مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۳۱-۱۴۲، (یادداشت فنی)

Research Note

بهسازی لرزه‌یی سد بتنی وزنی به وسیله‌ی میراگر لاستیکی با استفاده از آنالیز احتمالاتی

مجید پاسبانی خیاوی* **(دانشیار)**
آرش قائد رحمتی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

مسئله‌ی اندرکنش سد و مخزن به عنوان یکی از مباحث مهم در مبحث طراحی سدهای بتنی، افزایش نیروی هیدرودینامیکی وارده بر سد در هنگام زلزله و درنتیجه، افزایش تنش‌های وارده بر سد را به دنبال دارد. در نوشتار حاضر سعی شده است علاوه بر به‌کارگیری ماهیچه‌ی بتنی از میراگر لاستیکی نیز به‌منظور کاهش تنش‌ها از طریق میرایی فشار هیدرودینامیکی وارده بر سد استفاده شود. به منظور دستیابی به ارتفاع بهینه‌ی میراگر لاستیکی نیز از تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو استفاده شده است که در آن ارتفاع میراگر لاستیکی به‌عنوان متغیر ورودی و پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد، به‌عنوان متغیرهای خروجی انتخاب شده‌اند. نتایج حاصل از پژوهش، تأثیر قابل‌توجه میراگر لاستیکی را نسبت به ماهیچه‌ی بتنی در کاهش تنش‌های وارده بر سد نشان می‌دهد. علاوه بر این، با توجه به نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی می‌توان ارتفاع بهینه‌ی میراگر لاستیکی را انتخاب کرد. نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد که ارتفاع بهینه‌ی میراگر لاستیکی به لحاظ عملکرد در حدود ۰/۶ تا ۰/۷ ارتفاع مخزن است.

واژگان کلیدی: سد بتنی وزنی، اندرکنش، میراگر لاستیکی، مونت‌کارلو، بهسازی لرزه‌یی.

pasbani@uma.ac.ir
arash.ghaedrahmati1990@gmail.com

۱. مقدمه

یکی از مسائل مهم در زمان وقوع زلزله، بحث مربوط به اندرکنش سیستم سد ـ مخزن است. در واقع زمانی که بین دو سیستم، جابه‌جایی نسبی وجود داشته باشد، اثر متقابل یا اندرکنش به وجود می‌آید که در سیستم سد ـ مخزن، افزایش ارتعاشات سد را نیز به دنبال دارد. از همین رو علاوه بر نیروی اینرسی ناشی از حرکت زمین، نیروی هیدرودینامیک سیال بر وجه بالادست سد نیز یکی از عوامل اصلی بارگذاری بر سازه‌ی سد هنگام وقوع زلزله است که چشم‌پوشی از تأثیر آن، پاسخ‌های غیرمحافظه‌کارانه و نه چندان مناسبی می‌دهد که ممکن است سازه‌ی طراحی‌شده را با مشکلاتی روبه‌رو کند. به‌عبارت دیگر، درنظر گرفتن اندرکنش سازه ـ سیال در تحلیل دینامیکی سدهای بتنی، سبب افزایش دقت پاسخ‌های به‌دست آمده از تحلیل و برآورد بهتر نیروهای هیدرودینامیک و به دنبال آن، تنش‌های ایجادشده در بدنه‌ی سد می‌شود. تأثیر قابل توجه فشار هیدرودینامیکی وارده بر بدنه‌ی سد، در عملکرد لرزه‌یی سد بتنی در زمان وقوع زلزله و همچنین احداث بسیاری از سدهای بتنی در مناطق زلزله‌خیز، اهمیت افزایش ایمنی سازه‌های مذکور را در زمان وقوع زلزله نشان می‌دهد.

استفاده از ماهیچه‌ی[1] بتنی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین راه‌حل‌های افزایش ایمنی سد، فقط آثار موضعی در بدنه‌ی سد دارد. این در حالی است که در زمان وقوع زلزله، امکان آسیب‌دیدگی سایر قسمت‌های بدنه‌ی سد نیز وجود دارد. از همین رو پژوهشگران همواره به دنبال راهکارهای جدیدتری در جهت افزایش بیشتر ایمنی عملکرد سدهای بتنی در مقابل زلزله بوده‌اند. کنترل ارتعاش در سازه به کمک سیستم‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی، از جمله راهکارهای نوینی است که سبب کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارد بر سازه در برابر بارهای جانبی ناشی از زلزله خواهد شد. به عبارت دیگر، با اتلاف انرژی توسط میراگرها، آسیب‌دیدگی سازه در هنگام زلزله کاهش می‌یابد. مطالعه‌ی میراگرها باعث ایجاد فلسفه‌ی طراحی جدیدی شده است که در افزایش ظرفیت استهلاک انرژی در سازه تأکید دارد و سازه به جای مقاومت در برابر زلزله، در مقابل آن کنترل می‌شود. در واقع انرژی زلزله به جای جذب شدن در اعضاء سازه‌یی و خرابی آن‌ها در میراگرهای مذکور جذب می‌شود. در ساختمان‌ها، میراگرهای لرزه‌یی معمولاً در پایه‌ی ساختمان قرار می‌گیرند؛ در صورتی که در سدها برای کاهش فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن، بر روی بدنه‌ی بالادست سد نصب می‌شوند. استفاده از میراگرهای مذکور به‌عنوان یکی از فنّاوری‌های مدرن بیشتر در سازه‌های مهندسی، مانند ساختمان‌ها و پل‌ها استفاده

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۶/۳/۲۰، پذیرش ۱۳۹۶/۳/۲۷.
DOI:10.24200/J30.2018.2096.2088

شده و آثار عملی خود را در برخی از حوادث لرزه‌یی قوی نشان داده است. ولی علی‌رغم تبدیل شدن به یک رویکرد توسعه‌یی مدرن در مهندسی زلزله، در زمینه‌ی ایمنی سدهای بزرگ در مراحل اولیه باقی مانده است. مطالعات اولیه در زمینه‌ی تأثیر میراگرهای هیدرودینامیکی در پاسخ سد در سال ۱۹۸۹،[۱] صورت گرفت که در آن امکان کاهش فشار هیدرودینامیکی با توجه به دو گزینه‌ی تجربی بالن‌های هوای مهارشده و حباب‌های گاز تزریق شده، جهت فراهم کردن لایه‌ی هوا در وجه بالادست سد بررسی شده است و هیچ‌کدام از دو روش مذکور، کاهشی را در پاسخ دینامیکی سد ـ مخزن به وجود نیاوردند.

برخی پژوهشگران (۱۹۹۲)[۲] نیز تأثیر یک ماده‌ی نرم چسبنده به وجه بالادست یک سد بتنی را در کاهش پاسخ سد مطالعه کردند. آن‌ها تراکم‌پذیری ماده را مشابه با رفتار یک بعدی گاز کامل فرض کردند، ولی با ارائه‌ی مدل مذکور برای لایه‌ی نرم، کاهش قابل توجهی در پاسخ سد بتنی حاصل نشد. اگر حجم پرده‌ی جداساز کم شود، اثر جدایی در کاهش فشار هیدرودینامیکی روی سد کاهش می‌یابد. این امر ممکن است در هنگام نشت هوای داخل ظرف به علت تغییرات دما، ارتعاش‌های سد و سیستم جدایی در هنگام زلزله اتفاق بیفتد. درنتیجه، طرح پرده‌ی جداساز نیازمند به هزینه‌ی اضافی و نگهداری برای رسیدن به یک اطمینان بالاست. همچنین در سال ۱۹۹۵،[۳] کاهش فشار هیدرودینامیکی اعمال‌شده با استفاده از یک لایه‌ی ایزولاسیون با ضخامت ثابت در محل تماس سد و مخزن بررسی و اثر لایه‌ی ایزولاسیون با استفاده از روند حل تحلیلی مطالعه و تأثیر وجود پرده‌ی جداساز در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد نشان داده شد. برخی پژوهشگران (۲۰۱۱)[۴] نیز تأثیر بالشتک هوا در کاهش پاسخ لرزه‌یی سد جینپینگ[۲] به ارتفاع ۳۰۵ متر را با استفاده از مدل اجزاء محدود مطالعه و برای مدل‌سازی و تحلیل از فرمول‌بندی اویلری ـ لاگرانژی استفاده کردند.

نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که استفاده از بالشتک هوا در وجه بالادست، فشار هیدرودینامیکی اعمال‌شده بر وجه بالادست را تا حدود ۸۰٪ و تنش‌های اصلی را تا میزان ۳۰٪ کاهش می‌دهد. همچنین در سال ۲۰۱۲،[۵] تأثیر پرده‌ی هوا در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر وجه بالادست سد قوسی امیرکبیر بررسی و نشان داده شد که پرده‌ی جداساز، آثار اندرکنش بین سد و مخزن را تا مقدار زیادی از بین می‌برد. در سال ۲۰۱۶،[۶] نیز برای بهینه‌سازی لرزه‌یی سد بتنی وزنی و کاهش فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در زمان وقوع زلزله، مدل‌سازی جامعی در حوزه‌ی زمان برای سیستم سد ـ مخزن ـ فونداسیون انجام شد که در آن تأثیر وجود لایه‌ی ایزولاسیون بالادست با درنظرگرفتن شرایط مختلف برای مدل بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده در پژوهش اخیر، نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب لایه‌ی ایزولاسیون در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد است. همچنین عملکرد و هزینه‌ی مصرفی لایه‌ی ایزولاسیون نسبت به ماهیچه‌ی احداث شده در پاشنه‌ی سد مقایسه شد و نتایج به‌دست آمده نشان داد که کاهش هزینه‌های مصالح مصرفی، از جمله بتن، به علت هزینه‌ی کم اجرای رزین و کاهش هزینه‌های مطالعه و مشاوره و طراحی سد و همچنین افزایش ضریب اطمینان سیستم در برابر بارهای لرزه‌یی است.

