی و ضخامت بدنه در امتداد قوس‌های افقی به ترتیب برای سمت راست و چپ بدنه از روابط (۸) تا (۱۸) محاسبه می‌شوند [۲۱].



شکل ۲: شکل سهموی بدنه سد.

الف- برای نیمه راست بدنه

$$T_S = T_C + (T_{AR} - T_C) \frac{S^2}{S_{AR}^2} \quad (8)$$

ب- برای نیمه چپ بدنه

$$T_S = T_C + (T_{AL} - T_C) \frac{S^2}{S_{AL}^2} \quad (9)$$

که در آن B مختصه‌ی عرضی تاج قوس افقی میانی و RR و RL به ترتیب شعاع محور میان تارهای راست و چپ قوس افقی در $X=0$ هستند. مقادیر این پارامترها در ترازهای مختلف بدنه با استفاده از توابع مرتبه سوم محاسبه می‌شوند. همچنین T_C ، T_{AR} و T_{AL} به ترتیب ضخامت قوس افقی در تاج، تکیه‌گاه سمت راست و تکیه‌گاه سمت چپ می‌باشد. همچنین S طول قوس از تاج قوس افقی و SAR و SAL از نقطه‌ی C تا تکیه‌گاه‌های چپ و راست می‌باشند. معادله طول قوس یک سد قوسی سهموی از تاج قوس افقی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{x}{2R} \sqrt{R^2 + x^2} + \frac{R}{2} \ln \left(\frac{x + \sqrt{R^2 + x^2}}{R} \right) \quad (10)$$



در نهایت شکل مقاطع افقی به طور کامل با ۶ پارامتر طراحی TAL, TAR, RL, RR, TC و B تعیین می شود:

$$R_R = X_{11} + (\alpha_3 X_{11} + \alpha_4 X_{13} + \alpha_5 X_{13} + \alpha_6 X_{14}) \left(\frac{z}{H}\right) + (\beta_3 X_{11} + \beta_4 X_{12} + \beta_5 X_{13} + \beta_6 X_{14}) \left(\frac{z}{H}\right)^2 + (\gamma_3 X_{11} + \gamma_4 X_{12} + \gamma_5 X_{13} + \gamma_6 X_{14}) \left(\frac{z}{H}\right)^3 \quad (11)$$

$$R_L = X_{15} + (\alpha_3 X_{15} + \alpha_4 X_{16} + \alpha_5 X_{17} + \alpha_6 X_{18}) \left(\frac{z}{H}\right) + (\beta_3 X_{15} + \beta_4 X_{16} + \beta_5 X_{17} + \beta_6 X_{18}) \left(\frac{z}{H}\right)^2 + (\gamma_3 X_{15} + \gamma_4 X_{16} + \gamma_5 X_{17} + \gamma_6 X_{18}) \left(\frac{z}{H}\right)^3 \quad (12)$$

در روابط فوق $X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}$ به ترتیب مقادیر R_1 در $\frac{z}{H} = 0, \frac{z}{H} = b, \frac{z}{H} = c$ و $\frac{z}{H} = 1$ بوده و همچنین در $X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}$ به ترتیب مقادیر R_L در $\frac{z}{H} = 0, \frac{z}{H} = b, \frac{z}{H} = c$ و $\frac{z}{H} = 1$ می باشند.

$$T_{AR} = t_1 + (\alpha_3 t_1 + \alpha_4 X_{19} + \alpha_5 X_{20} + \alpha_6 t_2) \left(\frac{z}{H}\right) + (\beta_3 t_1 + \beta_4 X_{19} + \beta_5 X_{20} + \beta_6 X_{18}) \left(\frac{z}{H}\right)^2 + (\gamma_3 t_1 + \gamma_4 X_{19} + \gamma_5 X_{20} + \gamma_6 t_2) \left(\frac{z}{H}\right)^3 \quad (13)$$

