

Sensitivity Analysis of Seismic Performance of Roller Compacted Concrete Dam to Body Stiffness using Monte Carlo Method

Majid Pasbani Khiavi¹, Mohammad Jalali Minaabad^{2*}

1- Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2 -M.Sc. Graduated Student, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In this research, consider to the importance of the effect of concrete strength on dynamic behavior of concrete dams, the effect of body concrete stiffness on seismic performance of roller compacted concrete (RCC) dams is investigated using Monte Carlo simulation which is the effective method for evaluation of different parameters on dynamic responses. For implementation of concrete stiffness, the modulus of elasticity is considered as input parameter and its effect on output parameters including maximum response of dam crest displacement, 1st principle stress at heel, 3rd principle stress at toe and hydrodynamic pressure at heel of dam selected as critical responses is investigated. Ansys software, based on finite element method, was selected for dam modeling and seismic analysis and Nemark method has been used to solve the dynamic equation. Watana dam has been selected as case study and has been modeled in the 2-dimensional form and dam-reservoir-foundation interaction considered in model. Finally, to show the effect of modulus of elasticity of dam concrete, the responses were obtained as sensitivity curves. Obtained curves show the trend of responses to variation of modulus of elasticity obviously. According to results, one can select the optimum value of modulus of elasticity of concrete and concluded about the safety of dam consider to design criteria.

ARTICLE INFO

Receive Date: 31 December 2020

Revise Date: 21 February 2021

Accept Date: 30 May 2021

Keywords:

Roller compacted concrete dam
Stiffness
Monte Carlo
Finite Element
Interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.265167.2323>

*Corresponding author: Majid Pasbani Khiavi

Email address: pasbani@uma.ac.ir

تحلیل حساسیت رفتار لرزه‌ای سد بتن غلتکی نسبت به سختی بدنه با روش مونت کارلو

مجید پاسبانی خیاوی^{۱*}، محمد جلالی میناآباد^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

در این تحقیق با توجه به اهمیت تاثیر مقاومت بتن بر عملکرد دینامیکی سدهای بتنی، به بررسی تاثیر سختی بتن بدنه بر نمایش لرزه‌ای سد بتن غلتکی (RCC) با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو که روشی مؤثر برای شناخت اثر پارامترهای مختلف بر رفتار دینامیکی می‌باشد، پرداخته می‌شود. برای بیان سختی سد، مدول الاستیسیته بتن بدنه به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شده و تاثیر آن بر پارامترهای خروجی بررسی می‌شود. پارامترهای خروجی شامل مقادیر حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد، تنش کششی اصلی در پاشنه، تنش فشاری اصلی در پنجه و فشار هیدرودینامیکی در پاشنه می‌باشد که به عنوان پاسخ‌های بحرانی انتخاب شده‌اند. برای مدل‌سازی و تحلیل از نرم افزار انسیس که مبتنی بر روش اجزای محدود می‌باشد، استفاده شده و برای حل معادلات دینامیکی از روش نیومارک استفاده شده است. به عنوان مطالعه موردی، سد واتانا به صورت دوبعدی مدل شده و اندرکنش بین سد، مخزن و فونداسیون در مدل اعمال شده است. در انتها نیز نمایش تاثیر مدول الاستیسیته بتن سد، مقادیر حداکثر پاسخ‌ها در هر مرحله به صورت منحنی‌های حساسیت ارائه شده است. با بررسی نتایج حاصل می‌توان به خوبی تاثیر سختی بتن بدنه سد را بر پاسخ‌ها مشاهده نمود و با توجه به معیار طراحی، وضعیت ایمنی سد را بررسی کرده و حالت بهینه را به لحاظ مقاومت سازه‌ای برای مدل مورد نظر انتخاب کرد.

کلمات کلیدی: سد بتن غلتکی، سختی، مونت کارلو، اجزای محدود، اندرکنش

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.265167.2323	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.265167.2323	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۴۰۰/۰۳/۰۹	۱۳۹۹/۱۲/۰۳	۱۳۹۹/۱۰/۱۱
مجید پاسبانی خیاوی					*نویسنده مسئول:	
pasbani@uma.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته ساخت سد بتن غلتکی (RCC) در صنعت سدسازی تحول ایجاد کرد. اهدافی هم‌چون سرعت بالای ساخت و نیز اقتصادی بودن طرح باعث گردید که این گونه سازه‌ها در کانون توجه مهندسان قرار گیرد. استفاده از بتن غلتکی روشی نوین برای ساخت اقتصادی سازه‌های حجیم از جمله سدهای بتنی وزنی می‌باشد. در این نوع بتن از ترکیب مشخصه‌های بتن و خاک استفاده شده است که در آن برای حمل، پخش و تراکم از ماشین آلات ساخت سدهای خاکی و راه‌سازی استفاده می‌شود. بنابراین بتن‌ریزی سریع‌تر و زمان ساخت و هزینه اجرا به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به همین منظور طراحی و تحلیل مناسب از این سدها امری ضروری می‌باشد. برآورد پاسخ لرزه‌ای سدهای RCC تحت شتاب زلزله یک مشکل پیچیده‌ای بوده و عوامل متعددی نظیر اثرات متقابل سد و مخزن در این زمینه موثر می‌باشند. به همین دلیل، محققان برای برآورد پاسخ مناسب روش‌های مختلفی را در پیش گرفتند.