علاوه بر مطالب ذکرشده، کمبود مواد اولیه و نیاز به بازده بیشتر در دنیای پر رقابت امروز، مهندسان را مجبور می‌کند تا به طراحی بهتر و اقتصادی‌تر علاقه‌ی بیشتری نشان دهند. با پیشرفت‌های کنونی در فنّاوری رایانه که بخش‌های مختلف علوم مهندسی را تحت تأثیر قرار داده است، روند طراحی نمی‌تواند به همان صورت سنتی باقی بماند؛ بنابراین طراحی نه فقط نوعی خلاقیت جهت‌دار مبتکرانه براساس اطلاعات جدید است، بلکه مشتمل بر تحلیل، ارائه‌ی نتایج، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. موارد ذکرشده، سازنده‌های اصلی و ضروری یک فرایند چرخه‌یی‌اند که نهایتاً به یک طرح قابل‌قبول، اجرایی و بهینه ختم می‌شوند.

با توجه به مطالب ارائه شده، در نوشتار حاضر سعی شده است که علاوه بر مقایسه‌ی عملکرد میراگر لاستیکی نسبت به ماهیچه‌ی بتنی، در جهت بهبود جنبه‌ی اقتصادی میراگر لاستیکی، به بهینه‌سازی ارتفاع آن از طریق آنالیز احتمالاتی مونت‌کارلو که روشی مناسب در جهت شناخت اثرگذاری پارامترهای مختلف است، پرداخته شود.

۲. مدل اجزاء محدود سیستم سد ـ مخزن ـ فونداسیون

جهت شبیه‌سازی سیستم سد ـ مخزن ـ فونداسیون، ابتدا معادلات دینامیکی اجزاء محدود آب و سپس سازه که خود شامل سد و پی می‌شود، به صورت مجزا استخراج می‌شوند. سپس دو معادله با استفاده از متغیرهای مشترک موجود به یک معادله‌ی دینامیکی واحد تبدیل می‌شود.

۱.۲. معادلات دینامیکی اجزاء محدود آب

اگر آب مخزن، یک سیال تراکم‌پذیر و غیرویسکوز فرض شود، فشار هیدرودینامیک (p) درنتیجه‌ی حرکت زمین در پشت سد مطابق رابطه‌ی دیفرانسیل (رابطه‌ی ۱) که به معادله‌ی موج معروف است، ارائه می‌شود:[۷]

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad (۱)$$

که در آن، c سرعت موج فشاری در آب، ∇^2 عملگر لاپلاسین در حالت دو بعدی و t نیز متغیر زمان است.

شرایط مرزی مخزن با فرض صرف‌نظرکردن از اثر امواج سطحی و ویسکوزیته‌ی سیال به این صورت تعریف می‌شود:

۱. در مرز مشترک سد وزنی و مخزن، شرط مرزی به‌صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho a_n \qquad (۲)$$

که در آن، n بردار یکه‌ی عمود بر سطح مشترک آب و سد، a_n مؤلفه‌ی عمودی شتاب در سطح مشترک و ρ چگالی جرمی سیال است.

۲. در کف مخزن، شرط مرزی به‌صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho a_n - \bar{q}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad (۳)$$

که در آن، $\bar{q}$ ضریب استهلاک است و به عنوان پارامتر پایه برای تعیین مشخصات مواد کف مخزن استفاده می‌شود، به طوری که رابطه‌ی بین ضریب استهلاک و ضریب بازتاب موج به‌صورت رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود:[۸]

$$\alpha = \frac{1-\bar{q}c}{1+\bar{q}c} \qquad (۴)$$

که در آن، α ضریب بازتاب موج نامیده می‌شود. به‌طور کلی وجود رسوب در کف مخزن، مقادیر پاسخ سدهای بتنی وزنی را کاهش می‌دهد. درواقع با کاهش مقدار α، مقادیر پاسخ‌های سدهای بتنی وزنی از جمله جابه‌جایی و تنش کاهش می‌یابد.

۳. در مرز انتهایی مخزن، از شرط مرزی سامرفلد (رابطه‌ی ۵) استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\dot{p}}{c} \qquad (۵)$$

در سطح آزاد مخزن، چنانچه از اثر موج‌های سطحی صرف‌نظر شود، شرط مرزی به‌صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$p = ۰ \qquad (۶)$$

با استفاده از روش اجزاء محدود، رابطه‌های ۲ الی ۶ را می‌توان به فرم ماتریسی (رابطه‌ی ۷) نوشت:[۹]

$$M_f \ddot{P}_e + C_f \dot{p}_e + K_f p_e + P_\omega Q^T (\ddot{u}_e + \ddot{u}_g) = ۰ \qquad (۷)$$

که در آن، M_f، C_f و K_f به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سیال نامیده می‌شوند. p_e، $\ddot{u}_e$ و $\ddot{u}_g$ به ترتیب فشار گره‌یی، بردارهای شتاب گره‌یی و زمین هستند.

۲.۲. معادلات دینامیکی اجزاء محدود سازه

معادلات دینامیکی اجزاء محدود سازه که شامل سد و فونداسیون است، زمانی که در معرض حرکت‌های زمین قرار می‌گیرد، با روش اجزاء محدود به‌صورت رابطه‌ی ۸ بیان می‌شود:

$$M_s \ddot{u}_e + C_s \dot{u}_e + K_s u_e = -M_s \ddot{u}_g + Q p_e \qquad (۸)$$

که در آن، M_s، C_s و K_s به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه هستند و Qp_e فشار هیدرودینامیکی تولیدشده به وسیله‌ی مخزن آب است.

۳.۲. معادلات دینامیکی اجزاء محدود سیستم سد ـ مخزن ـ فونداسیون

رابطه‌های دیفرانسیل ۷ و ۸، بیان‌کننده‌ی معادلات گسسته‌ی اجزاء محدود برای مسئله‌ی اندرکنش سیال و سازه هستند که می‌توان آن‌ها را به صورت رابطه‌ی ۹ ترکیب کرد:

$$\begin{bmatrix} M_s & ۰ \\ M f_s & M f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_e \\ \ddot{p}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & ۰ \\ ۰ & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_e \\ \dot{p}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & K_{fs} \\ ۰ & k_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_e \\ p_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M_s \ddot{u}_g \\ -M_{fs} \ddot{u}_g \end{Bmatrix} \qquad (۹)$$

که در آن، $K_{fs} = -Q$ و $M_{fs} = \rho_\omega Q^T$ به ترتیب ماتریس سختی و جرم ناشی از اندرکنش هستند.

معادله‌ی حاکم بر اندرکنش سیال و سازه، یک معادله‌ی دیفرانسیلی خطی مرتبه‌ی دوم است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماتریس‌های جرم و سختی نامتقارن دارد و می‌توان آن را به شکل مرسوم معادله‌های دینامیکی (معادله‌ی ۱۰) بیان کرد:[۹]

$$M_c \ddot{u}_c + C_c \dot{u}_c + K_c u_c = F(t) \qquad (۱۰)$$

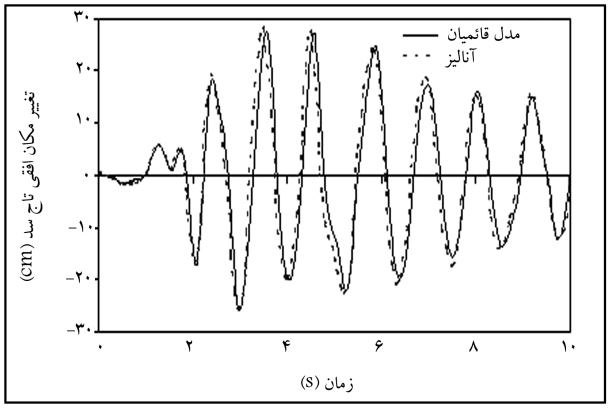
که در آن، M_c، C_c و K_c به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سیستم هستند.

۳. ارزیابی نرم‌افزار ANSYS

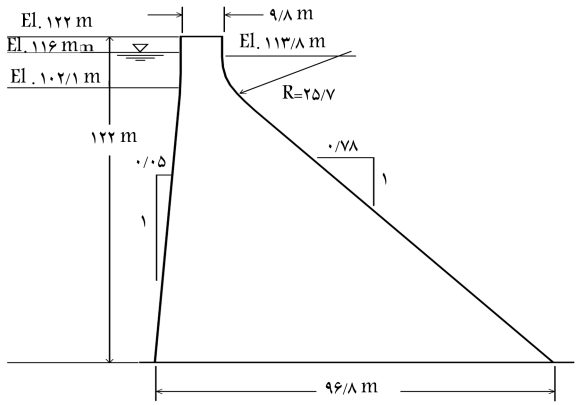
برای ارزیابی دقت و صحت‌سنجی نرم‌افزار ANSYS در مواجهه با مسئله‌ی اندرکنش سد و مخزن، مدل سد مربوط به مطالعه‌یی در سال ۱۹۹۸،[۱۰] به ارتفاع ۱۲۰ متر با مخزن پر و فونداسیون صلب با درنظرگرفتن گسسته‌سازی یکسان و اعمال ۱۰ ثانیه‌ی اول، مؤلفه‌ی افقی زمین‌لرزه‌ی ال‌سنترو[۳] به وسیله‌ی نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و تحلیل شده است. شکل ۱، مقایسه‌ی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان سد را برای مدل موردنظر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ و مقایسه‌ی منحنی‌ها می‌توان به دقت مناسب نرم‌افزار ANSYS برای مسائلی که در آن‌ها اندرکنش سازه و سیال مطرح است، پی برد.