و در آن t_1, t_2, X_{19}, X_{20} به ترتیب مقادیر T_{AR} در $\frac{z}{H} = 0, \frac{z}{H} = b, \frac{z}{H} = c$ و $\frac{z}{H} = 1$ می باشند و T_{AL} با جایگذاری مقادیر t_3, t_4, X_{21}, X_{22} که به ترتیب مقادیر T_{AL} در $\frac{z}{H} = 0, \frac{z}{H} = b, \frac{z}{H} = c$ و $\frac{z}{H} = 1$ می باشند، به دست می آید. در عمل، ضخامت قوس افقی در تراز تاج سد و تراز پایه تقریباً ثابت بوده لذا:

$$t_1 = s_1 X_7 \quad (14)$$

$$t_2 = s_2 X_{10}$$

ضرایب α_i, β_i و γ_i روابط زیر قابل محاسبه می باشند:



$$\alpha_3 = -\alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6, \quad \alpha_4 = \frac{c^2(1-c)}{D}, \quad \alpha_5 = \frac{b^2(b-1)}{D}, \quad \alpha_6 = \frac{b^2 c^2(c-b)}{D} \quad (15)$$

$$\beta_3 = -\beta_4 - \beta_5 - \beta_6, \quad \beta_4 = \frac{c^2(1-c)}{D}, \quad \beta_5 = \frac{b^2(1-b^2)}{D}, \quad \beta_6 = \frac{b^2 c^2(b^2 - c^2)}{D} \quad (16)$$

$$\gamma_3 = -\gamma_4 - \gamma_5 - \gamma_6, \quad \gamma_4 = \frac{c(1-c)}{D}, \quad \gamma_5 = \frac{b(1-b^2)}{D}, \quad \gamma_6 = \frac{bc(b^2 - c^2)}{D} \quad (17)$$

$$D = b^2 c^3 - b^3 c^2 + b^3 c - bc^3 + bc^2 - b^2 c \quad (18)$$

b و c پارامترهای طراحی هستند.

۵- مشخصات هندسی سازه سد و ساختگاه

در این مطالعه، برای طراحی بدنه سد از قوس‌های سهموی در امتداد ترازهای افقی استفاده شده و سایر پارامترهای مربوط به طراحی قوس‌های افقی و همچنین طره‌ی مرکزی محاسبه شده‌اند. سد بتنی قوسی بر روی دو دره‌ی U شکل و V شکل و برای دو ارتفاع ۱۵۰ متر و ۲۵۰ متر مدل‌سازی شده است. در مدل با ارتفاع بدنه ۲۵۰ متر، طول قوس در تراز تاج برای هر دو شکل هندسی ۷۵۰ متر می‌باشد. برای سد مدل‌سازی شده در دره‌ی U شکل طول بدنه در کف ۳۵۰ متر و برای دره‌ی V شکل ۱۵۰ متر است. در سد با ارتفاع ۱۵۰ متر، طول قوس در تراز تاج در هر دو شکل بدنه ۴۵۰ متر بوده و طول در تراز کف برای مدل U شکل ۲۷۰ متر و در مدل V شکل ۹۰ متر می‌باشد. سایر مشخصات هندسی بدنه سدهای مدل‌سازی شده در جداول (۱) و (۲) ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات هندسی بدنه سد با ارتفاع ۲۵۰ متری.

مشخصات هندسی بدنه سد	دره U شکل	دره V شکل
ارتفاع	۲۵۰ متر	۲۵۰ متر
طول تاج	۷۵۰ متر	۷۵۰ متر
طول در تراز کف	۳۵۰ متر	۱۵۰ متر
شیب دره در تکیه‌گاه‌های جانبی	۰/۸	۱/۲
ضخامت بدنه در تراز تاج	۱۲	۱۲
ضخامت بدنه در تراز کف	۶۹	۵۸
ضخامت در ۰/۳ ارتفاع از تاج	۳۹	۳۴
ضخامت در ۰/۶ ارتفاع از تاج	۶۶	۵۵
شکل بدنه	متقارن	متقارن