در زمینه تحقیق در مورد رفتار لرزه‌ای سد بتن غلتکی چوهان و همکاران در سال ۲۰۰۲ نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بتن غلتکی و تحلیل شکست غیرخطی سدهای بتن غلتکی را ارائه نمودند. در این تحقیق نمونه‌هایی از بتن غلتکی مصرفی در ساخت سد لانگتان^۱ در چین تهیه شد. با انجام آزمایش بر روی آنها، پارامترهای غیرخطی مورد نیاز و منحنی تنش-کرنش در کشش جهت استفاده در تحلیل غیرخطی بدست آمد. بزرگ‌ترین بلوک سد با معیار شکست غیرخطی و گسیختگی فشار-برش تحت تحلیل لرزه‌ای غیرخطی قرار گرفت [۱]. نتایج حاصل، ترک‌های به وجود آمده در مناطق مربوط به پنجه‌ی سد و قسمت‌های فوقانی در محل تغییر شیب بدنه در پایین دست سد و گسترش آن تا سطح بالادست را نشان داده است.

زوهویی در سال ۲۰۰۴ مدل عددی برای شبیه‌سازی رفتار بتن سدهای بتن غلتکی را ارائه نمود که در آن روابط تنش-کرنش با ساختار چند لایه‌ای جهت توصیف رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک، مدل شده است. به عنوان نمونه‌ی عملی، مدل اجزای محدود سد لانگتان با چهار طرح اختلاط مختلف از بتن غلتکی با خواص مقاومتی متفاوت در قسمت‌های مختلف بدنه، تحلیل شد. مطالعه‌ی آنها از آن‌جا که برای نواحی بالایی مقطع سد در قسمت بالادست، بتنی با خاصیت ایزوتروپیک و در قسمت پایین دست آن بتن غلتکی با خاصیت غیرایزوتروپیک در نظر گرفته شده، در نتیجه در کانتور تنش محاسبه شده بین این دو نوع ماده، ناپیوستگی ایجاد شد. بنابراین جهت حل این مشکل، میانگین این تنش‌ها در دو طرف فصل مشترک جهت ارائه جواب واحد در آن نقاط مشترک ارائه گردید [۲].

یکی از روش‌های طراحی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و تحلیل حساسیت، طراحی بر اساس احتمالات و در نظر گرفتن یک محدوده متغیر برای پارامترهای طراحی می‌باشد. با استفاده از نتایج احتمالاتی می‌توان به برآورد دقیقی از پاسخ لرزه‌ای و ظرفیت سازه دست یافت [۳]. دو منبع مهم برای بروز عدم قطعیت در عملکرد لرزه‌ای سازه وجود دارد: (الف) پدیده تصادفی بودن، (ب) عدم قطعیت فیزیکی ناشی از فرضیات مدل‌سازی، حذفیات یا خطاهای موجود [۴]. برای بررسی ساختار عدم قطعیت با استفاده از تحلیل احتمالاتی لازم است درک کافی در مورد پاسخ‌های قابل انتظار سازه وجود داشته باشد [۵].

محاسبه انواع مختلف عملکرد لرزه‌ای سازه با توجه به عدم قطعیت فیزیکی معمولاً با استفاده از عوامل ایمنی و یا معیار پراکندگی استاندارد انجام می‌شود. یک روش بسیار قوی با توجه به هر دو منبع از عدم قطعیت در مهندسی سازه انجام تحلیل احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو است. تجزیه و تحلیل احتمالاتی نیاز به اطلاعات بیشتر از تجزیه و تحلیل قطعی دارد [۶-۸]. برای محدود کردن پارامترهای مورد نیاز و به دست آوردن شیوه مناسب برای عملکرد لرزه‌ای مدل، پژوهش‌های زیادی انجام شده است [۹-۱۱]. با این حال، این تلاش تا حدی در مورد سدهای بتنی انجام شده است. پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی که در میان زیر ساخت‌های بزرگ قرار دارند را می‌توان تحت تاثیر حضور عدم قطعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. گارسیا و همکاران احتمال شکست سد بتنی وزنی را با نظر گرفتن شکست لغزشی تحت بارگذاری هیدرولیکی مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. کارواخال و همکاران نیز یک روش احتمالاتی برای ارزیابی بارهای هیدرولیکی و مقاومت برشی بتن غلتکی فشرده (RCC) در سدهای وزنی پیشنهاد دادند [۱۳]. در ادامه تحقیقات در زمینه تحلیل احتمالاتی و حساسیت، پاسبانی‌خیوای به بررسی تاثیر ضریب جذب کف در آنالیز لرزه‌ای سد بتنی وزنی پرداخته است که در مدل وی،

تاثیر جذب کف بر روی پاسخ‌های بحرانی، به صورت منحنی‌های حساسیت خطی و دو خطی بدست آمده است [۱۴]. فیضی و همکاران نیز با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو، تاثیر سختی بتن بدنه و فونداسیون مخازن هوایی رشت را بر نمایش لرزه‌ای بررسی کرده و منحنی‌های حساسیت را برای این منظور استخراج کردند. با توجه به منحنی‌های حساسیت ارائه شده می‌توان مقدار بهینه‌ای را برای مدول الاستیسیته بتن بدنه انتخاب کرد [۱۵]. پاسبانی‌خیای و رحمتی از قابلیت روش احتمالاتی مونت کارلو با نمونه‌برداری مکعب لاتین استفاده کرده و تاثیر ارتفاع مخزن سد را بر پاسخ دینامیکی سد بتنی وزنی بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق آنها اثر قابل توجه اندرکنش سد و مخزن را بخصوص در ارتفاع‌های بالا بر نمایش لرزه‌ای سد نشان می‌دهد [۱۶]. پاسبانی‌خیای و همکاران از قابلیت تحلیل احتمالاتی مونت کارلو برای بررسی تاثیر طول مخزن بر نمایش لرزه‌ای سد بتنی وزنی نیز استفاده کرده و روند تغییرات پاسخ‌ها را با توجه به اثرات طول مخزن بررسی کردند [۱۷]. در ادامه تحقیقات، پاسبانی‌خیای و همکاران برای بهینه‌سازی لرزه‌ای سد بتنی وزنی با استفاده میراگر لاستیکی در بالادست از روش احتمالاتی مونت کارلو با نمونه‌برداری مکعب لاتین استفاده کردند. آنها با استفاده از تحلیل حساسیت و بررسی عدم قطعیت، ابعاد بهینه میراگر لاستیکی را جهت کنترل فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن به دست آوردند [۱۸].

