

## بررسی احتمالاتی تاثیر تراز مخزن بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو

مجید پاسبانی خیاوی<sup>۱\*</sup>، آرش قائد رحمتی<sup>۲</sup>

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

۲- دانش‌آموخته عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

بخش زیادی از نیروی دینامیکی اعمال شده بر سد ناشی از نیروی هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن در اثر اندرکنش سد و مخزن در زمان زلزله می‌باشد که سبب افزایش پاسخ لرزه‌ای سیستم می‌شود. بنابراین تراز آب مخزن نقش مهمی در مقدار نیروی هیدرودینامیکی تولید شده در مخزن دارد. در این مقاله برای تحلیل حساسیت عملکرد لرزه ای سیستم نسبت به تغییرات سطح آب مخزن، از شبیه سازی مونت کارلو با نمونه برداری مکعبی لاتین استفاده می‌شود که در آن ارتفاع مخزن به عنوان پارامتر ورودی متغیر و تغییر مکان تاج، فشار هیدرودینامیکی حداکثر و تنش‌های اصلی در پاشنه و پنجه سد به عنوان پارامترهای خروجی انتخاب شده و حساسیت آنها نسبت به تغییر تراز مخزن تحت تاثیر زلزله مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور سد بتنی وزنی پلین فلت به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مدل اجزای محدودی با استفاده از نرم افزار ANSYS توسعه داده شده است. بعد از انجام مدل سازی و تحلیل، با توجه به نتایج خروجی می‌توان روند تاثیر ارتفاع مخزن را بر نمایش لرزه‌ای سیستم ارزیابی کرد. بررسی پاسخ‌ها نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع آب در محدوده بیش از ۷۰ درصدی ارتفاع مخزن سد در حالت پر پاسخ‌های لرزه‌ای بدنه سد را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: سد بتنی وزنی، ارتفاع مخزن، تحلیل حساسیت، مونت-کارلو، اندرکنش

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.115927.1440	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.115927.1440	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۴/۲۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۸	۱۳۹۶/۱۱/۰۱
				*نویسنده مسئول:		
				مجید پاسبانی خیاوی		
				پست الکترونیکی:		
				pasbani@uma.ac.ir		

# Probabilistic investigation of the effect of reservoir height on seismic performance of concrete gravity dams using Monte Carlo simulation

Majid Pasbani Khiavi<sup>1\*</sup>, Arash Ghaed Rahmati<sup>2</sup>

1-Associate professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Graduated Master of Civil Engineering-Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

## ABSTRACT

A large part of the dynamic force acted on the dam is the hydrodynamic force induced by dam and reservoir interaction which increases the seismic response of dam. Also, the water level has essential role in the creation of induced hydrodynamic force in reservoir because of interaction. In this paper, in order to investigation of the sensitivity of the seismic performance of system, Monte Carlo simulation with Latin Hypercube Sampling is used in which the reservoir height was selected as random input and the dam crest displacement, maximum value of hydrodynamic pressure and 1st and 3rd principle stresses in heel and toe of dam were considered as output responses and the sensitivity of responses were reliably examined under seismic loading. Considering of Pine Flat concrete gravity dam as case study, a finite element model is developed and implemented into a computer code using Ansys software for seismic analysis of system. Consider to obtained results, it is revealed that the reservoir height how can effect on seismic behaviour of system due to earthquake. Investigation of the obtained results it is obvious that the increasing of reservoir height around the greater than 70% height of full reservoir, considerable increase the seismic response of concrete dam body.

## ARTICLE INFO

Receive Date: 21 January 2018

Revise Date: 18 May 2018

Accept Date: 12 July 2018

## Keywords:

Concrete gravity dam

Reservoir level

Sensitivity analysis

Monte Carlo simulation

Interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.115927.1440

\*Corresponding author: Majid Pasbani Khiavi

Email address: pasbani@uma.ac.ir

## ۱- مقدمه

فشار هیدرودینامیکی مؤثر بر وجه بالادست سدهای بتنی تحت اثر زلزله یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی سازه‌های مذکور می‌باشد که به طور گسترده‌ای توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. اولین مطالعه روی سدهای بتنی وزنی توسط وسترگارد در سال ۱۹۳۳ ارائه گردید و پاسخ تحلیلی فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد صلب تحت اثر بار هارمونیک به دست آمد [۱]. زنگار در سال ۱۹۵۲ فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در اثر اندرکنش را برای شکل‌های مختلف وجه بالادست سد استخراج کرد [۲]. در سال ۱۹۵۷ کاتسوبو نشان داد که تحلیل وسترگارد وقتی معتبر است که پیوند تحریک هارمونیک، بزرگ‌تر از پیوند طبیعی مخزن باشد [۳]. همچنین کاتسوبو در سال ۱۹۶۱ در تحقیقی پاسخ هیدرودینامیکی یک مدل سد قوسی و مخزن را برای حرکت هارمونیک زمین ارائه کرد [۴]. در ادامه مطالعات، چوپرا در سال ۱۹۶۷ پاسخ سد تحت اثر مولفه افقی و قائم شتاب زمین با مقدار دلخواه را ارائه نمود [۵]. در ادامه در سال ۱۹۸۱، چوپرا در مطالعه دیگری اثر اندرکنش سد با مخزن و پی نیمه بی‌نهایت را مورد بررسی قرار داد [۶].