۴. مطالعه‌ی موردی سد پاین فلت

به‌عنوان مطالعه‌ی موردی در پژوهش حاضر، سد پاین فلت[۴] به ارتفاع ۱۲۲ متر به‌صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. سد پاین فلت روی رود کینگ نزدیک فرسنو درکالیفرنیای آمریکا واقع شده و ساختن آن از سال ۱۹۴۹ توسط مهندسان ارتش آمریکا آغاز شد و در سال ۱۹۵۴ به اتمام رسید. مشخصات هندسی سد پاین‌فلت در شکل ۲ نشان داده شده است. کلیه‌ی ابعاد براساس سیستم SI است. مدول کشسانی، وزن واحد حجم و ضریب پواسون بتن سد، به ترتیب: ۲۲٫۴ گیگاپاسکال، ۲۴۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰٫۲ و مدول کشسانی و ضریب پواسون بتن فوندانسیون



شکل ۱. مقایسه‌ی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان بیشینه‌ی تاج سد.



شکل ۲. ابعاد هندسی سد بتنی وزنی پاین فلت (متر).

بدون جرم، به ترتیب ۲۲٫۴ گیگاپاسکال و ۰٫۳۳ در نظرگرفته شده‌اند. برای میراگر لاستیکی قرارگرفته بر وجه بالادست سد از رزین (لاستیک) استفاده شده است که مدول کشسانی، وزن واحد حجم و ضریب پواسون آن به ترتیب ۰٫۵ مگاپاسکال، ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰٫۴۹۹ مد نظر قرار داده شده است.[۱۱] چگالی آب مخزن و سرعت صوت در آب نیز به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۴۴۰ متر بر ثانیه است.

۵. مدل‌سازی

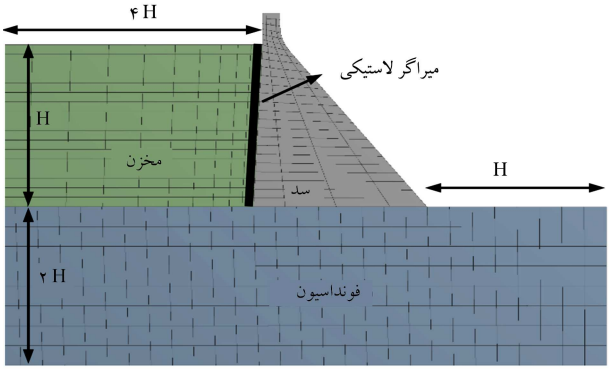
برای تحلیل لرزه‌یی مدل اجزاء محدود کل سیستم سد ـ مخزن ـ فونداسیون (شکل ۳) و بهسازی لرزه‌یی آن از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. نرم‌افزار ANSYS، قابلیت تحلیل لرزه‌یی با درنظرگرفتن هندسه‌ی نامنظم دامنه‌ها و آثار اندرکنش مخزن و پی را دارد. برای این منظور اجزاء مناسبی که رفتار تراکم‌پذیری سیال را نمایش دهد، پیش‌بینی شده است. با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بتنی وزنی و شکل هندسی مخزن، مدل سد به‌صورت دو بعدی با رفتار تنش مسطح در نظرگرفته شده و آثار اندرکنش با فونداسیون در مدل لحاظ شده است. برای گسسته‌سازی قسمت‌های جامد بتن و میراگر لاستیکی از عناصر ۸ گره‌یی SOLID۱۸۲ و برای قسمت سیال و برای سیال مجاور و غیرمجاور سازه از عناصر ۴ گره‌یی FLUID ۲۹ استفاده شده است. برای اینکه قسمت‌های مختلف مدل، شامل: سد، میراگر لاستیکی، فونداسیون و مخزن، کاملاً به یکدیگر بچسبند و هیچ‌گونه فرورفتگی بین آن‌ها وجود نداشته باشد، از قسمت GLUE موجود در نرم‌افزار ANSYS برای اتصال دامنه‌ها استفاده شده است. برای انجام تحلیل لرزه‌یی از روش نیومارک استفاده شده است، که پارامترهای آن به‌صورت $\beta = ۰٫۲۵$ و $\gamma = ۰٫۵$ انتخاب شده است. برای اعمال آثار میرایی از روش رایلی و برای مرز دوردست قطع شده‌ی مخزن از شرط مرزی سامرفلد استفاده شده است. ضرایب میرایی ریلی با استفاده از بسامد اول و دوم سیستم برابر $\alpha = ۵۲۰۲$ و $\beta = ۰٫۰۰۴۶$ استخراج شده است. در مدل نشان داده شده در شکل ۲، ضخامت میراگر لاستیکی ۲۰ سانتی‌متر در نظرگرفته شده است. در جهت مقایسه‌ی عملکرد میراگر لاستیکی نسبت به ماهیچه‌ی بتنی نیز مدل سد با ماهیچه‌ی بتنی مطابق شکل ۴ ایجاد شده است، که ارتفاع ماهیچه در پاشنه‌ی سد از رابطه‌ی $h_f = ۶H - ۰٫۶۵۸H^۲ - ۱٫۰۷$ به دست می‌آید که در آن h_f ارتفاع ماهیچه در پاشنه‌ی سد بر حسب متر و H ارتفاع آب ذخیره شده در پشت سد (۱۰۰ متر) است.

۶. تحلیل مدل و ارزیابی نتایج

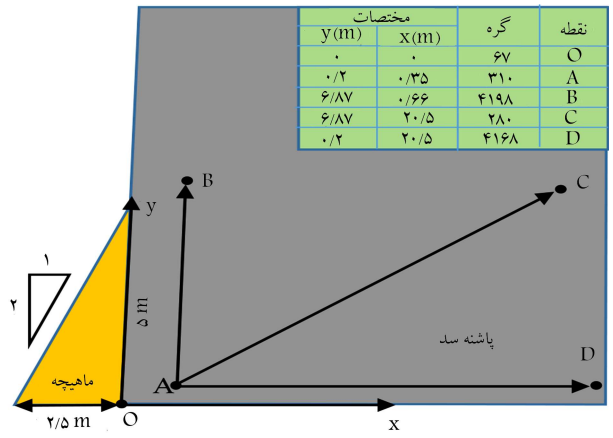
در تحلیل کشسانی، یک حجم کوچک از جسم جامد به نحوی می‌تواند دوران داده شود که همانند شکل ۵، فقط تحت تأثیر تنش‌های نرمال قرارگیرد و همه‌ی تنش‌های برشی صفر شوند. سه تنش نرمال باقیمانده با عنوان تنش‌های اصلی نامیده می‌شوند، که رابطه‌ی ۱۱ بین آن‌ها برقرار است:

$$\sigma_۱ > \sigma_۲ > \sigma_۳ \qquad (۱۱)$$

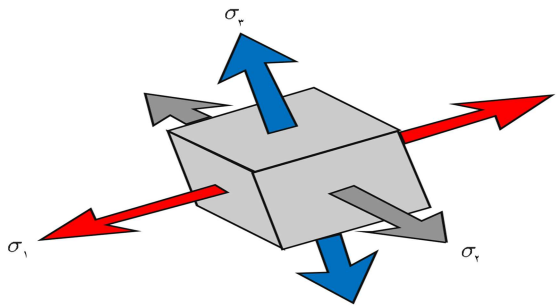
که در آن، $\sigma_۱$، $\sigma_۲$ و $\sigma_۳$ به ترتیب تنش اصلی بیشینه، تنش اصلی میانی و تنش اصلی کمینه نامیده می‌شوند. در تحلیل کشسانی، بیشترین مقدار تنش کششی وارده بر جسم برابر تنش اصلی بیشینه (کششی) و بیشترین مقدار تنش فشاری وارده بر



شکل ۳. سیستم سد ـ مخزن ـ فونداسیون همراه با میراگر لاستیکی.



شکل ۴. ماهیچه‌ی بتنی ایجاد شده در پاشنه‌ی سد.



شکل ۵. تنش‌های اصلی وارده بر بدنه‌ی سد.

جسم برابر تنش اصلی کمینه (فشاری) است. برای انجام تحلیل، مصالح سد بتنی و پی با رفتار همگن، خطی و ایزوتروپیک و آب مخزن با محیطی همگن، ایزوتروپ، غیرلزج، غیرچرخشی و با تغییرمکان‌های کوچک و تراکم‌پذیر فرض می‌شوند.

۱.۶. مقایسه‌ی عملکرد ماهیچه‌ی بتنی نسبت به میراگر لاستیکی

بعد از تحلیل دینامیکی خطی مدل‌های سد بدون و با میراگر لاستیکی و همچنین سد با ماهیچه‌ی بتنی تحت اثر زمین‌لرزه‌ی سان‌فرناندو[۵]، عملکرد میراگر لاستیکی نسبت به ماهیچه‌ی بتنی در کاهش تنش اصلی کششی وارده بر پاشنه‌ی سد در گره‌های موجود در راستاهای AB، AC و AD نشان داده‌شده در شکل ۴، به‌صورت نتایج عددی در جدول‌های ۱ تا ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۱ می‌توان گفت که میراگر لاستیکی، تنش اصلی کششی

جدول ۱. تأثیر میراگر لاستیکی و ماهیچه‌ی بتنی بر تنش کششی وارده بر پاشنه‌ی سد در راستای AB.

راستای AB	سد بدون میراگر	سد با میراگر		سد با ماهیچه	
شماره‌ی گره	تنش اصلی کششی (MPa)	تنش اصلی کششی (MPa)	درصد کاهش	تنش اصلی کششی (MPa)	درصد کاهش
۳۱۰	۶٫۶۷۸۵۷	۴٫۲۵	۳۶٫۳۶۳۶۲	۲٫۶۴	۶۰٫۴۷۰۵۸
۹۴۰	۴٫۱۰۴۹۹	۲٫۷	۳۴٫۲۲۶۳۹	۲٫۹۱	۲۹٫۱۱۰۶۷
۱۵۷۰	۳٫۱۰۳۸۸	۲٫۰۶	۳۳٫۶۳۱۴۵	۳٫۰۷	۱٫۰۹۱۵۳۷
۲۲۵۴	۲٫۶۵۶۸۱	۱٫۷۸	۳۳٫۰۰۲۳۶	۳٫۲۸	-۲۳٫۴۵۶۳
۲۸۸۴	۲٫۳۹۳۹۵	۱٫۶۱	۳۲٫۷۴۷۱۳	۳٫۸۲	-۵۹٫۵۶۸۹
۳۵۱۴	۲٫۲۲۶۸۴	۱٫۴۹	۳۳٫۰۸۹۰۴	۳٫۶۵	-۶۳٫۹۰۹۴
۴۱۹۸	۲٫۱۰۳۷۵	۱٫۳۲	۳۷٫۲۵۴۹	۲٫۸۲	-۳۴٫۰۴۶۳

جدول ۲. تأثیر میراگر لاستیکی و ماهیچه‌ی بتنی در تنش کششی وارده بر پاشنه‌ی سد در راستای AC.