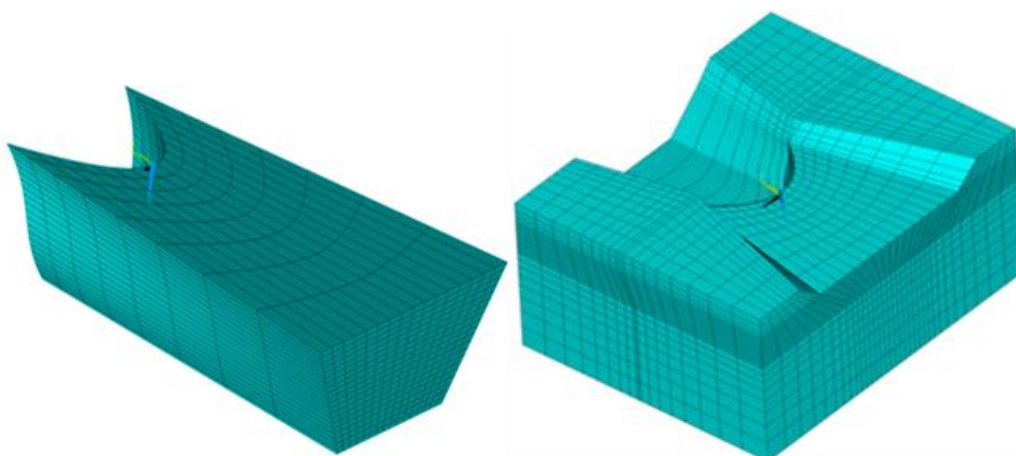


جدول ۲. مشخصات هندسی بدنه سد با ارتفاع ۱۵۰ متری.

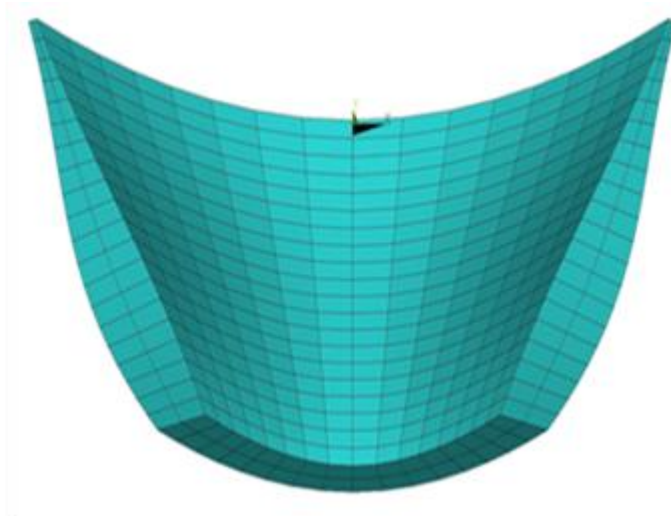
مشخصات هندسی بدنه سد	دره U شکل	دره V شکل
ارتفاع	۱۵۰ متر	۱۵۰ متر
طول تاج	۴۵۰ متر	۴۵۰ متر
طول در تراز کف	۲۷۰ متر	۹۰ متر
شیب دره در تکیه‌گاه های جانبی	۰/۶	۱/۲
ضخامت بدنه در تراز تاج	۷ متر	۷ متر
ضخامت بدنه در تراز کف	۳۰ متر	۲۳ متر
ضخامت در ۰/۳ ارتفاع از تاج	۱۸ متر	۱۵ متر
ضخامت در ۰/۶ ارتفاع از تاج	۲۹ متر	۲۲ متر
شکل بدنه	مقارن	مقارن