در زمینه مطالعات پارامتری سدهای بتنی، نوایی نیا و اردشیر در سال ۲۰۱۳ اثرات ویسکوزیته و جذب کف مخزن را بر نمایش لرزه‌ای سد بتنی وزنی به صورت تحلیلی در دامنه فرکانس بررسی کردند [۷]. آنها نشان دادند که تغییرات ویسکوزیته سبب تغییر در فرکانس طبیعی مخزن شده و در نتیجه فشار هیدرودینامیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین مقادیر فشار هیدرودینامیکی در حالت سیال لزج به صورت مشخصی با سیال غیر لزج متفاوت می‌باشد. همچنین جذب کف نیز مقادیر فشار هیدرودینامیکی را برای دامنه وسیعی از پریود تحریک کاهش می‌دهد و اثرات جذب کف مخزن زمانی که پریود تحریک نزدیک به پریود طبیعی مخزن باشد، شدیدتر است. در ادامه نوایی نیا و کلانی در سال ۲۰۱۴ یک مطالعه پارامتری دیگر را برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی تحت اثر مولفه‌های انتقالی و دورانی زمین‌لرزه انجام دادند [۸]. آنها حساسیت پاسخ سد را نسبت به تغییر مدول الاستیسیته پی، تراز آب مخزن و نیز ضریب جذب کف مخزن تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف با احتساب اثر مؤلفه دورانی زلزله بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که توان تاثیر مؤلفه دورانی زلزله بر پاسخ دینامیکی، به محتوای فرکانسی و طیف توان وابسته است. همچنین افزایش سختی پی سد و ضریب جذب کف، اثر مؤلفه دورانی را کاهش و افزایش تراز آب مخزن، تاثیر مؤلفه دورانی زلزله بر پاسخ سد را افزایش می‌دهد.

با توجه به مطالعات انجام شده علی‌رغم بررسی عوامل اثرگذار مختلف از جمله اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون، طول مخزن و امواج سطحی بر روی فشار هیدرودینامیکی تولید شده در مخزن، تأثیر ارتفاع آب مخزن به عنوان یکی از عوامل مهم کمتر به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. کارآمدی تحلیل احتمالاتی در بررسی تاثیر پارامترهای متغیر روی پاسخ‌های خروجی، سبب استفاده از این ابزار در زمینه‌های مختلف از جمله تحلیل لرزه‌ای سدهای بتنی شده است. لذا در این تحقیق سعی شده است از طریق تحلیل احتمالاتی مونت کارلو و روش نمونه‌های مکعبی لاتین که ابزاری مناسب در شناخت اثرگذاری پارامترهای مختلف می‌باشد در جهت شناخت دقیق تأثیر تراز آب مخزن بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی استفاده شود.

در زمینه تحلیل احتمالاتی، کاستو و همکاران در سال ۱۹۹۸ با استفاده از برنامه اجزای محدود به نام نیسا (NISA) که قابلیت شبیه‌سازی مونت کارلو را دارا است، قابلیت اطمینان سد را بررسی نمودند [۹]. نتایج شبیه‌سازی آنها به صورت نمودارهای توزیع تجمعی ارائه شدند. در سال ۲۰۰۰ فیبرن و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو احتمال گسترش ترک در یک سد بتنی وزنی را محاسبه نمودند [۱۰]. در تحقیق ایشان نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مونت کارلو با نتایج یک مدل آزمایشگاهی مقایسه شد که این قیاس حاکی از تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بود. یانماز و بشر در سال ۲۰۰۵ تحلیل قابلیت اطمینان سد پورشووک واقع در ترکیه را با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو انجام دادند [۱۱]. آن‌ها در تحقیق خود هفت پارامتر را به عنوان متغیر تعریف نموده و نتایج را به صورت جدولی که احتمال شکست را بر اساس ضرایب ایمنی سد نشان می‌دهد، ارائه نمودند. در سال ۲۰۱۲ روحانی نژاد و زرغامی روش جدیدی که ترکیبی از شبیه‌سازی مونت کارلو و روش اجزای محدود بود را ارائه کردند [۱۲]. آن‌ها در تحقیق خود رفتار سد را بررسی کرده و نتایج شبیه‌سازی را به صورت نمودار تابع توزیع تجمعی نشان دادند. آلتاراجس و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو قابلیت اطمینان سد بتنی وزنی در برابر لغزش را بررسی کردند [۱۳]. ایشان در تحقیق خود ده پارامتر متغیر در نظر گرفتند و نتایج را به