راستای AB	سد بدون میراگر	سد با میراگر		سد با ماهیچه	
شماره‌ی گره	تنش اصلی کششی (MPa)	تنش اصلی کششی (MPa)	درصد کاهش	تنش اصلی کششی (MPa)	درصد کاهش
۳۱۰	۶٫۶۷۸۵۷	۴٫۲۵	۳۶٫۳۶۳۶۲	۲٫۶۴	۶۰٫۴۷۰۵۸
۹۳۵	۲٫۹۱۸۶۹	۱٫۹۲	۳۴٫۲۱۷۰۶	۲٫۲۵	۲۲٫۹۱۰۶۲
۱۵۶۰	۲٫۰۲۷۵۱	۱٫۳۶	۳۲٫۹۲۲۶۵	۱٫۷۶	۱۳٫۱۹۴۰۲
۲۲۳۹	۱٫۴۸۷۹۲	۱٫۰۲	۳۱٫۴۴۷۹۳	۱٫۳۶	۸٫۵۹۷۲۳۶
۲۸۶۴	۱٫۰۶۰۷۱	۰٫۷۵۷۵۱۸	۲۸٫۵۸۳۸۷	۰٫۹۹۳۲۸۴	۶٫۳۵۶۶۸۶
۳۴۸۹	۰٫۶۷۴۶۷۷	۰٫۵۱۹۲۰۲	۲۳٫۰۴۴۳۶	۰٫۶۳۷۸۰۸	۵٫۴۶۴۶۸۹
۴۱۶۸	۰٫۳۲۸۶۸۶	۰٫۲۹۴۷۵۲	۱۰٫۳۲۴۱۴	۰٫۳۲۳۴۲	۱٫۹۳۰۱۱

جدول ۳. تأثیر میراگر لاستیکی و ماهیچه‌ی بتنی در تنش کششی وارده بر پاشنه‌ی سد در راستای AD.

راستای AB	سد بدون میراگر	سد با میراگر		سد با ماهیچه	
شماره‌ی گره	تنش اصلی کششی (MPa)	تنش اصلی کششی (MPa)	درصد کاهش	تنش اصلی کششی (MPa)	درصد کاهش
۳۱۰	۶٫۶۷۸۵۷	۴٫۲۵	۳۶٫۳۶۳۶۲	۲٫۶۴	۶۰٫۴۷۰۵۸
۳۰۵	۲٫۷۷۱۷۶	۱٫۸۱	۳۴٫۶۹۸۵۳	۲٫۱	۲۴٫۲۳۵۸۶
۳۰۰	۱٫۸۶۷۹	۱٫۲۶	۳۲٫۵۴۴۵۷	۱٫۶۳	۱۲٫۷۳۶۲۳
۲۹۵	۱٫۳۵۷۴۷	۰٫۹۴۲۹۴۷	۳۰٫۵۳۶۴۴	۱٫۲۵	۷٫۹۱۶۹۳۴
۲۹۰	۰٫۹۶۳۷۱۴	۰٫۷۰۳۳۷۹	۲۷٫۰۱۳۷۲	۰٫۹۰۸۴۹۵	۵٫۷۲۹۸۱۲
۲۸۵	۰٫۶۰۷۴۳۶	۰٫۴۸۸۴۸۳	۱۹٫۵۸۲۸	۰٫۵۷۷۱۷۰	۴٫۹۸۲۵۸۳
۲۸۰	۰٫۳۰۶۳۶۴	۰٫۲۸۱۳۶۱	۸٫۱۶۱۲۰۷	۰٫۳۰۷۱۶۳	-۰٫۲۶۰۸

ایجادشده در گره‌های موجود در راستای AB را به‌صورت مؤثر کاهش می‌دهد. درصورتی که در مدل سد با ماهیچه‌ی بتنی، فقط در گره‌های نزدیک قاعده‌ی سد، تنش اصلی کششی به‌صورت مؤثر کاهش می‌یابد و در سایر گره‌ها، مقدار تنش کششی نسبت به مدل سد بدون ماهیچه‌ی بتنی افزایش می‌یابد.

جدول ۲ نیز نشان می‌دهد که با وجود عملکرد مثبت ماهیچه‌ی بتنی در کاهش تنش‌های وارده بر گره‌های موجود در راستای AC، عملکرد میراگر لاستیکی نسبت به ماهیچه‌ی بتنی در بیشتر گره‌ها به مراتب بهتر است.

نتایج ارائه شده در جدول ۳، تقریباً مشابه نتایج ارائه شده در جدول ۲ است. براساس مقادیر ارائه شده در جدول ۳، تنش کششی موجود در گره‌های راستای AD، همانند گره‌های راستای AC تحت اثر ماهیچه کاهش می‌یابند. با این وجود، میراگر لاستیکی نسبت به ماهیچه‌ی بتنی، عملکرد بهتری دارد. در ادامه، با استفاده از آنالیز احتمالاتی مونت‌کارلو، بهینه‌سازی ارتفاع میراگر لاستیکی ارزیابی شده است.

۲.۶. بررسی تأثیر ارتفاع میراگر لاستیکی با استفاده از آنالیز احتمالاتی مونت‌کارلو

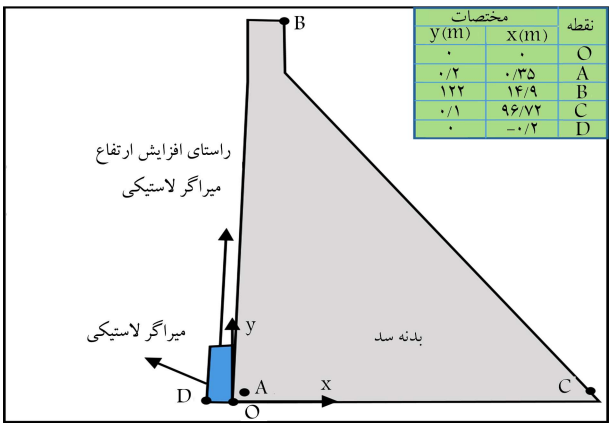
برخی پژوهشگران (۲۰۰۰)،[۱۲] با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، احتمال گسترش ترک در یک سد بتنی وزنی را محاسبه و نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو

را با نتایج آزمایش بر روی یک مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند که این قیاس حاکی از تطبیق خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی بود. همچنین در سال ۱۹۹۸،[۱۳] با استفاده از برنامه‌ی اجـزاء محدود به نام NISA که قابلیت شبیه‌سازی مونت‌کارلو را دارد، قابلیت اطمینان سد بررسی شد و نتایج شبیه‌سازی مذکور به‌صورت نمودارهای توزیع تجمعی نشان داده شدند. در پژوهش دیگری (۲۰۰۵)،[۱۴] نیز تحلیل قابلیت اطمینان سد پورشوک[۶] واقع در ترکیه با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شد و ۷ پارامتر به‌عنوان متغیر تعریف و نتایج به‌صورت جدولی که احتمال شکست را براساس ضرایب ایمنی سد نشان می‌داد، ارائه شدند. روش جدیدی نیز در سال ۲۰۱۲، که ترکیبی از شبیه‌سازی مونت‌کارلو و روش اجزاء محدود بود، ارائه شد،[۱۵] و با استفاده از آن رفتار سد بررسی و نتایج شبیه‌سازی به‌صورت نمودار تابع توزیع تجمعی نشان داده شد. همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)،[۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، قابلیت اطمینان سد بتنی وزنی در برابر لغزش بررسی و در آن ۱۰ پارامتر متغیر در نظر گرفته شد و نتایج به‌صورت نمودار احتمال شکست در برابر لغزش، برای هر متغیر نشان داده شد. برخی پژوهشگران (۲۰۱۳)،[۱۷] نیز به دلیل محدودیت استفاده از روش JC برای قابلیت اطمینان سازه‌های هیدرولیکی و محدودیت‌های موجود در روش مونت‌کارلو برای سازه‌های هیدرولیکی بزرگ و پیچیده سعی کردند از طریق ترکیب نرم‌افزار متلب[۷] با روش مونت‌کارلو به تجزیه و تحلیل و قابلیت اطمینان سازه‌های هیدرولیکی بپردازند. نتایج حاصل از پژوهش اخیر نشان داد که روش‌های مبتنی بر متلب ـ مونت‌کارلو در قابلیت اطمینان سازه‌های هیدرولیکی ساده و سریع است و عملکرد مناسبی دارند. همچنین در همان سال،[۱۸] با استفاده از روش مونت‌کارلو به ایجاد حرکات غیریکنواخت سه بعدی زمین به منظور مقایسه‌ی تأثیر حرکات یکنواخت و غیریکنواخت سه بعدی در عملکرد سد قوسی دز پرداخته شد و نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پاسخ‌های حاصل از درنظرگرفتن حرکت‌های غیریکنواخت سه بعدی زمین نسبت به درنظرگرفتن حرکت‌های یکنواخت زمین متفاوت است و می‌تواند پاسـخ‌های سازه‌یی سیستم را افزایش دهد. در سال ۲۰۱۴،[۱۹] نیز با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو و روش نمونه‌برداری مکعبی لاتین نشان داده شد که مدول کشسانی و مقاومت کششی بتن، نقش قابل توجه‌تری در نسبت کرنش نهایی در مقابل زلزله دارند. در زمینه‌ی استفاده از تحلیل احتمالاتی در ارزیابی پاسخ لرزه‌یی سد، پژوهشی در سال ۲۰۱۵ انجام شد،[۲۰] و تأثیر جذب فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن به وسیله‌ی کف مخزن بررسی شد و نتایج به‌دست آمده از مطالعه‌ی مذکور، به روشنی روند اثرپذیری پاسخ‌ها را از تغییرات ضریب جذب کف نشان می‌داد. در ادامه‌ی پژوهش اخیر (۲۰۱۷)،[۲۱] تأثیر سختی بتن بدنه‌ی سد وزنی در نمایش لرزه‌یی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بررسی شد و با توجه به نتایج به‌دست آمده‌ی آن، می‌توان به مقدار بهینه‌ی مدول یانگ بتن، جهت دست‌یابی به پاسخ مطمئن سازه با درنظرگرفتن ملاحظات اقتصادی دست یافت.