۶- مدل المان محدود سد

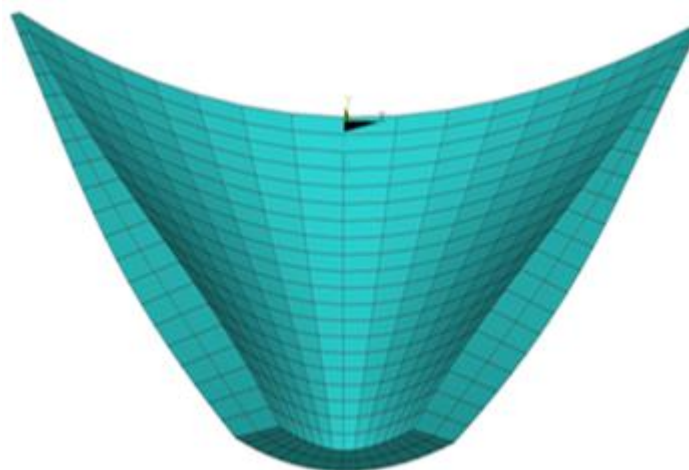
مدل سازی و تحلیل های استاتیکی و لرزه‌ای سد در نرم افزار ANSYS انجام شده است. طول مخزن در مدل المان محدود مورد استفاده برابر طول پی در نظر گرفته شده است و ابعاد تکیه‌گاه به دلیل نسبت پایین مدول الاستیسیته ی تکیه‌گاه به بدنه از هر طرف به اندازه‌ی حدود ۳ برابر ارتفاع بدنه در نظر گرفته شده است. همچنین، تکیه‌گاه تا بالای دیواره‌های دره ادامه پیدا می کند. برای مش بندی بدنه و پی از المان مکعبی ۸ گرهی SOLID185 که در هر گره المان سه درجه‌ی آزادی انتقالی دارد استفاده شده است و تعداد المان‌ها در امتداد ضخامت بدنه دولایه می‌باشد. برای سیال از FLUID30 استفاده شده است که در هر گره سه درجه‌ی آزادی انتقالی و یک درجه‌ی آزادی فشاری دارند و تعداد المان‌ها در امتداد رودخانه ۸ ردیف می‌باشد. تعداد المان‌ها در بدنه‌ی سد ۶۴۰، در تکیه‌گاه ۱۱۵۲۰ و برای دریاچه ۲۵۶۰ المان می‌باشد. فشار مخزن در سطح آزاد صفر فرض شده و شرایط مرزی انتهایی دور مخزن برای جذب کامل موج هیدرودینامیک لحاظ شده است. برای مدل سازی شرایط نیمه بینهایت، دیواره‌های جانبی انتهایی دور تکیه‌گاه و پی بدنه، در راستای X و Y بسته شده و کف در هر سه راستای X، Y و Z بسته شده است. شایان ذکر است که مثبت X در جهت عرض رودخانه به سمت چپ، مثبت Y در جهت پایین دست و مثبت Z در جهت عمودی و به سمت پایین در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: مدل المان محدود سد-پی-دریاچه.



شکل ۴: مدل المان محدود بدنه U شکل.



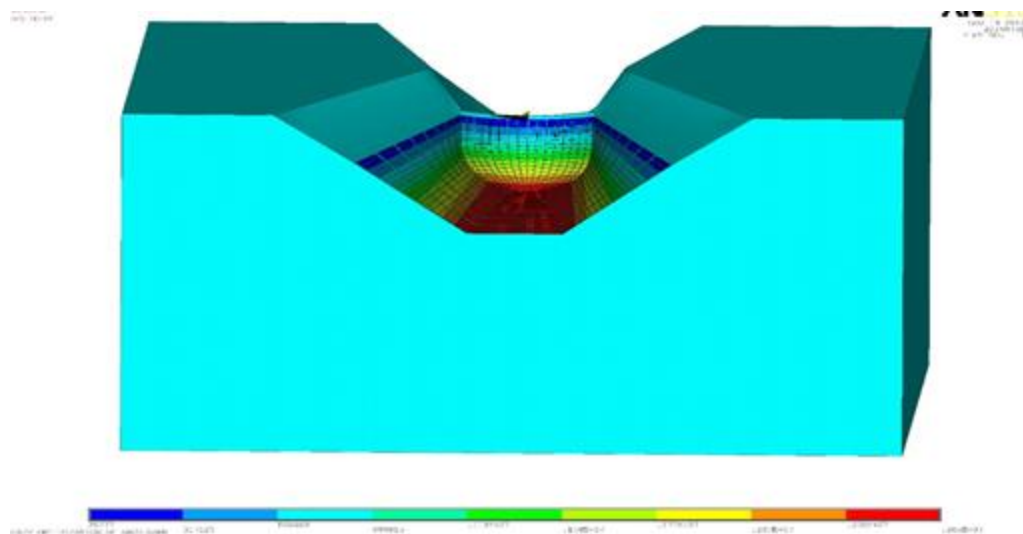
شکل ۵: مدل المان محدود بدنه V شکل.