هدف مطالعه حاضر، با توجه پیچیدگی‌های موجود و اهمیت بالای طراحی سدها، برآورد مناسب از تحلیل لرزه‌ای سد بتن غلتکی مورد نظر با استفاده از روش احتمالاتی می‌باشد. این روش به خوبی تاثیر پارامترهای مهم و تاثیرگذار را در طراحی و تحلیل سازه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت بتن‌ریزی و تاثیر مقاومت بتن بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی غلتکی در هنگام وقوع زلزله، در این تحقیق با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو که روشی مؤثر برای شناخت اثر پارامترهای مختلف بر پاسخ‌های خروجی می‌باشد، به بررسی تأثیر مدول الاستیسیته بتن بدنه بر عملکرد لرزه‌ای سد بتن غلتکی و ارزیابی پاسخ‌ها برای رسیدن به مقدار بهینه سختی بدنه، پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که در سدهای بتن غلتکی به دلیل نحوه اجرا تغییرات مدول الاستیسیته بتن می‌تواند زیاد باشد و با توجه به نتایج به دست آمده، با تغییر مدول الاستیسیته در لایه‌ها می‌توان طرح را بهینه‌سازی اقتصادی کرد، به همین دلیل سد بتن غلتکی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است.

۲- تحلیل احتمالاتی مونت کارلو

عدم قطعیت‌ها در علوم مهندسی ناشی از فرضیات یا خطاهای مدل و یا تفاوت‌های بارهای ورودی است. یک فرض عملی برای این رفتار انجام تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در چارچوب روش‌های احتمالاتی و رخدادهای تصادفی است. برای گسترش پارامترهای عدم قطعیت به عملکرد واقعی سدها، روش‌های طراحی احتمالاتی به کار گرفته می‌شود. در انجام طراحی احتمالاتی، روش‌های مختلفی وجود دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به روش شبیه‌سازی مونت کارلو اشاره کرد که یکی از کامل‌ترین روش‌ها می‌باشد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو شامل یک دسته از الگوریتم‌های محاسباتی می‌باشد و مبتنی بر تکرار تصادفی نمونه‌ها می‌باشد و به طور وسیعی و در اشکال مختلف برای شبیه‌سازی پدیده‌ها در علوم مختلف به کار می‌رود.

با توجه به مطالعات انجام شده، کاربرد وسیع استفاده از آنالیز احتمالاتی مونت کارلو، با فرض عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن ویژگی مواد، هندسه و بارگذاری، بیشتر در زمینه تحلیل عدم قطعیت سازه‌ها بوده است. از این‌رو علاوه بر کاربرد آنالیز احتمالاتی مونت کارلو در مسائل مربوط به عدم قطعیت، امروزه به‌کارگیری این ابزار در عرصه‌ی علوم مختلف از جمله در زمینه بهینه‌سازی سازه‌ها عمومیت بیشتری یافته است.

روش مونت کارلو که معمول‌ترین روش در یک آنالیز احتمالاتی می‌باشد به دو بخش روش مستقیم شبیه‌سازی و روش نمونه برداری مکعبی لاتین تقسیم بندی می‌شود. روش شبیه‌سازی نمونه برداری مکعبی لاتین یک رویکرد آماری برای تولید یک نمونه از مجموعه‌های قابل قبول از مقادیر پارامتر یک توزیع چند بعدی است که معمولاً برای کاهش تعداد تکرارهای لازم برای شبیه‌سازی مونت کارلو به کار می‌رود تا به توزیع تصادفی دقیقی برسد.

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و آنالیز احتمالاتی مونت کارلو به عنوان روشی مناسب برای بهینه‌سازی، به بررسی حساسیت لرزه‌ای سد بتنی وزنی نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بتن بدنه، پرداخته می‌شود. نرم‌افزار ANSYS بر اساس روش اجزای محدود بوده و قابلیت تحلیل لرزه‌ای و مدل‌سازی احتمالاتی مونت کارلو را دارا می‌باشد. در تحلیل احتمالاتی مونت کارلو از روش نمونه‌برداری

مکعبی لاتین (Latin Hypercube Sampling)، و همچنین برای تابع توزیع آماری متغیرهای تعیین شده و ورودی، از روش توزیع یکنواخت (Uniform) استفاده شده است.

۳- معادلات حاکم

- در این قسمت، با توجه به شرایطی که از لحاظ هیدرودینامیکی بر رفتار سد حاکم است، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:
- با توجه به این که هدف اصلی تحقیق، نشان دهنده کاربرد مدل احتمالاتی در بررسی رفتار لرزه‌ای سد، تحلیل حساسیت پارامترها و آرایه مدل بهینه می‌باشد و با توجه به تلاش محاسباتی بالا در این زمینه، برای مصالح بدنه سد رفتار خطی فرض شده است، ولی بعد از انتخاب حالت بهینه می‌توان نتایج حاصل را به رفتار غیر خطی تعمیم داد.
 - با توجه به شرایط حاکم بر مسئله، آب مخزن به صورت غیر چرخشی، غیر لزج و تراکم‌پذیر فرض شده و تغییر مکان‌های آن کوچک در نظر گرفته می‌شود. همچنین از اثرات امواج وزنی در سطح آزاد صرف نظر شده و فشار در سطح سیال برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.
 - تحلیل به صورت تاریخچه زمانی انجام گرفته و برای حل معادلات دینامیکی از روش نیومارک استفاده می‌شود.
 - برای بیان رفتار دو بعدی سد بتن غلتکی، از مدل تنش مسطح استفاده می‌شود.