صورت نمودار احتمال شکست در برابر لغزش، برای هر متغیر نشان دادند. فنگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به دلیل محدودیت‌های موجود در روش مونت کارلو در بررسی قابلیت اطمینان سازه‌های هیدرولیکی بزرگ و پیچیده، برای تحلیل مدل از ترکیب نرم‌افزار متلب با روش مونت کارلو استفاده کردند [۱۴]. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که روش‌های مبتنی بر متلب- مونت کارلو در قابلیت اطمینان سازه‌های هیدرولیکی ساده و سریع بوده و دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. در سال ۲۰۱۳ میرزا بزرگ و همکاران به ایجاد حرکات غیریکنواخت سه‌بعدی زمین به منظور مقایسه تأثیر حرکات یکنواخت و غیریکنواخت سه بعدی زمین بر روی عملکرد سد قوسی دز با استفاده از روش مونت کارلو پرداختند [۱۵]. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که پاسخ‌های حاصل از در نظر گرفتن حرکات غیر یکنواخت سه بعدی زمین نسبت به حرکات یکنواخت زمین متفاوت می‌باشد و می‌تواند پاسخ‌های سازه‌ای سیستم را افزایش دهد. عالم باقری و سید کاظمی در سال ۲۰۱۴ با استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو و روش نمونه برداری مکعبی لاتین نشان دادند که مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن تأثیر قابل توجه‌تری نسبت به کرنش نهایی آن در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سد بتنی دارند [۱۶]. در زمینه استفاده از تحلیل حساسیت با استفاده از روش مونت کارلو و نمونه برداری مکعبی لاتین در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سد، پاسبانی خیاوی در سال ۲۰۱۵ تأثیر جذب فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده را به وسیله کف مخزن سد بتنی مورد توجه قرار داد [۱۷]. نتایج به دست آمده از تحقیق وی، روند اثر پذیری پاسخ‌ها را از تغییرات ضریب جذب کف به وضوح نشان می‌دهد. در ادامه تحقیق، در سال ۲۰۱۷ پاسبانی خیاوی تأثیر سختی بتن بدنه سد وزنی را بر نمایش لرزه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی کرد [۱۸]. با توجه به نتایج حاصل از تحقیق ایشان، می‌توان به مقدار بهینه مدول یانگ بتن بدنه سد، جهت دستیابی به پاسخ ایمن سازه با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی دست یافت. با ارزیابی مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل لرزه‌ای سدها، در این تحقیق به بررسی حساسیت عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی نسبت به تغییرات سطح آب مخزن از طریق تحلیل احتمالاتی مونت کارلو پرداخته می‌شود.

## ۲- شبیه‌سازی و روش مونت کارلو

چندین روش ممکن است به منظور حل مسائل مربوط به قابلیت اطمینان سازه وجود داشته باشد و روش‌های مختلف شبیه‌سازی، یک راه ممکن جهت حل این گونه مسائل می‌باشند. منظور از شبیه‌سازی، مدل سازی عددی بعضی از پدیده‌ها و سپس مشاهده رویدادهای مورد نظر می‌باشد. مفهوم شبیه‌سازی نسبتاً شفاف می‌باشد، اما فرایند آن ممکن است بسیار دشوار باشد [۱۹].

چنانچه اطلاعات و نتایج مربوط به  $N$  آزمایش در یک کیسه موجود باشد، در صورت نیاز به نتایج یک نمونه  $n$  عضوی، به جای انجام دادن  $n$  آزمایش اضافی،  $n$  تا از  $N$  نتایج آزمایش موجود در کیسه را می‌توان به صورت تصادفی انتخاب کرد. این روش نمونه برداری تحت عنوان تکنیک ویژه معرفی می‌شود. روش مونت کارلو یک تکنیکی می‌باشد که می‌تواند در جهت تولید بعضی از نتایج عددی بدون انجام آزمایش فیزیکی مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، از نتایج آزمایش‌های قبلی می‌توان به منظور ایجاد توزیع احتمالاتی پارامترهای مهم و تولید نمونه‌هایی از داده‌ها استفاده نمود. روش مونت کارلو اغلب در سه مورد استفاده می‌شود:

- در حل مسائل پیچیده که حل آن‌ها بسیار سخت یا غیرممکن می‌باشد. به عنوان مثال در حل مسائل احتمالاتی شامل مدل‌های اجزای محدود غیرخطی پیچیده شبیه‌سازی مونت کارلو که دارای قدرت محاسباتی بالا می‌باشد، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

- در تحلیل مسائلی که می‌توانند به صورت تقریبی البته با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده حل شوند. در واقع این مسائل از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توانند بدون انجام ساده‌سازی‌ها طوری مورد مطالعه قرار گیرند که نتایج حاصل به نتایج واقعی نزدیک‌تر باشد.

- این روش می‌تواند به منظور بررسی نتایج دیگر روش‌های حل مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲-۱- توزیع یکنواخت اعداد تصادفی

پایه و اساس تمام مراحل شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نمونه برداری مکعبی لاتین، تولید اعداد تصادفی می‌باشد که به صورت یکنواخت بین اعداد ۰ و ۱ توزیع شده‌اند. زمانی که یک شناخت از  $u$  مربوط به توزیع یکنواخت عدد تصادفی  $U$  بین ۰ و ۱ وجود داشته باشد، تولید  $x$  مربوط به توزیع یکنواخت عدد تصادفی  $X$  بین هر دو مقدار  $a$  و  $b$  ( $a \leq x \leq b$ ) با استفاده از رابطه (۱) امکان پذیر می‌باشد [۱۹]:

$$x = a + (b - a) \cdot u \quad (1)$$

همچنین مقادیر نمونه تولید شده  $i$  برای یک  $i$  صحیح ناشی از توزیع تصادفی یکنواخت بین دو عدد صحیح  $a$  و  $b$  از طریق رابطه (۲) می‌تواند در نظر گرفته شود:

$$i = a + TRUNC[(b - a + 1) \cdot u] \quad (2)$$

که در آن  $TRUNC[ ]$  نشان دهنده تابعی است که قسمت اعشاری متغیر را حذف می‌کند.