۷- مشخصات مصالح و ترکیبات بارگذاری

مقدار مدول الاستیسیته ی بتن حجیم ۳۰ گیگاپاسکال ، ضریب پواسون بتن $0/2$ و وزن مخصوص آن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. برای تکیه گاه مدول تغییر شکل $11/5$ گیگاپاسکال و ضریب پواسون $0/25$ و وزن مخصوص آن ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و وزن مخصوص سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت صوت در آب 1436 متر بر ثانیه و ضریب جذب موج برای دیواره و کف مخزن $0/8$ در نظر گرفته شده است. میرایی مصالح بدنه به دلیل وجود درزهای انقباضی برابر $5/$ و برای مصالح پی، سنگ یکپارچه در نظر گرفته شده و میرایی آن $2/$ منظور گردیده است. تحلیل استاتیکی برای بارهای اصلی یعنی بار وزن بدنه و بار هیدرو استاتیک انجام شده است. به منظور همانندسازی شرایط واقعی در بدنه و پی، آنالیز استاتیکی به این صورت انجام شده که در ابتدا پی مدل سازی شده و تحت وزنش تحلیل و تنش ها و جابجایی های حاصل از این تحلیل به دست آمده اند و جابجایی های به وجود آمده،



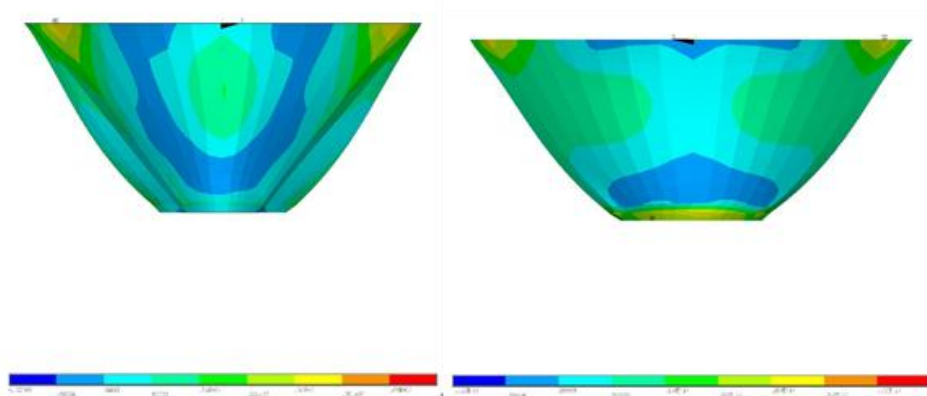
صفر شده‌اند. سپس، بدنه‌ی سد مدل‌سازی و تحلیل شده و مجدداً تنش‌های داخلی آن حفظ و جابجایی‌های ایجاد شده ناشی از بدنه‌ی سد، صفر شده‌اند و سپس، دریاچه مدل شده است. تراز آب دریاچه در شرایط نرمال در نظر گرفته شده و پس از اعمال بار وزن، اعمال شده است. بار هیدرو استاتیک به رویه‌ی بالادست بدنه و همچنین دیواره‌ها و بستر مخزن اعمال شده است. در روش تاریخچه‌ی زمانی سیستم سد-پی-دریاچه با استفاده از رکوردهای زلزله، تحریک می‌گردد. بستر پی به صورت یکنواخت و غیریکنواخت با در نظر گرفتن دو جهت برای انتشار امواج لرزه‌ای (بالادست-پایین دست و عرضی) و برای هر دو مدل انسجام مورد بررسی در این مطالعه، تحریک می‌شود. تحریک در هر راستا به صورت جداگانه به کف مدل اعمال می‌شود. برای تولید تاریخچه‌های زمانی شتاب، تاریخچه‌های زمانی سازگار با طیف پاسخ زلزله‌ی هدف برای هر یک از مدل‌های انسجام Harichandran و Hindy تولید شده‌اند.



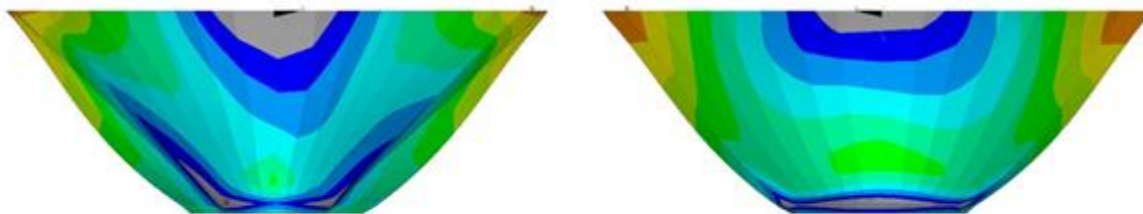
شکل ۶: بالادست بدنه و مخزن تحت اثر بار هیدرو استاتیک در شرایط نرمال دریاچه.