۴- مدل سازی دامنه سد

معادله‌ی حاکم بر رفتار سدها، معادله حرکت می‌باشد، ولی برای در نظر گرفتن نیروی ناشی از اندرکنش سیال و سازه، بار اعمال شده ناشی از فشار هیدرودینامیکی آب در محل تماس سد و مخزن باید به معادلات سازه افزوده شود.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{F}^{Pr} \quad (1)$$

در رابطه فوق، \mathbf{M} ماتریس جرم، \mathbf{C} ماتریس میرایی و \mathbf{K} ماتریس سختی سازه می‌باشد. \mathbf{u} بردار تغییر مکان نسبی و $\ddot{\mathbf{u}}_g$ بردار شتاب زمین می‌باشد. \mathbf{F}^{Pr} نیروی هیدرودینامیکی وارد شده از طرف مخزن بر سد در محل تماس می‌باشد.

۵- مدل سازی دامنه مخزن

در مسائل مربوط به اندرکنش آکوستیکی سازه و سیال، معادله دینامیکی سازه لازم است همراه با معادلات اندازه حرکت و پیوستگی سیال در نظر گرفته شود. با فرض اینکه آب داخل مخزن غیر لزج، تراکم ناپذیر و با تغییر مکان‌های کوچک است، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت سیال به معادله موج خلاصه می‌شوند.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

در رابطه قبل $c = \sqrt{k/\rho_0}$ سرعت امواج صوتی در سیال، ρ_0 جرم مخصوص سیال، k مدول سختی سیال، P فشار هیدرودینامیکی و t زمان می‌باشد.

۶- مدل فونداسیون

در این تحقیق، برای مدل سازی فونداسیون از مدل فونداسیون بدون جرم استفاده شده است. در مدل فونداسیون ساده بدون جرم، انعطاف پذیری سنگ فونداسیون لحاظ شده، ولی از اثرات اینرسی و میرایی صرف نظر شده حل شود. اندازه مدل فونداسیون بدون جرم لازم

نیست خیلی بزرگ باشد و فقط کافی است تخمین قابل قبولی برای انعطاف پذیری بستر سنگ پی فراهم کند [۱۹]. معمولاً یک مدل فونداسیون که به اندازه ارتفاع سد در بالا دست، پایین دست و در جهت عمق گسترش یافته است، می تواند این شرایط را تامین کند. مدل فونداسیون بدون جرم، همچنین اجازه می دهد که حرکت زلزله ثبت شده در سطح زمین به طور مستقیم، در مرزهای ثابت مدل فونداسیون به کار برده شود. این امر به این دلیل است که در غیاب انتشار موج، حرکات مرزهای ثابت بدون هیچ گونه تغییری به پی سد انتقال داده شود.

۷- شرایط مرزی

در سطح آزاد مخزن از اثرات امواج سطحی صرف نظر می شود. بنابراین:

$$P = 0 \quad (3)$$

در محل تماس مخزن با سد و با فونداسیون، شرط مرزی اندرکنش به صورت زیر اعمال می شود:

$$\rho \vec{a}_{ns} = -\frac{\partial P}{\partial n} \quad (4)$$

که در آن \vec{a}_{ns} بردار شتاب سد یا فونداسیون در مرز مشترک با مخزن و n بردار واحد عمود بر سطح تماس مخزن با سد یا فونداسیون و به سمت داخل مخزن می باشد.

در انتهای دوردست مخزن از شرط مرزی استهلاک سامرفلد استفاده می شود که بیان آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{C} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (5)$$

در رابطه‌ی فوق C سرعت انتشار امواج می باشد.

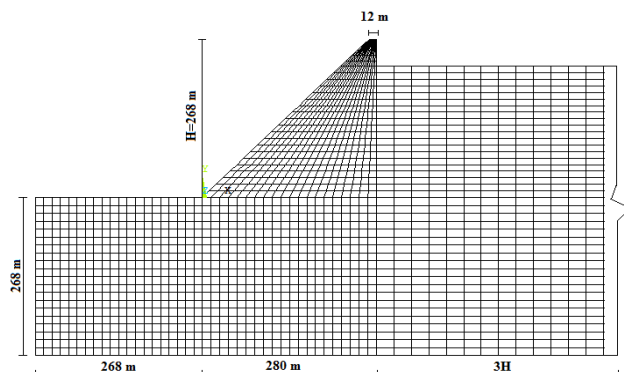
۸- فرمول بندی اجزای محدود معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم سد-مخزن-فونداسیون با استفاده از روش اجزای محدود به صورت ماتریسی بسط داده می شوند. معادله دینامیکی گسسته سازی شده سیستم سد می تواند با استفاده از عناصر سازه‌ای فرمول بندی شود. برای اعمال اثرات اندرکنش لازم است بار فشاری اعمال شده از طرف سیال بر روی سازه به فرمول بندی اضافه شود. ماتریس‌های عناصر مخزن نیز با گسسته سازی معادله موج استخراج می شوند. در استخراج ماتریس‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌ها به صورت مشتقات مرتبه اول و دوم تغییر مکان‌ها بسط داده می شوند [۲۰]. معادلات گسسته سازی شده به صورت هم زمان یا با استفاده از روش تکراری سعی و خطا حل شده و نتایج مورد نظر برای سیستم به دست می آید [۲۱ و ۲۲]. جزئیات فرمول بندی در راهنمای نرم افزار ارائه شده است.