## ۲-۲- توزیع نرمال اعداد تصادفی

از آنجایی که توزیع احتمالاتی نرمال، نقش مهمی را در تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌ها ایفا می‌کند، قابلیت شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال حائز اهمیت می‌باشد. تولید یک مجموعه از اعداد تصادفی نرمال استاندارد شده از  $z_1, \dots, z_n$  نیازمند تولید یک مجموعه‌ای از توزیع یکنواخت متغیرهای تصادفی  $u_1 \dots u_n$  در بازه ۰ و ۱ می‌باشد. برای هر  $u_i$  یک مقدار از  $z_i$  با استفاده از رابطه (۳) می‌تواند بدست آید [۱۹]:

$$z_i = \Phi^{-1}(u_i) \quad (3)$$

که  $\Phi^{-1}$  معکوس تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است.

روش قبلی برای اعداد تصادفی نرمال استاندارد اعمال می‌شود که می‌توان آن را برای همه‌ی اعداد تصادفی نرمال تعمیم داد. با فرض  $X$  به عنوان یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال با میانگین  $\mu_x$  و انحراف استاندارد  $\sigma_x$  اصل رابطه بین  $X$  و متغیر نرمال استاندارد  $Z$  به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$X = \mu_x + Z \cdot \sigma_x \quad (4)$$

بنابراین با توجه به مقدار نمونه تولید شده  $z_i$  با استفاده از روابط قبلی، مقدار  $x_i$  مربوطه را می‌توان از طریق رابطه (۵) محاسبه کرد:

$$x_i = \mu_x + z_i \cdot \sigma_x \quad (5)$$

روش‌های توضیح داده شده مربوط به چگونگی تولید اعداد تصادفی برای توزیع‌های شناخته شده، یک روش کلی قابل اعمال برای هر نوع از تابع توزیع می‌باشد و می‌تواند به لحاظ نظری فرمول بندی شود.

## ۲-۳- خصوصیات شبیه‌سازی مونت کارلو

نتایج مونت کارلو به منظور بررسی دقت نتایج حاصل از روش‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای همه انواع توزیع می‌تواند به کار رود. خطا در ارتباط با این نوع از تکنیک‌ها به طور کامل از طریق تعداد شبیه‌سازی‌ها کنترل می‌شود. زمانی که تعداد نمونه‌ها به سمت بینهایت میل پیدا کند نتایج به یک مقدار دقیق همگرا می‌شوند و عدم قطعیت در تحلیل با افزایش تعداد نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند.

## ۲-۴- روش نمونه‌برداری مکعبی لاتین

اگرچه روش نمونه‌گیری و شبیه‌سازی مونت کارلو روش بسیار مفید و قدرتمندی می‌باشد، ولی در برخی از موارد مشکل تجزیه و تحلیل بسیار پیچیده می‌باشد و زمان مورد نیاز برای هر مرحله تحلیل ممکن است زیاد باشد. در نتیجه زمان مورد نیاز برای صدها و یا هزاران شبیه‌سازی ممکن است خیلی طولانی باشد. روش نمونه‌برداری مکعبی لاتین یک تکنیک برای کاهش تعداد شبیه‌سازی‌های مورد نیاز به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول می‌باشد. در این روش محدوده‌ای از مقادیر امکان‌پذیر از متغیرهای ورودی تصادفی در داخل لایه‌هایی خوشه‌بندی می‌شود و یک مقدار از هر لایه به صورت تصادفی تحت عنوان مقدار نماینده انتخاب می‌شود. این مقادیر نماینده برای هر متغیر تصادفی به نحوی با هم ترکیب می‌شوند که هر مقدار نماینده در فرایند شبیه‌سازی فقط و فقط یک‌بار در نظر گرفته شود. در این روش، همه‌ی مقادیر امکان‌پذیر از متغیرهای تصادفی در شبیه‌سازی استفاده می‌شوند. اگر تابع حالت حدی  $Y$  یا  $K$  متغیر تصادفی به صورت معادله (۶) در نظر گرفته شود [۱۹]:

$$Y = f(X_1, \dots, X_i) \quad (6)$$

در این صورت مراحل مبنایی تکنیک نمونه‌برداری مکعبی لاتین به صورت زیر می‌باشد:

- هر یک از  $X_i$  در فواصل معینی خوشه‌بندی می‌شود ( $N$  فاصله). این خوشه‌بندی باید به نحوی باشد که احتمال پیشامد هر مقدار  $X_i$  های موجود در این فواصل برابر  $1/N$  باشد.

- برای هر متغیر  $X_i$  و هر یک از  $N$  فاصله آن به صورت تصادفی یک مقدار به‌عنوان مقدار نماینده انتخاب می‌شود. در کاربردهای عملی اگر تعداد فاصله‌ها زیاد و یا فواصل انتخاب شده بزرگ باشد نقطه مرکزی هر فاصله را می‌توان به جای انجام نمونه‌برداری تصادفی انتخاب کرد.

- بعد از مراحل ذکر شده  $N$  مقدار نماینده برای هر کدام از  $K$  متغیر تصادفی بدست می‌آید. در کل  $N^K$  ترکیب محتمل از این مقادیر می‌تواند وجود داشته باشد. هدف از روش نمونه‌برداری مکعبی لاتین انتخاب  $N$  ترکیب می‌باشد به‌نحوی که هر مقدار نماینده تنها و تنها فقط یک‌بار در  $N$  ترکیبات ظاهر شود.