۸- نتایج تحلیل

۸-۱- سد بتنی قوسی با ارتفاع ۲۵۰ متر



شکل ۷: تنش اصلی حداکثر رویه بالادست بدنه (سمت راست) و تنش اصلی حداکثر رویه پایین دست بدنه (سمت چپ).



شکل ۸: تنش اصلی حداقل رویه بالادست بدنه (سمت راست) و تنش اصلی حداقل رویه پائین دست بدنه (سمت چپ).

۸-۲- سد بتنی قوسی با ارتفاع ۱۵۰ متر



شکل ۹: تنش اصلی حداکثر رویه بالادست بدنه (سمت راست) و تنش اصلی حداکثر رویه پائین دست بدنه (سمت چپ).



شکل ۱۰: تنش اصلی حداقل رویه بالادست بدنه (سمت راست) و تنش اصلی حداقل رویه پائین دست بدنه (سمت چپ).



- با توجه به مباحث ارائه شده، موارد زیر باید در انجام آنالیز لرزه‌ای سدهای قوسی در نظر گرفته شوند:
- ۱- انجام آنالیز تاریخیچه زمانی برای بررسی بازه‌های زمانی و نوسانات تنش‌های بالا لازم است. بالابودن تنش‌ها به تنهایی دلیل بر خرابی نمی‌باشد و شناخت چگونگی تغییرات زمانی آن‌ها می‌تواند کمک بزرگی به تفسیر نتایج نماید.
 - ۲- انجام آنالیز غیرخطی در کنار آنالیز خطی برای کمک به تفسیر، در هنگامی که احتمال آسیب‌های شدید وجود دارد لازم است.
 - ۳- در نظر گرفتن تأخیر زمانی ایجاد شده ناشی از تأثیر دمای هوا بر دمای آب و دمای داخلی بتن در صورت عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری دما مهم می‌باشد.
 - ۴- در نظر گرفتن رکوردهای زلزله از شتاب‌نگاشت‌های مختلف با نوع خاک مشابه مکان شتاب‌نگاشت و محل سد، برای بررسی اثر فرکانس زلزله لازم می‌باشد.
 - ۵- معیار مشخصی را نمی‌توان به‌عنوان حد مجاز برای ایمنی و پایداری لرزه‌ای سد در نظر گرفت. قضاوت مهندسی و تفسیر نتایج برای رسیدن به این منظور باید بکار برده شود.
 - ۶- در تحلیل‌های استاتیکی مشاهده شد که در صورتی که تکیه‌گاه همگن باشد، نواحی بحرانی تنش در پی سد اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده تأثیر قابل‌ملاحظه اثر طره‌ای در مقایسه با اثر قوسی سد می‌باشد.
 - ۷- آنالیز استاتیکی خطی و غیرخطی نشان‌دهنده وجود یک ناحیه کششی در قسمت بالادست سد در فاصله کمی از بدنه سد می‌باشد.
 - ۸- آنالیز استاتیکی با رفتار غیرخطی در توده سنگ با لایه‌های متوسط و ضعیف نشان داد که پایداری بیشتری نسبت به سیستم همگن ضعیف وجود دارد. ولی امکان تمرکز کرنش‌های پلاستیک در لایه‌های ضعیف بیشتر است.
 - ۹- در تحلیل‌های دینامیکی وجود مرزهای ثابت باعث تشدید بیش‌ازحد شتاب در نواحی مختلف سد می‌شوند و لازم است همواره از مرزهای جاذب انرژی استفاده کرد.
 - ۱۰- اختلاف شتاب در تحلیل‌های خطی و غیرخطی منجر به ایجاد کرنش پلاستیک و غیرقابل‌برگشت در المان‌ها می‌شود که خود منجر به تولید تغییر مکان بیشتر می‌گردد.
 - ۱۱- برای بررسی پدیده افزایش شتاب به‌طور محافظه‌کارانه می‌توان از تحلیل‌های خطی استفاده کرد و در صورتی که تغییر مکان‌ها و پایداری تکیه‌گاه مورد نظر باشد، لازم است تحلیل غیرخطی صورت گیرد.