۹- معرفی مدل

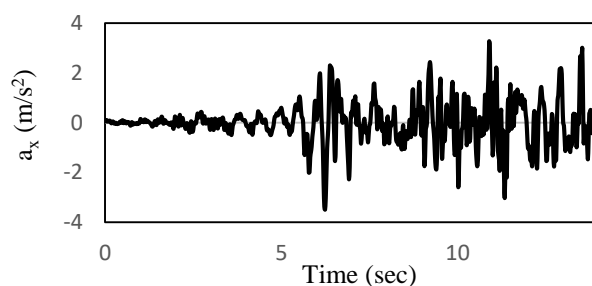
در این مقاله مدل دو بعدی سد بتن غلتکی واتانا^۲ به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. مدول الاستیسیته، وزن واحد حجم و ضریب پواسون بتن سازه به ترتیب ۲۵ گیگا پاسکال، ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۲۵ و مدول الاستیسیته فونداسیون ۳۷ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۰ می باشد. لازم به ذکر است که برای فونداسیون از مدل فونداسیون بدون جرم استفاده شده است. سرعت امواج فشاری در آب نیز ۱۴۴۰ متر بر ثانیه و چگالی آن ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است. برای مدل اجزای محدود، طول مخزن سه برابر ارتفاع سد و ارتفاع پی نیز به اندازه‌ی یک برابر ارتفاع سازه سد انتخاب شده است. برای مرز دوردست مخزن از شرط مرزی سامرفلد استفاده شده و گام زمانی برابر $\Delta t = 0.02$ ثانیه در نظر گرفته شده است. برای گسسته سازی دامنه سد و فونداسیون از المان PLANE 183 و برای مخزن از المان Fluid 29 که عنصر مناسب برای نمایش خاصیت تراکم پذیری آب است، استفاده

شده است [۲۱]. مشخصات هندسی و گسسته‌سازی اجزای محدود مدل مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن کلیه ابعاد به متر می باشد.

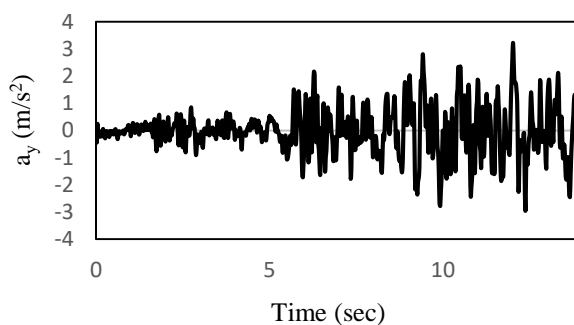


شکل ۱: هندسه مدل سد و گسسته سازی اجزای محدود

برای انجام تحلیل دینامیکی و بررسی عملکرد لرزه‌ای سد بتن غلتکی مورد مطالعه، با توجه به قابلیت نرم‌افزار ANSYS شتاب‌نگاشت‌های افقی و عمودی زمین‌لرزه منجیل که در سال ۱۹۹۰ میلادی در منطقه منجیل در کشور ایران رخ داده است، به کل بدنه سیستم در امتداد مخزن و راستای قائم اعمال شده است. شتاب‌نگاشت افقی و قائم ثبت شده از این زلزله به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: شتاب‌نگاشت افقی زلزله منجیل



شکل ۳: شتاب‌نگاشت قائم زلزله منجیل

در این مطالعه، برای بررسی تاثیر سختی بتن بدنه در تحلیل احتمالاتی پارامتر مدول الاستیسیته بتن سد به عنوان متغیر ورودی انتخاب شده است. با استفاده از روش مونت کارلو و نمونه برداری مکعبی لاتین، مدل مورد نظر مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج مربوط به تحلیل احتمالاتی و حساسیت ارائه شده است.

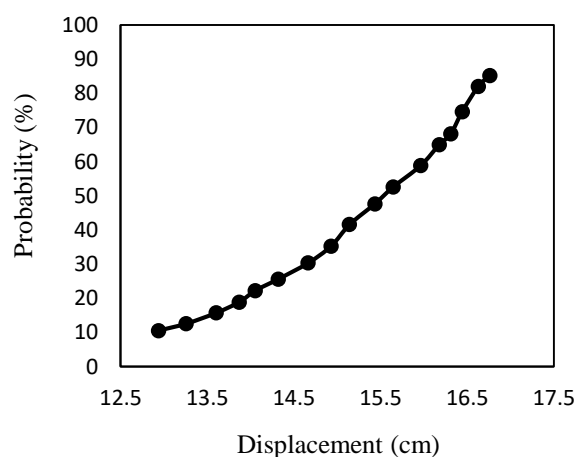
در تحلیل احتمالاتی مونت کارلو تعداد شبیه سازی های مورد نیاز باید به اندازه ای باشد که مقدار متوسط متغیرهای خروجی با توجه به تعداد شبیه سازی ها به همگرایی مناسب رسیده باشد، لذا تنظیمات صورت گرفته در نرم افزار ANSYS به منظور تحلیل احتمالاتی مونت کارلو مطابق جدول ۱ انتخاب شده است:

جدول ۱: تنظیمات تحلیل احتمالاتی مونت کارلو در نرم افزار ANSYS

متغیر تصادفی	نوع توزیع	تعداد حلقه شبیه سازی	تعداد تکرار
مدول الاستیسیته بتن	یکنواخت	۱۵ تا ۲۲	۲