- برای به دست آوردن اولین ترکیب، به صورت تصادفی یکی از مقادیر نماینده برای هر یک از متغیرهای تصادفی ورودی  $K$  انتخاب می‌شود. سپس جهت به دست آوردن دومین ترکیب، به‌صورت تصادفی یکی از  $N-1$  مقدار نماینده باقیمانده از هر متغیر تصادفی انتخاب می‌شود. در ادامه برای دست آوردن سومین ترکیب به‌صورت تصادفی یکی از  $N-2$  مقادیر نماینده باقیمانده از هر متغیر تصادفی انتخاب می‌شود. این فرایند انتخاب تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا  $N$  ترکیب از مقادیر متغیرهای ورودی ساخته شود.

- رابطه (۶) برای هر یک از  $N$  ترکیب متغیرهای ورودی تولید شده بالا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نتیجه  $N$  تابع به‌صورت  $V_i = (i = 1, 2, \dots, N)$  به دست می‌آید.

فرایند اشاره شده، داده‌های شبیه‌سازی ایجاد می‌کند و باید چگونگی استفاده از داده‌ها به‌منظور برآورد پارامترهای آماری برای  $Y$  تعیین شود. رایج‌ترین رابطه‌های مورد استفاده برای برآورد پارامترها عبارت‌اند از:

برآورد مقدار میانگین:

$$Y = \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (7)$$

برآورد ممان  $m$ ام ( $m^{\text{th}}$  moment):

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i)^m \quad (8)$$

برآورد تابع توزیع تجمعی:

$$F_y(y) = \frac{\text{Number of times } Y_i \leq Y}{N} \quad (9)$$

### ۳- مدل اجزای محدود سیستم سد- مخزن - فونداسیون

جهت شبیه‌سازی سیستم سد- مخزن- فونداسیون ابتدا معادلات دینامیکی اجزای محدود آب و سپس سازه که خود شامل سد و پی می‌باشد به‌صورت مجزا استخراج می‌شوند. سپس دو معادله با استفاده از متغیرهای مشترک موجود به معادله دینامیکی واحد تبدیل می‌شود.

#### ۳-۱- معادلات دینامیکی اجزای محدود آب

اگر آب مخزن یک سیال تراکم‌پذیر و غیر ویسکوز فرض شود، معادله توزیع فشار هیدرو دینامیکی  $p$  در مخزن سد که در اثر اندرکنش به دلیل حرکت زمین به وجود می‌آید، مطابق رابطه (۱۰) به شکل معادله موج بیان می‌شود [۲۰]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (10)$$

که در آن  $c$  سرعت موج فشاری در آب و  $\nabla^2$  عملگر لاپلاسین در حالت دوبعدی است.

شرایط مرزی مخزن با فرض صرف نظر کردن از اثر امواج سطحی و ویسکوزیته سیال به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

۱- در مرز مشترک سد وزنی و مخزن شرط مرزی تماس به‌صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_w a_n \quad (11)$$

که در آن  $n$  بردار یکه عمود بر محل تماس سد و مخزن،  $a_n$  مؤلفه‌ی عمودی شتاب در سطح مشترک و  $\rho_w$  دانسیته جرمی آب می‌باشد.

۲- در کف مخزن شرط مرزی به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود [۲۱]:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_w a_n + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) ضریب استهلاک می‌باشد که به عنوان پارامتر پایه برای تعیین مشخصات مواد کف مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد و از رابطه رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$q = \frac{\rho_w}{\rho_f C_f} \quad (13)$$

در رابطه اخیر  $C_f = \sqrt{\frac{E_f}{\rho_f}}$  است که در آن  $E_f$  سختی و  $\rho_f$  چگالی سنگ بستر می‌باشد. رابطه بین ضریب استهلاک و ضریب بازتاب موج نیز به صورت رابطه (۱۴) بیان می‌شود:

$$\alpha = \frac{1 - qc}{1 + qc} \quad (14)$$

در رابطه بالا  $\alpha$  ضریب بازتاب موج و  $c$  سرعت موج فشاری در آب می‌باشد. به طور کلی وجود رسوب در کف مخزن به دلیل کاهش مقدار  $\alpha$ ، مقادیر پاسخ سدهای بتنی وزنی از جمله جابجایی و تنش را کاهش می‌دهد.

۳- در مرز دوردست مخزن از شرط مرزی سامرفلد مطابق رابطه (۱۵) استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\dot{p}}{c} \quad (15)$$

که در آن  $\dot{p}$  مشتق اول فشار هیدرودینامیکی  $p$  نسبت به زمان می‌باشد.

در سطح آزاد مخزن چنانچه از اثر موج‌های سطحی صرف نظر شود شرط مرزی به صورت رابطه (۱۶) می‌باشد:

$$p = 0 \quad (16)$$

با استفاده از روش اجزای محدود، روابط بیان شده را می‌توان در فرم ماتریسی به صورت معادله (۱۷) نوشت:

$$M_f \ddot{p}_e + C_f \dot{p}_e + K_f p_e + \rho_w Q^T (\ddot{u}_e + \ddot{u}_g) = 0 \quad (17)$$

که  $M_f$ ،  $C_f$  و  $K_f$  به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سیال نامیده می‌شود.  $Q$  نیز ماتریس بیان کننده اندرکنش سد و مخزن می‌باشد.  $\ddot{u}_g$ ،  $\ddot{u}_e$ ،  $p_e$  به ترتیب فشار گرهی، بردارهای شتاب گرهی و زمین می‌باشند.