۹- جمع بندی و نتیجه گیری

- با توجه به ساختگاه و طرح اولیه بدنه و آنالیز انجام شده، نتایج کلی حاصل از آنالیز سد بتنی قوسی به شرح زیر می‌باشد:
- ۱- الگوی توزیع تنش‌های کششی و فشاری در بدنه و تکیه‌گاه‌ها مناسب است.
 - ۲- مقادیر حداکثر تنش‌های فشاری و کششی در بدنه اولیه مناسب است.
 - ۳- مقادیر تنش‌های کششی و فشاری حداکثر ایجاد شده در نشیمن‌گاه بدنه و در سنگ‌بستر مناسب و منطقی است.
 - ۴- رفتار بدنه در ساختگاه برحسب انتظار، تقریباً متقارن می‌باشد.
 - ۵- جابجایی‌های زیاد نشانه‌ای از وجود تنش‌های بالا می‌باشند، بطوریکه بازه زمانی بحرانی برای تنش‌های بالا را می‌توان از بازه زمانی که جابجایی‌ها در آن زیاد هستند، پیش‌بینی نمود.
 - ۶- خرابی‌های ناشی از تنش‌های قوسی بیش از تنش‌های طره‌ای می‌باشد.
 - ۷- تنش‌های فشاری در بررسی ایمنی سد بحرانی نمی‌باشند.



۸- تنش‌های قوسی کششی ماکزیمم به‌طور عمده در ترازهای فوقانی بلوک‌های میانی و همچنین در مجاورت سطح تماس با تکیه‌گاه‌های جانبی مشاهده می‌شوند. در رویه پایین دست مقدار و محدوده این تنش‌ها در شرایط بارگذاری تابستان بیش از شرایط بارگذاری زمستان می‌باشد. در رویه بالادست محدوده این تنش‌ها در شرایط تابستان نسبت به شرایط زمستان کمتر شده اما شدت آن‌ها بیشتر است.

۹- مقدار تنش‌های کششی در رویه بالادست در اکثر حالات بیش از رویه پایین دست می‌باشد.

۱۰- مقدار تنش‌های طره‌ای کششی ماکزیمم به‌طور عمده در بلوک‌های قرارگرفته در بین بخش میانی و تکیه‌گاه جانبی با توجه به مقاومت کششی درزهای افقی، نسبتاً پایین است. در شرایط بارگذاری تابستان مقدار تنش‌ها بیش از شرایط بارگذاری زمستان می‌باشد. همچنین در شرایط تابستان مقدار تنش‌ها در رویه بالادست بیش از رویه پایین دست است. این موضوع در شرایط زمستان برعکس می‌باشد.

۱۱- تنش‌های فشاری ماکزیمم نیز به‌طور عمده در سطوح فوقانی بلوک‌های میانی و نیز در مجاورت تکیه‌گاه‌های جانبی در ترازهای وسط، مشاهده می‌شوند. مقدار تنش‌ها در شرایط بارگذاری تابستان بیش از شرایط بارگذاری زمستان است. همچنین مقدار آن‌ها در اکثر حالت‌ها در رویه بالادست بیشتر از رویه پایین دست می‌باشد.

۱۲- در مجاورت سطح تماس با تکیه‌گاه‌های جانبی و فونداسیون نیز انتظار بازشدگی‌های جزئی درزها وجود دارد. همچنین پیش‌بینی می‌شود که عملکرد دریچه‌های سرریز با توجه به پایین بودن مقادیر تنش در آن ناحیه، با مشکل جدی روبرو نگردد.

در مجموع می‌توان گفت که پایداری کلی سد با توجه به پایین بودن تنش‌های کششی در سطح تماس با تکیه‌گاه‌های جانبی و فونداسیون دچار تهدید جدی نمی‌شود، اما احتمال آسیب‌های نسبتاً شدیدی به‌صورت بازشدگی درزهای عمودی در سطوح فوقانی بلوک‌های مرکزی و ایجاد ترک و بازشدگی درزهای افقی در ترازهای میانی بلوک‌های سد وجود دارد. شدت این آسیب‌ها در شرایط بارگذاری زمستان ناچیز بوده و جدی نمی‌باشد، اما در شرایط بارگذاری تابستان قابل ملاحظه است. به این منظور پیشنهاد می‌گردد که در صورت وقوع زلزله‌های شدید و به‌ویژه در هنگام تابستان و پر بودن مخزن، سطح آب در مخزن سد پایین آورده شود. در صورت مشاهده ترک‌های شدید بخصوص در ترازهای میانی و همچنین در سطح تماس با فونداسیون این کاهش باید انجام گیرد. برای بررسی بیشتر پایداری این بلوک‌ها انجام آنالیز غیرخطی لازم می‌باشد.