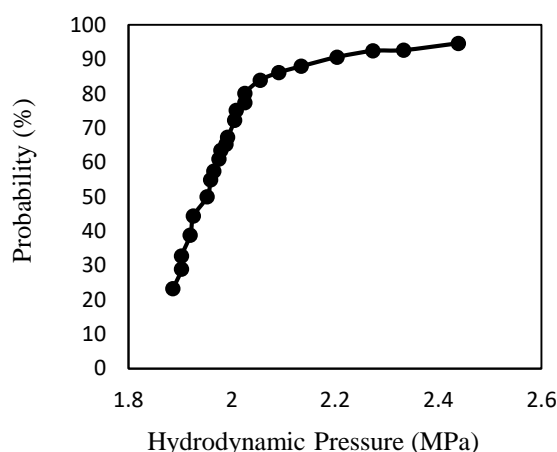
۱۰- نتایج تحلیل

پس از تحلیل مدل، با استفاده از منحنی های احتمالاتی و حساسیت روند تغییرات پاسخها نشان داده شده است. شکل ۴ احتمال رخ دادن مقادیر مختلف جابجایی در تاج سد را نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بتن نمایش می دهد. همان طور که ملاحظه می شود احتمال اینکه تغییر مکان تاج سد بیشتر از ۱۶/۵ سانتی متر باشد، ناچیز است.



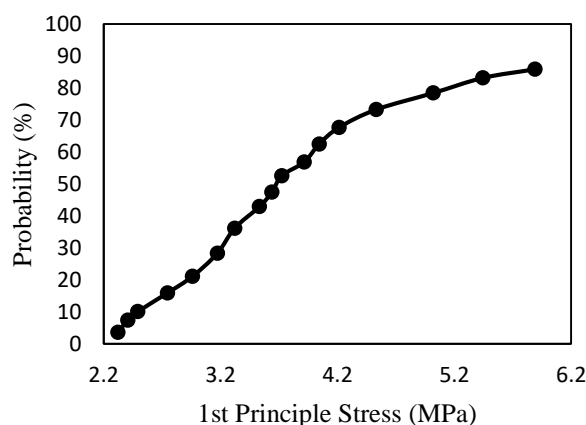
شکل ۴: روند تغییرات احتمالی مقدار حداکثر جابجایی تاج سد نسبت به افزایش مدول الاستیسیته بتن بدنه

در شکل ۵ حساسیت فشار هیدرودینامیکی حداکثر در پاشنه سد نسبت به تغییر مدول الاستیسیته به روشنی نشان داده شده و احتمال رخ دادن هر کدام مشخص شده است. با توجه به منحنی می توان دریافت که برای دامنه انتخاب شده مدول الاستیسیته، احتمال رسیدن فشار هیدرودینامیکی تا مقدار ۱/۹ مگاپاسکال زیاد و برای مقادیر بیشتر از آن کم می باشد. نمودار تغییرات به صورت دو خطی می باشد که در ابتدا با شیب تند و سپس با شیب ملایم تغییر می کند.



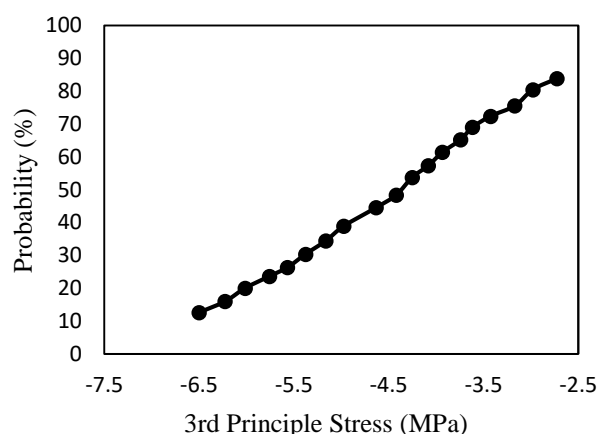
شکل ۵: روند تغییرات احتمالی فشار هیدرودینامیکی حداکثر نسبت به افزایش مدول الاستیسیته بتن بدنه

در ادامه، در شکل ۶ احتمال به وجود آمدن مقادیر مختلف تنش اصلی اول حداکثر (تنش کششی) در پاشنه، برای دامنه انتخاب شده مدول الاستیسیته نمایش داده شده است. تغییرات احتمالاتی تنش کششی نسبت به تغییر مدول الاستیسیته در ابتدا با شیب نسبتاً تند و سپس با شیب کمتر ادامه می‌یابد.



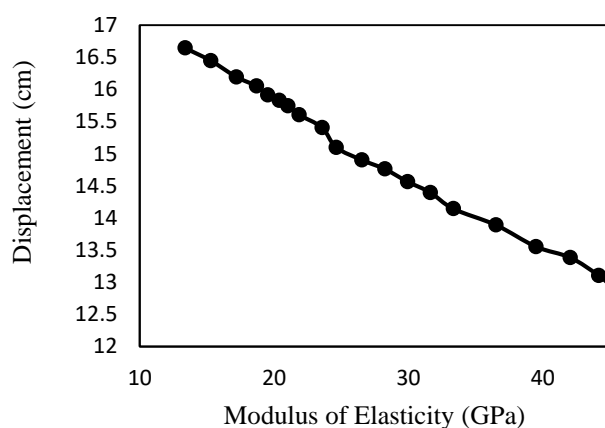
شکل ۶: روند تغییرات احتمالی تنش اصلی کششی در پاشنه سد نسبت به افزایش مدول الاستیسیته بتن بدنه

در شکل ۷ نیز تغییرات تنش اصلی سوم حداکثر (تنش فشاری) با تغییرات مدول الاستیسیته ارائه شده و درصد احتمال رسیدن به تنش‌ها برای دامنه انتخاب شده برای مدول الاستیسیته بتن سد مشخص شده است. شکل ۷ توزیع تقریباً خطی را برای تغییرات تنش فشاری نشان می‌دهد.