پژوهشگران دیگری (۲۰۱۶)[۲۲] نیز از روش شبیه‌سازی زیرمجموعه، با زنجیره‌ی مارکوف مونت‌کارلو به‌عنوان یک ابزار پیشرفته در راستای تحلیل قابلیت اطمینان، به منظور ارزیابی دقیق از احتمال شکست سد با کمترین تعداد نمونه استفاده کردند. با توجه به مطالعات انجام شده، کاربرد وسیع استفاده از آنالیز احتمالاتی مونت‌کارلو، با فرض عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن ویژگی مواد، هندسه، و ... بیشتر در زمینه‌ی تحلیل عدم قطعیت سازه‌ها بوده است. در صورتی که آشنایی با ابزاری کارآمد و شناسایی نقاط قوت و ضعف آن می‌تواند امکانات جدیدی در اختیار پژوهشگران، اساتید و دانش‌آموختگان قرار دهد. بیشتر مهندسان طراح سازه، به منظور بهینه‌سازی سازه‌ها از مجموعه‌ی نرم‌افزارهای پیچیده استفاده می‌کنند، در صورتی که در بیشتر مواقع به منابع کد نرم‌افزاری دسترسی ندارند و حتی درباره‌ی الگوریتم‌های استفاده شده در نرم‌افزارهای مذکور به منظور بهینه‌سازی سازه‌ها، اطلاعات کمی دارند. از این رو تلاش اصلی پژوهشگران، ارائه‌ی راهکارهایی در جهت استفاده‌ی مناسب از الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزارهای ذکرشده به منظور بهینه‌سازی سازه‌هاست. در نوشتار حاضر سعی شده است آنالیز احتمالاتی موجود در نرم‌افزار ANSYS براساس روش مونت‌کارلو به‌عنوان روشی مناسب در جهت بهینه‌سازی میراگر لاستیکی، از طریق بررسی حساسیت لرزه‌یی سد بتنی وزنی نسبت به ارتفاع میراگر لاستیکی ارائه شود.

در روش مونت‌کارلو، N بار از توزیع‌های پارامتر، نمونه‌برداری می‌شود. این فرایند، جمعیتی از موارد ممکن N ایجاد می‌کند که هر یک از آن‌ها نیاز به تجزیه وتحلیل دارند.[۲۳] با توزیع کامل پاسخ لرزه‌یی می‌توان به تخصیص نمونه‌های سازه‌یی به تعداد کافی اطمینان داشت. قابلیت شبیه‌سازی مونت‌کارلو را می‌توان با جایگزینی نمونه‌های تصادفی کلاسیک با نمونه‌ی مکعبی لاتین LHS بهبود داد. LHS یک روش آماری برای تولید یک نمونه از مجموعه‌های قابل قبول از مقادیر پارامتری به‌دست آمده از توزیع چند بعدی است و یک مورد خاص از نمونه‌گیری طبقه‌یی است، که اجازه‌ی برآورد کارآمدی از مقدار مورد علاقه را با کاهش واریانس کلاسیک مونت‌کارلو می‌دهد. هیچ مقدار مشخص شده‌یی برای اندازه‌ی نمونه‌ی N جهت دسترسی به سطح اطمینان خاصی در LHS وجود ندارد. مقدار N به نسبت زیادی به نوع سازه و تعداد پارامترهای تصادفی وابسته و به‌مراتب بیشتر از تعداد متغیرهای تصادفی است. نمای جزئی سیستم سد ـ میراگر لاستیکی ایجاد شده در نرم‌افزار ANSYS، به منظور تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو مطابق شکل ۶ و همچنین تنظیم‌های تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو در نرم‌افزار ANSYS، به‌نحوی‌که اندازه‌ی نمونه برای آنالیز کافی باشد، مطابق جدول ۴ ارائه شده است.

رکوردهای زمین‌لرزه‌های نورثریج-۰۱،[۸] سن‌فرناندو، و امپریال ولی-۰۲،[۹] به منظور تحلیل دینامیکی خطی مطابق جدول ۵ از سایت Peer استخراج شده است؛ با توجه به اثر مخرب‌تر زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به دور گسل بر روی پایداری سازه‌ها، رکوردهای نزدیک گسل زمین‌لرزه‌های مذکور جهت اعمال بر سازه انتخاب شده‌اند. زمین‌لرزه‌های انتخاب‌شده برای تحلیل لرزه‌یی در منطقه‌ی احداث سد رخ داده‌اند، که براساس آیین‌نامه‌ی UBC آمریکا به $0.3g$ که شتاب بیشینه‌ی منطقه‌ی



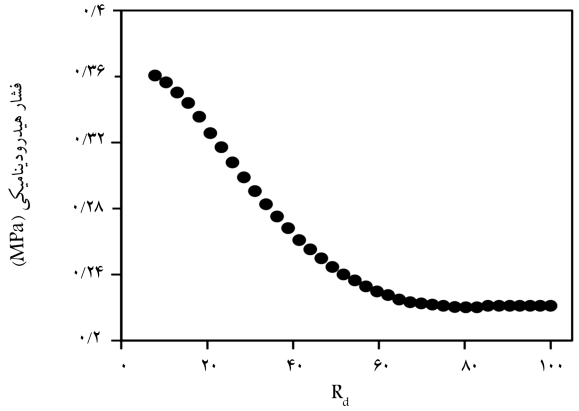
شکل ۶. سیستم سد ـ میراگر لاستیکی.

جدول ۴. تنظیم‌های تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو در نرم‌افزار ANSYS.

متغیر تصادفی	نوع توزیع	تعداد حلقه شبیه‌سازی	تعداد تکرار
ارتفاع میراگر لاستیکی	یکنواخت	۴۰	۳

جدول ۵. مشخصات رکوردهای لرزه‌یی.

زمین‌لرزه	نام ایستگاه	فاصله از گسل (km)
نورثریج ـ۰۱	Castaic_Old Ridge Route	۲۰/۷۲
امپریال ولی‌ـ۰۲	Imperial Valley-۰۲ Array #۹	۶/۰۹
سن‌فرناندو	Pacoima Dam (upper left abut)	۱/۸۱



شکل ۷. حساسیت فشار هیدرودینامیکی پاشنه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی‌ـ۰۲.

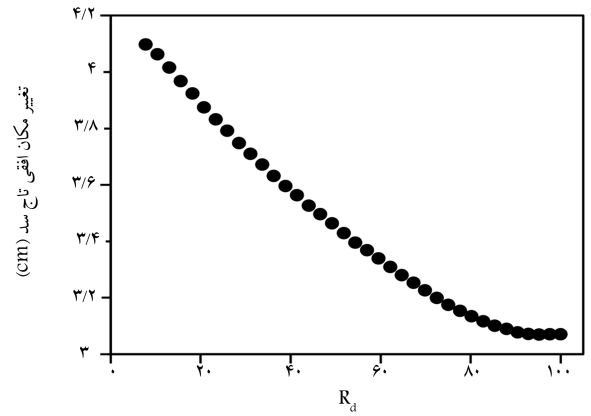
احداث سد است، مقیاس شده‌اند. آیین‌نامه‌ی UBC، یک آیین‌نامه‌ی ساختمانی است که بیشتر در غرب ایالات متحده‌ی آمریکا استفاده می‌شود. در نوشتار حاضر، به منظور دست‌یابی به شتاب بیشینه‌ی منطقه‌ی احداث سد از ویرایش سال ۱۹۹۷ آیین‌نامه‌ی UBS استفاده شده است.

پس از انجام آنالیز احتمالاتی در نرم‌افزار ANSYS، برای مدل با میراگر لاستیکی، نتایج حاصل که بیانگر حساسیت پاسخ‌های لرزه‌یی سد نسبت به ارتفاع میراگر لاستیکی است، استخراج شده است. با توجه به ثابت بودن ارتفاع مخزن که مطابق شکل ۲ برابر با ۱۱۶ متر است، به منظور ارائه و مقایسه‌ی مناسب‌تر نتایج، حساسیت پاسخ‌های لرزه‌یی نسبت به ارتفاع نسبی میراگر (R_d) تحت اثر زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی‌ـ۰۲ در شکل‌های ۷ الی ۱۰ ارائه شده است. این تذکر لازم است که R_d برابر نسبت بین ارتفاع میراگر به ارتفاع مخزن ضرب در ۱۰۰ است. مطابق شکل ۷، ارتفاع میراگر لاستیکی در محدوده‌ی بیش از ۶۰٪ ارتفاع مخزن، تأثیر چندانی در فشار هیدرودینامیکی وارده برنقطه‌ی D نزدیک پاشنه‌ی سد ندارد.