### ۲-۳- معادلات دینامیکی اجزای محدود سازه

معادلات دینامیکی اجزای محدود سازه که شامل سد و فونداسیون می‌باشد، تحت اثر زلزله با روش اجزای محدود به صورت معادله

(۱۸) بیان می‌شود:



$$M_s \ddot{u}_e + C_s \dot{u}_e + K_s u_e = -M_s \ddot{u}_g + Q p_e \quad (18)$$

که  $M_s$ ،  $C_s$  و  $K_s$  به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه بوده و  $Q p_e$  بردار مربوط به نیروی هیدرودینامیکی تولیدشده به وسیله مخزن می باشد.

### ۳-۳- معادلات دینامیکی اجزاء محدود سیستم سد - مخزن - فونداسیون

معادلات دیفرانسیل (۱۷) و (۱۸) بیان کننده معادلات گسسته اجزای محدود برای مسئله اندرکنش سیال و سازه می باشند که می توان آن ها را به صورت معادله (۱۹) باهم ترکیب کرد:

$$\begin{bmatrix} M_s & \cdot \\ M_{fs} & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_e \\ \ddot{p}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & \cdot \\ \cdot & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_e \\ \dot{p}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & K_{fs} \\ \cdot & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_e \\ p_e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M_s \ddot{u}_g \\ -M_{fs} \ddot{u}_g \end{Bmatrix} \quad (19)$$

به ترتیب ماتریس سختی و جرم مربوط به اندرکنش سد و مخزن می باشند.

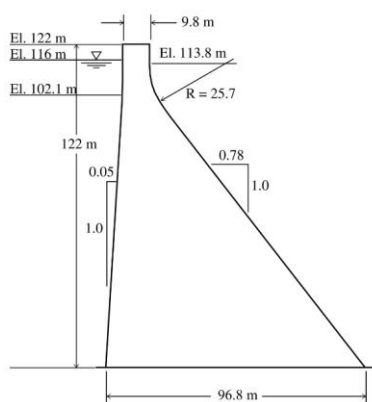
معادله حاکم بر اندرکنش سیال و سازه یک معادله دیفرانسیلی خطی مرتبه دوم است و همان طور که مشاهده می شود دارای ماتریس های جرم و سختی نامتقارن می باشد، این معادله را می توان به شکل مرسوم معادلات دینامیکی مطابق معادله (۲۰) بیان نمود:

$$M_c \ddot{u}_c + C_c \dot{u}_c + K_c u_c = F(t) \quad (20)$$

که  $M_c$ ،  $C_c$  و  $K_c$  به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سیستم می باشند.

### ۴- مدل سد بتنی وزنی

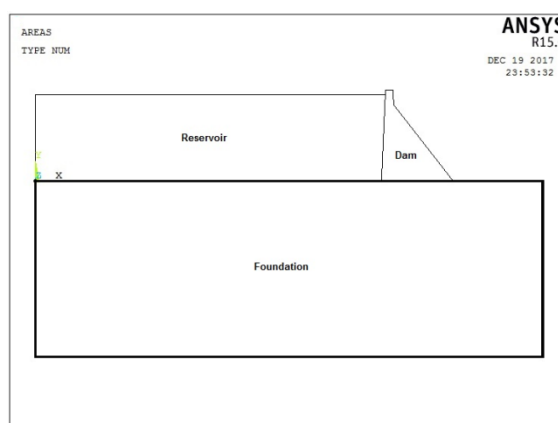
به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق، سد پایین فلت به ارتفاع ۱۲۲ متر به صورت دوبعدی مدل سازی می شود. این سد روی رود کینگ نزدیک فرسنو در کالیفرنیا آمریکا واقع شده است. ساختن این سد از سال ۱۹۴۹ توسط مهندسين ارتش آمریکا آغاز شد و در سال ۱۹۵۴ به اتمام رسید. مشخصات هندسی سد پایین فلت در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن کلیه ابعاد بر اساس سیستم SI می باشد. مدول الاستیسیته، وزن واحد حجم و ضریب پواسون بتن سد به ترتیب ۲۲/۴ گیگاپاسکال، ۲۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۲ فرض شده و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فونداسیون بدون جرم به ترتیب ۲۲/۴ گیگاپاسکال و ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. چگالی آب مخزن و سرعت امواج فشاری در آب نیز به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۴۴۰ متر بر ثانیه می باشد.



شکل ۱: ابعاد هندسی سد بتنی وزنی پایین فلت (متر)