۱۰- مراجع

- 1- Engineering guideline for the evaluation of hydropower projects-chapter 11: Arch dam design, 1999, Federal Energy Regulatory Commission Division of dam safety inspection (FERC).
- 2- Earthquake engineering for concrete dams: Design, Performance and research needs, 1990, National Research Council (NRC).
- 3-EM-1110-2-1612: Ice Engineering, 1996, U.S. Army Corps of Engineering (USACE), Washington D.C.
- 4-Vibration of Hydraulic Equipment for Dams, 1996, International Commission on Large Dam (ICOLD), Bulletin 102, Paris, France.
- 5- EM-1110-2-2201: Arch Dam Design, 1994, U.S. Army Corps of Engineering (USACE), Washington D.C.
- 6- Design of Arch Dam, 1997, U.S. Bureau of Reclamation (USBR), U.S. Department of Interior, Denver, CO.



- 7-Kupfer, H., and Gerstle, K. H., 1973, **Behavior of concrete under biaxial stress**, Engineering Mechanics Division, ASCE, 99, 4, 853-866.
- 8- Zienkiewicz, O. C., and Taylor, R. L., 2000, **The Finite Element Method-Volume I: The Basic**, 5th Edition, Published by Butterworth-Heinemann.
- 9- Gravity Dams, (Design Standards No.2), 1966, U.S. Bureau of Reclamation (USBR), U.S. Department of Interior, Denver, CO.
- 10- Alem bagheri, M., and Kazemi, M. Seyed., 1997, Numerical Modeling of Concrete Gravity Dams by ABAQUS.
- 11- Wang, Gaohui, et al., 2017, **Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: A case study**, Engineering Structures, 148, 263-276.
- 12- Chopra, Anil K., and Chakrabarti, P., 1981, **Earthquake analysis of concrete gravity dams including damwaterfoundation rock interaction**, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 9, 4, 363-383.
- 13- Fenves, Gregory, and Chopra, Anil K., 1983, **Effects of reservoir bottom absorption on earthquake response of concrete gravity dams**, Earthquake engineering & structural dynamics 11, 6, 809-829.
- 14-Norouzi, F, Kalateh, F and Lotfollahi-Yaghin, M. A., 2017, **Numerical Analysis of Dynamic Response of Concrete Gravity Dam under Blast Loading in the Reservoir**, Journal of Civil and Environmental Engineering, 47, 1, 91-104.
- 15- Souri, A., and Mirzabozorg, H., 2021, **Investigating Effects of Stress-Dependent Material Damping on The Nonlinear Seismic Response of a Typical Concrete Gravity Dam**, Sharif Journal of Civil Engineering, 36, 2, 119-130.
- 16- Pasbani Khiavi, M, Ghorbani, M, and Ghaed Rahmati, A., 2022, **Investigation of the Effect of Near and Far Fault Earthquake on Seismic Response of Controlled Concrete Gravity Dams with Rubber Damper**, Journal of Structural and Construction Engineering, 9, 2, 215-229.
- 17- Westergaard, H. M., 2003, **Water pressures on dam during earthquakes**, Transactions ASCE, 98, 418-433.
- 18- EM 1110-2-6051: Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures, 1983, U.S. Army Corps of Engineering (USACE), Washington D.C.
- 19-Chopra, A. K., 1988, **Earthquake response analysis of concrete dams**, Advanced Dam Engineering for Design: Construction and Rehabilitation, Von Nostrand Reinhold.
- 20- Hariri Ardebili, M. A., and Mirzabozorg, H., 2010, **Crack detection in seismic analysis of concrete arch dams using Endurance Time method**, accepted to 9th International congress on advances in civil engineering, Trabzon, Turkey.
- 21- Emamjome, H., and Estekanchi, H. E., 2007, **Estimation of incremental dynamic analysis results using Endurance Time method**, 5th international congress in seismology and earthquake engineering, Tehran, Iran.