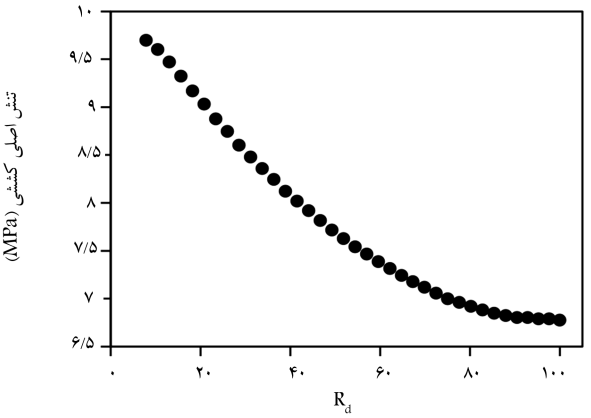
شکل ۸، نیز نشان‌دهنده‌ی تأثیر مؤثر ارتفاع میراگر لاستیکی در کاهش مقدار جابه‌جایی افقی تاج سد در نقطه‌ی B تا ارتفاعی برابر ۸۰٪ ارتفاع مخزن است و افزایش بیش از مقدار مذکور، تأثیر بخصوصی در کاهش جابه‌جایی افقی تاج سد ندارد.

همچنین با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که میراگر لاستیکی، تنش اصلی کششی وارده بر نقطه‌ی A در نزدیکی پاشنه‌ی سد را تا ارتفاعی برابر ۸۰٪ ارتفاع مخزن به‌صورت مؤثری کاهش می‌دهد و افزایش بیش ۸۰٪، عملکرد مناسبی را در کاهش تنش اصلی کششی به وجود آمده در سد ارائه نمی‌دهد. در شکل ۱۰، نیز میراگر لاستیکی تنش اصلی فشاری وارده بر پنجه‌ی سد در نقطه‌ی C را تا ارتفاعی تقریباً برابر با ۸۰٪ ارتفاع مخزن به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. در ادامه، برای بررسی تأثیر شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه‌های دیگر، مدل موردنظر تحت اثر دو زمین‌لرزه‌ی سن‌فرناندو و نورثریج‌ـ۰۱ ارزیابی شده است. نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی مدل تحت اثر زمین‌لرزه‌ی سن‌فرناندو در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ مشاهده می‌شود.

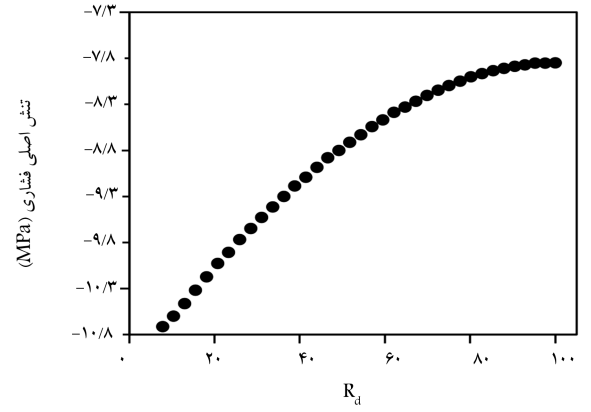
در شکل ۱۱، میراگر لاستیکی تا ارتفاعی برابر ۲۰٪ ارتفاع مخزن، عملکرد قابل ملاحظه‌یی در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارده بر نقطه‌ی D در نزدیکی پاشنه‌ی



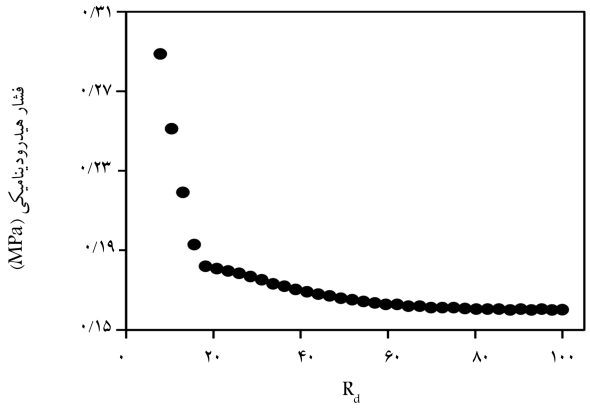
شکل ۸. حساسیت تغییرمکان افقی تاج سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی‌ـ۰۲.



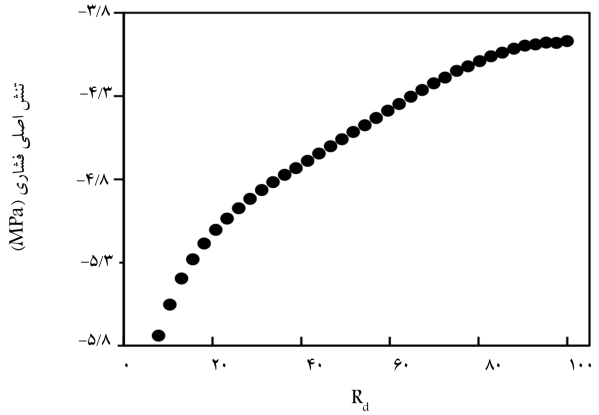
شکل ۹. حساسیت تنش اصلی کششی پاشنه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی‌ـ۰۲.



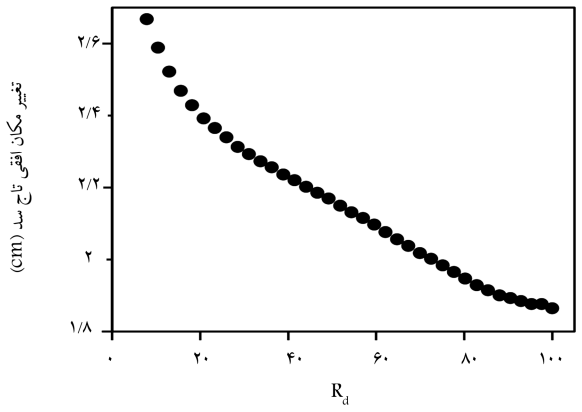
شکل ۱۰. حساسیت تنش اصلی فشاری پنجه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی امپریال ولی‌ـ۰۲.



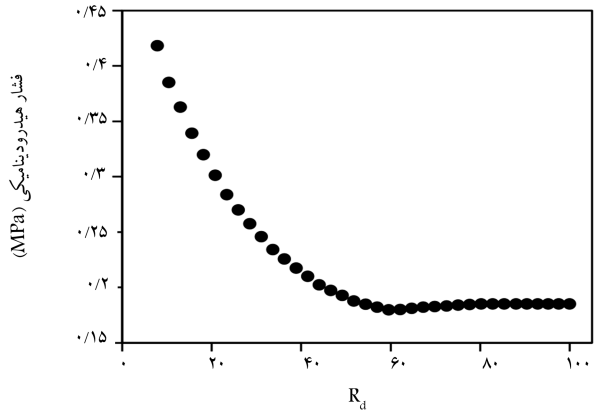
شکل ۱۱. حساسیت فشار هیدرودینامیکی پاشنه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی سن‌فرناندو.



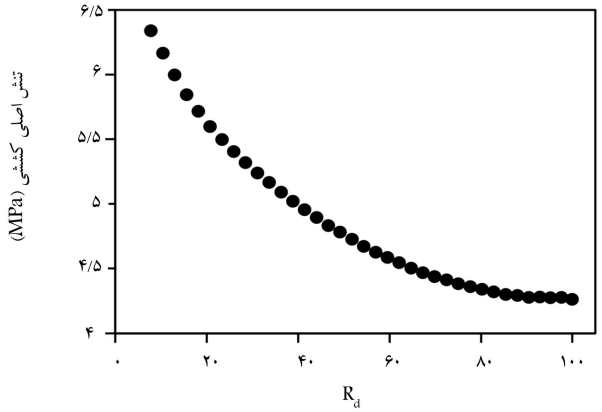
شکل ۱۴. حساسیت تنش اصلی فشاری پنجه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی سن‌فرناندو.



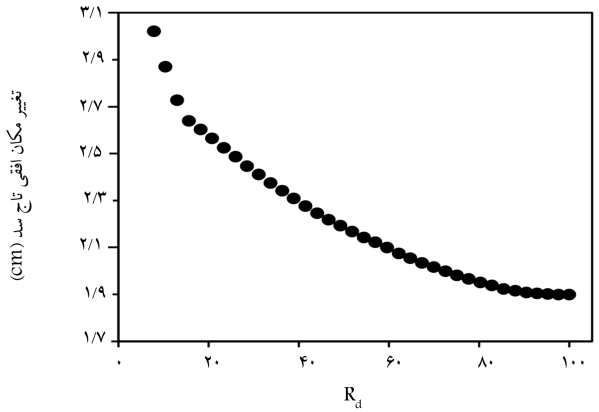
شکل ۱۲. حساسیت تغییرمکان افقی تاج سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی سن‌فرناندو.



شکل ۱۵. حساسیت فشار هیدرودینامیکی پاشنه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی نورثریج-۰۱.



شکل ۱۳. حساسیت تنش اصلی کششی پاشنه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی سن‌فرناندو.



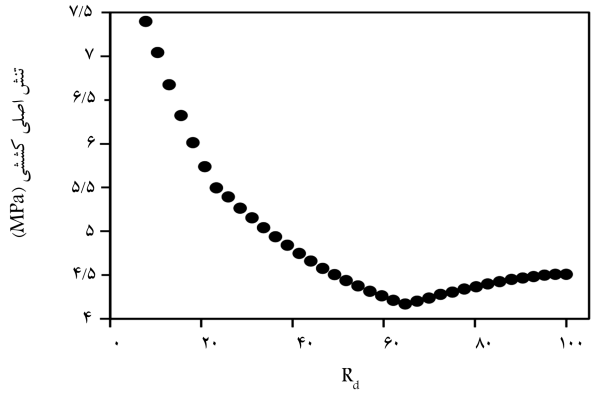
شکل ۱۶. حساسیت تغییرمکان افقی تاج سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی نورثریج-۰۱.