## ۴-۱- مدل سازی

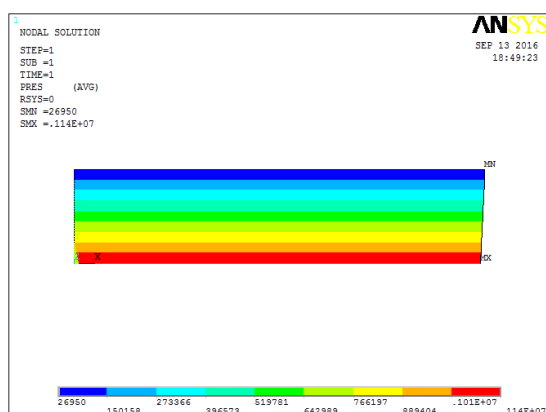
برای مدل سازی اجزای محدود و تحلیل لرزه ای کل سیستم سد- مخزن- فونداسیون نشان داده شده در شکل ۲ از نرم افزار Ansys استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت تحلیل لرزه ای با در نظر گرفتن هندسه نامنظم دامنه ها و اثرات اندرکنش مخزن و پی را دارا می باشد. برای این منظور اجزای مناسبی که رفتار تراکم پذیری سیال را نمایش دهد پیش بینی شده است. برای اعمال مناسب اثرات مخزن و فونداسیون در مدل سازی عددی سیستم، طول مخزن چهار برابر و عمق فونداسیون دو برابر ارتفاع مخزن در نظر گرفته شده است. با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بتنی وزنی و شکل هندسی مخزن، مدل سد به صورت دوبعدی با رفتار تنش مسطح فرض شده و اثرات اندرکنش با سد، مخزن و فونداسیون در مدل لحاظ شده است. فونداسیون انعطاف پذیر در نظر گرفته شده و از شرط مرزی سامرفلد برای مرز دوردست مخزن استفاده شده است. برای گسسته سازی قسمت های جامد بتن و سنگ بستر از عناصر هشت گرهی SOLID182 و برای دامنه سیال مجاور و غیر مجاور سازه عناصر چهار گرهی FLUID29 به کار رفته است. برای چسبندگی و اتصال مناسب قسمت های مختلف مدل شامل سد، فونداسیون و مخزن، از بخش GLUE موجود در نرم افزار Ansys استفاده شده است. برای انجام تحلیل لرزه ای روش نیومارک که پارامترهای آن به صورت  $\beta = 0.25$  و  $\gamma = 0.5$  می باشد، انتخاب شده است. همچنین برای اعمال اثرات میرایی از روش رایلی استفاده شده که ضرایب آن با استفاده از فرکانس اول و دوم سیستم برابر  $a = 0.52 \times 10^{-2}$  و  $b = 0.0046$  استخراج شده است. لازم به ذکر است که فرکانس های اول ( $\omega_1$ ) و دوم ( $\omega_2$ ) با استفاده از تحلیل مودال به ترتیب برابر  $8/62$  و  $13/12$  می باشند. همچنین ضریب میرایی داخلی بتن برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: سیستم سد - مخزن - فونداسیون

## ۴-۲- تحلیل مدل و ارزیابی نتایج

برای انجام تحلیل، مصالح سد بتنی و پی دارای رفتار همگن، خطی و ایزوتروپیک و آب مخزن، محیطی همگن، ایزوتروپ، غیر لزج، غیر چرخشی و با تغییر مکان های کوچک و تراکم پذیر فرض می شود. برای اطمینان از صحت پاسخ مدل تهیه لازم است که رفتار مدل اجزای محدود ارزیابی شود. یکی از روش های صحت سنجی مدل این است که مقدار فشار هیدرواستاتیکی تولید شده در کف مخزن با استفاده از تحلیل استاتیکی مدل باید برابر با حاصل ضرب ارتفاع مخزن در وزن مخصوص آب باشد. با توجه به مدل سازی سیستم در نرم افزار Ansys، کانتور توزیع فشار آب مخزن مطابق شکل ۳ می باشد. این کانتور مقدار فشار هیدرواستاتیکی کف مخزن را برابر با  $1/14$  مگاپاسکال نشان می دهد.



شکل ۳: کانتور توزیع فشار هیدرواستاتیکی در داخل مخزن

همچنین مقدار فشار هیدرواستاتیکی در کف مخزن با استفاده از روش تحلیلی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P = \rho gh = 1000 * 9.81 * 116 = 1137960 \text{ Pa} = 1.1379 \text{ MPa}$$

که در آن  $h$  ارتفاع مخزن و  $\rho$  چگالی آب می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر تحلیلی و نرم افزاری فشار کف مخزن تقریباً برابر می باشند. این نتیجه نشان می دهد که رفتار مدل مورد نظر به لحاظ گسسته سازی و تعریف شرایط مرزی دارای دقت مناسب می باشد.

به منظور انجام تحلیل دینامیکی، رکوردهای زمین لرزه Kern County مطابق جدول ۱ از سایت Peer استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است. رکوردهای زمین لرزه مذکور بر اساس آئین نامه UBC آمریکا به 0.3g که شتاب حداکثر منطقه احداث سد می باشد، مقیاس شده اند.

جدول ۱: مشخصات زمین لرزه

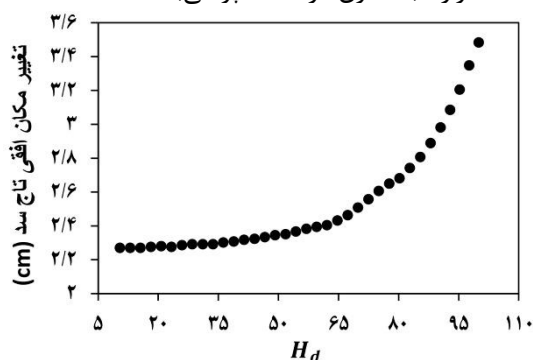
زمین لرزه	نام ایستگاه	فاصله از گسل (km)
Kern County	Taft Lincoln School	38.89

برای انجام آنالیز حساسیت، ارتفاع آب مخزن ( $H_w$ ) به عنوان متغیر ورودی و تغییر مکان افقی تاج سد، تنش اصلی کششی و فشاری در پاشنه و پنجه سد و همچنین فشار هیدرودینامیکی در پاشنه سد به عنوان متغیرهای خروجی بحرانی انتخاب شده اند. لازم به ذکر است که در تحلیل احتمالاتی مونت کارلو تعداد شبیه سازی های مورد نیاز باید به اندازه ای باشد که مقدار متوسط متغیرهای خروجی به همگرایی مناسب میل کند. لذا تنظیمات صورت گرفته در نرم افزار Ansys به منظور تحلیل احتمالاتی و حساسیت با استفاده از روش مونت-کارلو مطابق جدول ۲ انتخاب شده است که در آن  $H_w$  نشان دهنده ارتفاع آب در مخزن می باشد.