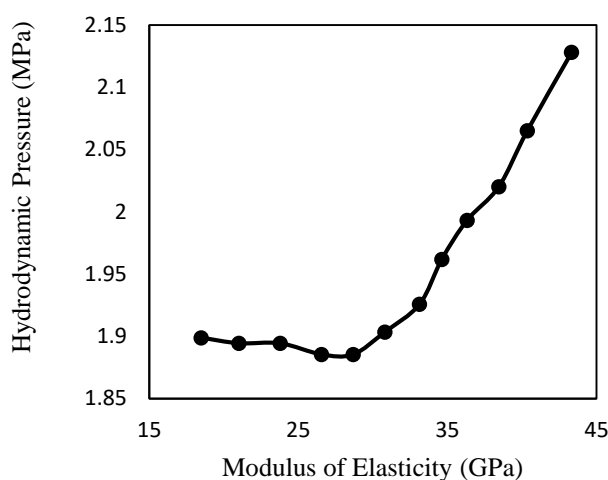
شکل ۷: روند تغییرات احتمالی تنش اصلی فشاری در پنجه سد نسبت به افزایش مدول الاستیسیته بتن بدنه

در ادامه برای درک بهتر حساسیت پارامترهای خروجی شامل مقادیر حداکثر تغییر مکان تاج سد، تنش اصلی کششی و فشاری و فشار هیدرودینامیکی نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بررسی شده و نتایج به صورت منحنی‌های شکل ۸ تا ۱۱ آورده شده است.



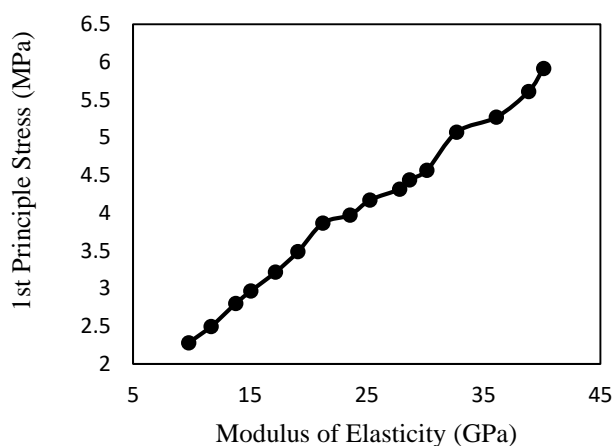
شکل ۸: روند تغییرات تغییر مکان تاج سد نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بتن بدنه

با توجه شکل ۸ و محدوده تغییرات مدول الاستیسیته بتن، جابجایی تاج سد در حدود ۱۳ الی ۱۶/۵ سانتی‌متر بدست آمده است که نشان می‌دهد مقاومت بتن سد تاثیر قابل توجهی در جابجایی ندارد. این تغییرات به صورت خطی با افزایش مدول الاستیسیته بتن کاهش می‌یابد. در واقع هر چقدر سازه سخت‌تر باشد، مقدار تغییر مکان کمتر می‌شود. در ادامه منحنی تغییرات فشار هیدرودینامیکی، برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته در شکل ۹ استخراج شده است.



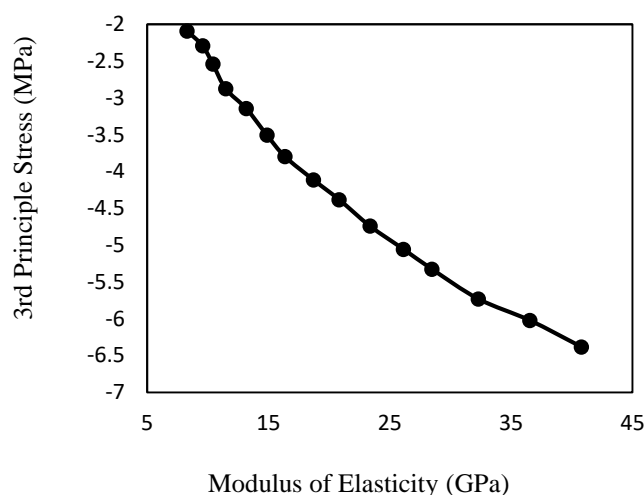
شکل ۹: روند تغییرات فشار هیدرو دینامیکی حداکثر در کف مخزن نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بتن بدنه

از شکل ۹ ملاحظه می‌شود تغییرات فشار هیدرو دینامیکی نسبت به مدول الاستیسیته برای مقادیر کمتر از ۳۰ مگاپاسکال تقریباً ثابت بوده و از یک محدوده به بعد به صورت خطی در حال افزایش می‌باشد. دلیل ثابت ماندن فشار هیدرو دینامیکی برای مقادیر کم مدول الاستیسیته را می‌توان به جذب امواج فشار هیدرو دینامیکی به علت نرمی بتن ربط داد.



شکل ۱۰: روند تغییرات تنش اصلی کششی در پاشنه سد نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بتن بدنه

شکل ۱۰ نیز حساسیت تنش اصلی کششی حداکثر نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته را با روند تقریباً خطی نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: روند تغییرات تنش اصلی فشاری در پنجه سد نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته بتن بدنه

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش مدول الاستیسیته بتن بدنه، مقدار تنش اصلی سوم (تنش فشاری) به صورت منحنی تقریباً دو خطی کاهش می‌یابد که شیب تغییرات برای مقادیر پایین‌تر مدول الاستیسیته، کمتر از مقادیر بالا می‌باشد. در خاتمه، شیب منحنی‌های مربوط به پاسخ متغیرهای خروجی به صورت مقادیر عددی در جدول ۲ آورده شده است که در آن E مدول الاستیسیته بتن بدنه سد بر حسب گیگاپاسکال و m شیب منحنی‌های پاسخ می‌باشد.