سد داشته است. افزایش بیشتر ارتفاع میراگر لاستیکی، تأثیر چندانی در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد ندارد. با توجه به شکل ۱۲، ارتفاع میراگر لاستیکی تا ۲۰٪ ارتفاع مخزن، بیشترین تأثیر را در کاهش تغییرمکان افقی تاج سد در نقطه‌ی B داشته است. مطابق شکل ۱۳، افزایش ارتفاع میراگر لاستیکی در محدوده‌ی بیش از ۸۰٪ ارتفاع مخزن، تأثیر چندانی در کاهش تنش اصلی کششی وارده بر نقطه‌ی A در پاشنه‌ی سد ندارد. در شکل ۱۴، نیز میراگر لاستیکی تا ارتفاع تقریبی ۸۰٪ ارتفاع مخزن توانسته است عملکرد مناسبی در کاهش تنش اصلی فشاری وارده بر سد در نقطه‌ی C داشته باشد. در ادامه، نتایج حاصل از تحلیل احتمالاتی مدل تحت اثر زمین‌لرزه‌ی نورثریج-۰۱ نیز در شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ ارائه شده است.

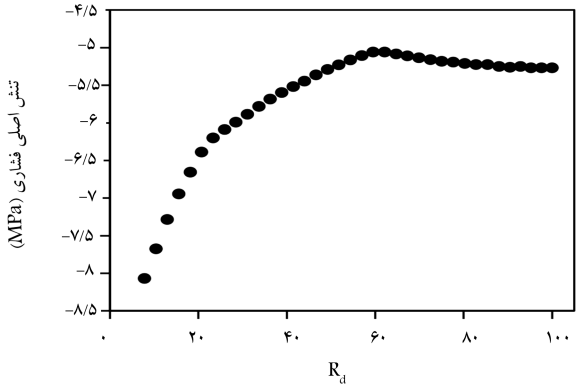
براساس شکل ۱۵، کاهش فشار هیدرودینامیکی وارده بر نقطه‌ی D توسط میراگر لاستیکی تا ارتفاعی از میراگر برابر با ۶۰٪ ارتفاع مخزن بوده است. در شکل ۱۶، میراگر لاستیکی تا ارتفاع تقریبی ۲۰٪ ارتفاع مخزن بیشترین تأثیر را در کاهش

جدول ۶. پاسخ‌های عددی حاصل از تحلیل احتمالاتی مدل تحت اثر زلزله‌ی امپریال ولی-۰۲.

R_d	تنش اصلی کششی در نقطه‌ی A		تنش اصلی فشاری در نقطه‌ی C		فشار هیدرودینامیکی در نقطه‌ی D		جابه‌جایی تاج سد در نقطه‌ی B	
	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (cm)	درصد کاهش
۰	۹/۷	-	۱۰/۷	-	۰/۳۴۱	-	۴/۱۱	-
۷/۸۴	۹/۶۹	۰/۰۲۸	۱۰/۷۱	-۰/۱۲۱۴	۰/۳۶۰	-۵/۷۱۲	۴/۰۹	۰/۲۹
۱۷/۲۴	۹/۱۶۹	۵/۴۷	۱۰/۱۷	۴/۹۳	۰/۳۳	۱/۶۱	۳/۹۲	۴/۵۲
۳۴/۴۸	۸/۳۵	۱۳/۸۵	۹/۴۱	۱۲/۰۲	۰/۲۸۲	۱۷/۱۵	۳/۶۷	۱۰/۶۶
۵۱/۷۲	۷/۶۲	۲۱/۳۷	۸/۷۱	۱۸/۵۸	۰/۲۴	۲۹/۶۱	۳/۴۲	۱۶/۵۹
۶۰/۳۴	۷/۳۸	۲۳/۸۶	۸/۴۶	۲۰/۸۵	۰/۲۳	۳۲/۶۶	۳/۳۳	۱۸/۷۶
۶۸/۹۶	۷/۱۱	۲۶/۶۱	۸/۲۰	۲۳/۳۴	۰/۲۲۳	۳۴/۷۸	۳/۲۲	۲۱/۵۰
۷۷/۵۸	۶/۹۵	۲۸/۲۶	۸/۰۴۸	۲۴/۷۸	۰/۲۲	۳۵/۴۴	۳/۱۵	۲۳/۲۸
۸۶/۲۰	۶/۸۴	۲۹/۴۱	۷/۹۳	۲۵/۸۳	۰/۲۲	۳۵/۲۱	۳/۰۹	۲۴/۵۷
۹۴/۸۲	۶/۷۸	۳۰/۰۴۲	۷/۸۵۳	۲۶/۵۹	۰/۲۲	۳۵/۲۱۶	۳/۰۶	۲۵/۳۲
۱۰۰	۶/۷۷	۳۰/۱۷	۷/۸۵	۲۶/۶۳	۰/۲۲	۳۵/۲۱	۳/۰۶	۲۵/۳۱



شکل ۱۷. حساسیت تنش اصلی کششی پاشنه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی نورثریج-۰۱.



شکل ۱۸. حساسیت تنش اصلی فشاری پنجه‌ی سد به R_d تحت اثر زمین‌لرزه‌ی نورثریج-۰۱.

تغییرمکان افقی نقطه‌ی B در تاج سد داشته است. با توجه به شکل ۱۷، میراگر لاستیکی تا ارتفاع تقریبی ۶۵٪ ارتفاع مخزن، تنش اصلی کششی وارد بر نقطه‌ی A در پاشنه‌ی سد را به‌صورت مؤثرکاهش داده است. شکل ۱۸، نیز نشان‌دهنده‌ی تأثیر مؤثر میراگر لاستیکی درکاهش تنش اصلی فشاری وارده بر سد تا ارتفاع تقریبی ۶۰٪ ارتفاع مخزن است. درانتها، برای بررسی مناسب‌تر تأثیر ارتفاع میراگر لاستیکی درکاهش پاسخ‌های لرزه‌یی، مقادیر عددی پاسخ‌ها به‌صورت جدول‌های ۶ الی ۸ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۶، افزایش ارتفاع میراگر لاستیکی در حدود بیش از ۶۰٪ ارتفاع مخزن، تأثیر چندانی در شدت کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد نداشته است. در جدول ۷، نیز با افزایش ارتفاع میراگر لاستیکی تا مقدار تقریبی ۶۸٪ ارتفاع مخزن، شدت کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد، روندی صعودی داشته است. ولی با افزایش بیشتر ارتفاع میراگر لاستیکی، شدت کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد روندی نزولی پیدا کرده است. براساس داده‌های جدول ۸، ارتفاع میراگر لاستیکی تا ۶۸٪ ارتفاع مخزن، عملکردی مناسب در شدت کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد داشته است. با توجه به نتایج حاصل و ارزیابی آن‌ها می‌توان ارتفاع مناسب برای میراگر را انتخاب کرد، تا طراحی با توجه به معیار مناسب آن جهت ایمنی و ملاحظات اقتصادی انجام شود. ازاین‌رو با توجه به نتایج حاصل از جدول‌های اخیر، انتخاب ارتفاع میراگر لاستیکی در محدوده‌ی ۶۰ تا ۷۰ درصد ارتفاع مخزن، سبب استفاده‌ی بهینه از میراگر لاستیکی می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا به مقایسه‌ی عملکرد میراگر لاستیکی نسبت به ماهیچه‌ی بتنی برای بهسازی پاسخ لرزه‌یی سد بتنی وزنی پرداخته شده است. برای بررسی

جدول ۷. پاسخ‌های عددی حاصل از تحلیل احتمالاتی مدل تحت اثر زلزله‌ی سن‌فرناندو.

R_d	تنش اصلی کششی در نقطه‌ی A		تنش اصلی فشاری در نقطه‌ی C		فشار هیدرودینامیکی در نقطه‌ی D		جابه‌جایی تاج سد در نقطه‌ی B	
	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (cm)	درصد کاهش
۰	۶٫۷	-	۶٫۱۵	-	۰٫۳۷۷	-	۲٫۹	-
۷٫۸۴	۶٫۳۳۷	۵٫۴	۵٫۷۴	۶٫۶۷	۰٫۲۸۸	۲۳٫۴۲	۲٫۶۶	۸٫۰۲
۱۷٫۲۴	۵٫۷۱۳	۱۴٫۷۱۷	۵٫۱۸۶	۱۵٫۶۷	۰٫۱۸۲	۵۱٫۷۲۶	۲٫۴۳	۱۶٫۲۷
۳۴٫۴۸	۵٫۱۶۵	۲۲٫۹۱	۴٫۸۱۶	۲۱٫۷	۰٫۱۷۳	۵۴٫۱	۲٫۲۷	۲۱٫۶۵
۵۱٫۷۲	۴٫۷۲	۲۹٫۴۷	۴٫۵۱۶	۲۶٫۶	۰٫۱۶۵	۵۶٫۲	۲٫۱۵	۲۵٫۹
۶۰٫۳۴	۴٫۵۸	۳۱٫۵۶	۴٫۳۸	۲۸٫۶۵	۰٫۱۶۳	۵۶٫۸۴	۲٫۱	۲۷٫۷۱
۶۸٫۹۶	۴٫۴۳	۳۳٫۷۹	۴٫۲۲	۳۱٫۳۲	۰٫۱۶۱	۵۷٫۲۶	۲٫۰۱	۳۰٫۴۴
۷۷٫۵۸	۴٫۳۵	۳۴٫۹۷	۴٫۱۲	۳۳	۰٫۱۶	۵۷٫۳۶	۱٫۹۶	۳۲٫۲۵
۸۶٫۲۰	۴٫۲۹	۳۵٫۸۴	۴٫۰۴	۳۴٫۳۴	۰٫۱۶۰	۵۷٫۴۶	۱٫۹۱	۳۳٫۹۹
۹۴٫۸۲	۴٫۲۷	۳۶٫۲۲	۳٫۹۷	۳۵٫۳۰	۰٫۱۶۰	۵۷٫۴۵	۱٫۸۷	۳۵٫۳۱
۱۰۰	۴٫۲۶۱۱	۳۶٫۴۰	۳٫۹۶۹	۳۵٫۴۵	۰٫۱۶۰	۵۷٫۵۴	۱٫۸۶	۳۵٫۷۲

جدول ۸. پاسخ‌های عددی حاصل از تحلیل احتمالاتی مدل تحت اثر زلزله‌ی نورثریج-۰۱.

R_d	تنش اصلی کششی در نقطه‌ی A		تنش اصلی فشاری در نقطه‌ی C		فشار هیدرودینامیکی در نقطه‌ی D		جابه‌جایی تاج سد در نقطه‌ی B	
	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (MPa)	درصد کاهش	مقدار (cm)	درصد کاهش
۰	۸	-	۸٫۶۸	-	۰٫۵۱۶	-	۳٫۲۵	-
۷٫۸۴	۷٫۴	۷٫۶	۸٫۰۷	۷٫۰۳	۰٫۴۱۸	۱۹	۳٫۰۲	۷
۱۷٫۲۴	۶٫۰۱	۲۴٫۹	۶٫۶۵	۲۳٫۳۳	۰٫۳۲	۳۸	۲٫۶	۱۹٫۹
۳۴٫۴۸	۵٫۰۴	۳۷	۵٫۷۸	۳۳٫۳۸	۰٫۲۳	۵۴٫۶	۲٫۳۷	۲۶٫۹
۵۱٫۷۲	۴٫۴۴	۴۴٫۵	۵٫۲۲	۳۹٫۸	۰٫۱۸۷	۶۳٫۶	۲٫۱۷	۳۳٫۳
۶۰٫۳۴	۴٫۲۶	۴۶٫۷	۵٫۰۶	۴۱٫۷	۰٫۱۸	۶۵٫۲	۲٫۱	۳۵٫۴
۶۸٫۹۶	۴٫۲۴	۴۷	۵٫۱۳	۴۰٫۹	۰٫۱۸	۶۴٫۶	۲٫۰۱	۳۸
۷۷٫۵۸	۴٫۳۴	۴۵٫۷	۵٫۲	۴۰٫۲	۰٫۱۸	۶۴٫۳	۲	۳۹٫۵
۸۶٫۲۰	۴٫۴۲	۴۴٫۷	۵٫۲۲	۳۹٫۸	۰٫۱۸۵	۶۴٫۲	۱٫۹	۴۰٫۸
۹۴٫۸۲	۴٫۴۹	۴۳٫۷	۵٫۲۶	۳۹٫۳	۰٫۱۸۴	۶۴٫۱	۱٫۹۰	۴۱٫۵
۱۰۰	۴٫۵۰	۴۳٫۶۵	۵٫۲۶	۳۹٫۲۹	۰٫۱۸۴	۶۴٫۱۷	۱٫۸۹	۴۱٫۶

عملکرد می‌توان این نکته را در نظر گرفت که اگر در پاشنه و یا پنجه‌ی سدهای بتنی، تنش بیشتر از حد مجاز شود و این افزایش تنش، محدود به همین نقاط حساس باشد؛ می‌توان با افزودن یک زائده‌ی بتنی به نام ماهیچه مقدار تنش را به حد مجاز کاهش داد. در صورتی که میراگر لاستیکی در بیشتر نقاط بدنه‌ی سد، اثر قابل توجهی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد دارد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل، عملکرد مناسب میراگر لاستیکی را در کاهش تنش اصلی کششی وارده بر بدنه‌ی سد نسبت به ماهیچه‌ی بتنی در بیشتر نقاط پاشنه‌ی سد نشان داد. در ادامه، به منظور نشان دادن تأثیر ارتفاع میراگر لاستیکی در عملکرد لرزه‌یی مدل از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو استفاده شد. برای آنالیز لرزه‌یی، مؤلفه‌های افقی و قائم زمین لرزه‌های امپریال‌ولی-۲ ۰، سن‌فرناندو و نورثریج-۰۱ به مدل اعمال شد. با استفاده از نتایج حاصل از آنالیز احتمالاتی مدل که حساسیت پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد را نسبت به ارتفاع میراگر

لاستیکی نشان می‌دهد، محدوده‌ی مناسبی از ارتفاع میراگر لاستیکی برای استفاده‌ی بهینه از آن استخراج شد. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که ارتفاع مناسب میراگر لاستیکی به لحاظ عملکرد و هزینه در حدود ۶۰٪ ارتفاع مخزن است.

در خاتمه می‌توان گفت که عملکرد مناسب میراگر لاستیکی، نشان‌دهنده‌ی اثر قابل توجه اندرکنش سد ـ مخزن بر روی پاسخ‌های لرزه‌یی وارده بر سد است. بنابراین در سازه‌های آسیب‌دیده و قدیمی که اندرکنش سیال ـ سازه در طراحی آن‌ها در نظر گرفته نشده است، استفاده از میراگر لاستیکی می‌تواند با کنترل آثار اندرکنش، ایمنی سازه را هنگام وقوع زمین‌لرزه در برابر نیروهای هیدرودینامیکی تأمین کند. با توجه به عملکرد مناسب تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو در ارزیابی دقیق تأثیر ارتفاع میراگر لاستیکی در پاسخ‌های اعمالی بر سد، روش مذکور می‌تواند ابزاری مفید جهت طراحی بهینه و ایمن از طریق انتخاب ارتفاع مناسب برای میراگر و شناخت آثار پارامترهای مختلف در عملکرد لرزه‌یی سد بتنی وزنی همراه با درنظر گرفتن ملاحظات اقتصادی باشد.

پانوشت‌ها

1. fillet
2. jinping
3. El Centro
4. pain flat
5. San Fernando
6. Pyroshuk
7. Matlab
8. Northridge-01
9. Imperial Valley-02

منابع (References)

1. Hall, J.F. and Bahaa E. "Hydrodynamic isolation of concrete dams", *Proceeding of the Seismic Eng. Struct. Congress*, pp. 307-316 (1989).
2. Hall, J.F., Dowling, J.M. and El-Aidi, B. "Defensive earthquake design of concrete gravity dams", *Int. J. of Dam Engineering*, **3**(4), pp. 249-263 (1992).
3. Hatami, K. and Ghobarah, A. "Reduction of the seismic response of concrete gravity dams using hydrodynamics isolation", *7th. Conf. on Earthq. Eng.*, Canadian, pp. 333-340 (1995).
4. Zhang, S.J., Chen, J., Zhang, Y.Z. and et al. "Research of air-cushion isolation effects on high arch dam reservoir", *Int. J. of Mechanica Sinica.*, **27**(5), pp. 675-686 (2011).
5. Mirzabozorg, H., Lamea, M. and Sehhat, H. "Hydrodynamic isolation and 3D seismic response of concrete arch dams", *Int. J. of Dam Engineering.*, **22**(3), p. 227-250 (2012).
6. Pirooznia, A. and Khiavi, M P. "Investigation of the effect of isolation layer on reduction of seismic response of concrete gravity dams considering interaction effects", *Modares Civil Engineering Journal*, **15**(4), pp. 127-136 (In Persian) (2016).
7. Kucukarslan, S., Coskun, S.B. and Taskan, B. "Transient analysis of dam-reservoir interaction including the reservoir bottom effects", *Journal of Fluids and Structures*, **20**(8), pp. 1073-1084 (2005).
8. Fenves, G. and Chopra, A.K. "Effects of reservoir bottom absorption on earthquake response of concrete gravity dams", *Journal of Earthquake engineering and structural dynamics*, **11**(6), pp. 809-829 (1983).
9. Lokke, A. and Chopra, A.K. "Response spectrum analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation interaction", *Journal of Structural Engineering*, **141**(8), pp. 04014202 (2014).
10. Ghaemian, M. and Ghobarah, A. "Staggered solution schemes for dam-reservoir interaction", *Journal of Fluid and Structures*, **12**(7), pp. 933-948 (1998).
11. Hatami, K. "Effect of reservoir boundaries on the seismic response of gravity dams", Ph.D. Dissertation, Mc Master University, Canada (1997).
12. Fairbairn, E., Dubeux, V., Paz, C. and et al. "Application of probabilistic approch to the analysis of gravity dam centrifuge tests", 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability (2000).
13. Kostov, M., Boncheva, H., Stefanov, D. and et al. "Seismic risk assessment of large concrete gravity dams", *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris In (1998).
14. Yanmaz, A.M. and Beser, M.R. "On the reliability-based safety analysis of the Porsuk dam", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, **29**(5), pp. 309-320 (2005).
15. Rohaninejad, M. and Zarghami, M. "Combining Monte Carlo and finite difference methods for effective simulation of dam behavior", *Advances in Engineering Software*, **45**(1), pp. 197-202 (2012).
16. Altarejos-Garcia, L., Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A. and et al. "Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis", *Structural Safety*, **36-37**, pp. 1-13 (2012).
17. Feng, G., Ma, C., Zheng, D.J. and et al. "The application of Matlab-based Monte Carlo method in hydraulic structures reliability", *In Applied Mechanics and Materials*, **351**, pp. 1576-1580 (2013).
18. Mirzabozorg, H., Akbari, M. and Hariri-Ardebili, M.A. "Nonlinear seismic response of a concrete arch dam to spatially varying earthquake ground motions", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, **14**(6), pp. 859-879 (2013).

19. Alembagheri, M. and Seyedkazemi, M. "Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **44**(1), pp. 41-58 (2015).

20. Pasbani Khiavi, M. "Investigation of the effect of reservoir bottom absorption on seismic performance of concrete gravity dams using sensitivity analysis", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, **20**(5), pp. 1977-1986 (2015).

21. Pasbani Khiavi, M. "Investigation of seismic performance of concrete gravity dams using probabilistic analysis", *GRADEVINAR*, **69**(1), pp. 21-29 (2017).

22. Chiti, H., Khatibinia, M., Akbarpour, A. and et al. "Reliability-based design optimization of concrete gravity dams using subset simulation", *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, **6**(3), pp. 329-348 (2016).

23. Rubinstein, R.Y. and Kroese, D.P., *Simulation and The Monte Carlo Method*, John Wiley and Sons. Inc. Publication (1981).