جدول ۲: شیب منحنی‌های پاسخ متغیرهای خروجی

پاسخ خروجی	دامنه تغییرات مدول الاستیسیته و شیب منحنی		شکل منحنی
	$17 < E \leq 29$ $m=0.000$	$29 < E < 43$ $m=0.015$	
Hydrodynamic Pressure	$17 < E \leq 29$ $m=0.000$	$29 < E < 43$ $m=0.015$	bilinear
3rd Principle Stress	$10 < E \leq 16$ $m= -0.300$	$16 \leq E < 43$ $m= -0.098$	bilinear
1st Principle Stress	$10 < E < 43$ $m=0.115$		linear
Displacement	$10 < E < 43$ $m=0.106$		linear

۱۱- نتیجه گیری

مدول الاستیسیته بتن که پارامتر نشان دهنده سختی و مقاومت بتن می‌باشد، نقش تعیین کننده‌ای در تحلیل و طراحی سدهای بتن غلتکی ایفا می‌کند. در این تحقیق با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو که روشی نوین برای مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت می‌باشد، به بررسی تأثیر مدول الاستیسیته بتن بدنه سد بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی پرداخته شد. برای این منظور، با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته به عنوان متغیر ورودی و استفاده از روش احتمالاتی پاسخ‌های بحرانی به صورت منحنی‌های احتمالاتی و حساسیت

استخراج شد. منحنی‌های به دست آمده، به خوبی روند تاثیر مدول الاستیسیته بتن را بر پاسخ های بحرانی نشان می دهد. نتایج حاصل نشان می دهد که منحنی تغییرات فشار هیدرودینامیکی و تنش اصلی فشاری با مدول الاستیسیته به صورت دوخطی و تغییر مکان افقی و تنش اصلی کششی به صورت خطی می باشد. با توجه به نتایج حاصل و با توجه به معیار طراحی انتخاب شده می توان وضعیت ایمنی سد را بررسی کرده و مقدار مناسبی را برای مدول الاستیسیته انتخاب کرد، به نحوی که هم مقدار انعطاف پذیری و هم مقاومت لرزه‌ای مناسب برای سیستم سد و مخزن تامین شود.

مراجع

- [1] Chuhan, Z., Guanglun, W., Shaomin, W., Yuexing, D. (2002). Experimental Tests of Rolled Compacted Concrete and Nonlinear Fracture Analysis of Rolled Compacted Concrete Dams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(2), 108-115.
- [2] Zuohui, P. (2004). Material Model of High Roller Compacted Concrete Dam. *Journal of Dam Engineering*, 12, 143-166.
- [3] Ghojarah A. (2001). Performance-based design in earthquake engineering: state of development. *Engineering Structures*, 23:878-884.
- [4] Dolsek, M. (2009). Incremental dynamic analysis with consideration of modeling uncertainties. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 38, 805-825.
- [5] Hwang, HHM., Jaw JW. (1990). Probabilistic damage analysis of structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116, 1992-2007.
- [6] USACE. (1995). *Gravity dam design*. United States Army Corps of Engineers, Engineering Manual 1110-2-2200.
- [7] Rubinstein, RY. (1981). *Simulation and the Monte Carlo Method*. John Wiley and Sons: New York.
- [8] Leclerc, M., Leger, P., Tinawi, R. (2001). *CADAM user's Manual*. Department of Civil, Geological and Mining Engineering. Ecole Polytechnique de Montreal, Quebec.
- [9] Luco, N., Cornell, CA. (2000). Effects of connection fractures on SMRF seismic drift demands. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126, 127-136.
- [10] Ibarra LF. Global collapse of frame structures under seismic excitations. PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2003.
- [11] Porter, KA. Beck, JL., Shaikhutdinov, RV. (2002). Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables. *Earthquake Spectra*, 18, 719-743.
- [12] Altarejos-Garcia L, Escuder-Bueno I, Serrano-Lombillo A. (2011). Estimation of the probability of failure of a gravity dam for the sliding failure mode. *11th ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Theme C, Valencia.
- [13] Carvajal, C., Peyras, L., Bacconnet, J., Becue, P. (2009). Probability modeling of shear strength parameters of RCC gravity dams for reliability analysis of structural safety. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13, 91-119.
- [14] Pasbani Khiavi, M. (2015). Investigation of the Effect of Reservoir Bottom Absorption on Seismic Performance of Concrete Gravity Dams using Sensitivity Analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20, 1977-1986.
- [15] Feizi, A., Pasbani Khiavi, M., Ramzi, L. (2019). Investigate the effect of foundation and tank concrete hardness on the seismic response of high tanks using probabilistic analysis. *Journal of structural and Construction Engineering*, 6(3), 89-104.
- [16] Pasbani Khiavi, P., Ghaed Rahmati, A. (2019). Probabilistic investigation of the effect of reservoir height on seismic performance of concrete gravity dams using Monte Carlo simulation. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(4), 263-277.
- [17] Pasbani Khiavi, M., Ghorbani, MA., Kuchaki, M. 2020. Evaluation of the effect of reservoir length on seismic behavior of concrete gravity dams using Monte Carlo method. *Numerical Methods in Civil Engineering Journal*, 5(1), 1-7.
- [18] Pasbani Khiavi, M., Ghorbani, MA., Ghaed Rahmati, A. 2020. Seismic Optimization of Concrete Gravity Dams Using Rubber Damper. *International journal of acoustics and vibration*, 25(3), 425-435.
- [19] Lysmer, J., Kuhlemeyer, RA. 1969. Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 95, 859-887.
- [20] Zienkiewicz, OC. And Bettess, P. (1978). *Dynamic fluid-structure interaction: Numerical Modeling of the Coupled problem*. John Wiley, New York. 1978, 185-193.
- [21] Ansys user manual, Release 11.0 Documentation for ANSYS, SAS IP, Inc., 2007.

[22] Segerlind, L.J. (1984). *Applied Finite Element Analysis*, John Wiley and Sons.