جدول ۲: تنظیمات تحلیل احتمالاتی مونت کارلو

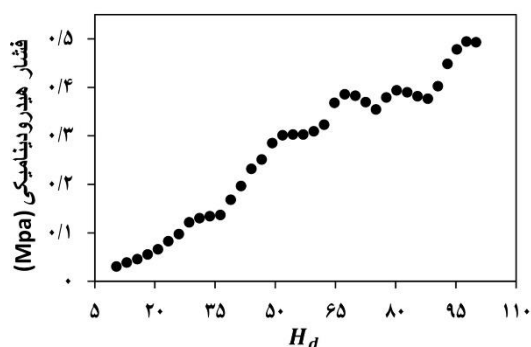
نوع توزیع متغیر ورودی	محدوده تغییرات (متر)	تعداد حلقه شبیه سازی	تعداد تکرار
یکنواخت	$116 < H_w < 12$	۳۷	۳

در این تحقیق برای انجام تحلیل احتمالاتی مونت کارلو از روش نمونه برداری مکعبی لاتین (Latin Hypercube Sampling) در نرم افزار Ansys استفاده شده و نتایج مورد نظر استخراج شده است. به منظور ارائه مناسب تر نتایج و درک بهتر تاثیر ارتفاع مخزن، حساسیت متغیرهای خروجی نسبت به پارامتر بدون بعد  $H_d$  که بیانگر  $100 \times \frac{\text{سطح آب مخزن (متر)}}{116 \text{ (متر)}}$  می باشد در شکل های ۴ تا ۷ ارائه شده است که در آن ۱۱۶ متر مطابق شکل ۱ نشان دهنده تراز آب مخزن در حالت پر می باشد:



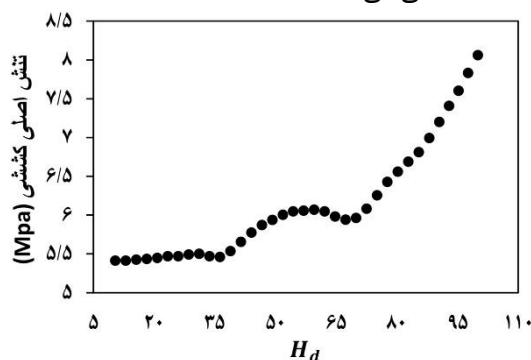
شکل ۴: حساسیت تغییر مکان افقی تاج سد به  $H_d$

شکل ۴ نشان می دهد که افزایش ارتفاع سطح آب مخزن تا ۶۵ درصدی ارتفاع مخزن در حالت پر، تأثیر چندانی بر میزان جابجایی افقی تاج سد ندارد.



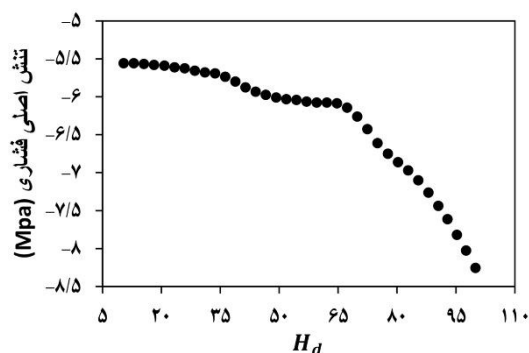
شکل ۵: حساسیت فشار هیدرو دینامیکی پاشنه سد به  $H_d$

مطابق شکل ۵ افزایش ارتفاع سطح آب مخزن در اکثر نقاط سبب افزایش فشار هیدرو دینامیکی وارده بر پاشنه سد می شود که با توجه به ارتباط مستقیم فشار با عمق آب، نتیجه منطقی می باشد.



شکل ۶: حساسیت تنش اصلی کششی پاشنه سد به  $H_d$

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع آب مخزن در محدوده بیش از ۷۵ درصدی ارتفاع مخزن در حالت پر، تأثیر زیادی بر افزایش تنش اصلی کششی وارده بر پاشنه سد دارد.



شکل ۷: حساسیت تنش اصلی فشاری پنجه سد به  $H_d$

شکل ۷ نشان می‌دهد که تنش اصلی فشاری پنجه سد در اثر افزایش ارتفاع آب مخزن در محدوده بیش از ۶۵ درصدی ارتفاع کل مخزن، به صورت مشخصی افزایش می‌یابد. در ادامه جهت ارزیابی و بررسی دقیق نتایج، مقادیر عددی پاسخها در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳: مقادیر عددی حداکثر پاسخها

$H_w$ (m)	$H_d$	جابجایی افقی تاج سد (cm)	فشار هیدرودینامیکی در پاشنه سد (MPa)	تنش اصلی کششی در پاشنه سد (MPa)	تنش اصلی فشاری در پنجه سد (MPa)
12.1	10.43	2.27009	0.030634	5.41	-5.56
15.1	13.02	2.26995	0.0388	5.41357	-5.5601
21.1	18.12	2.27515	0.0551	5.43576	-5.5827
27.1	23.36	2.27486	0.0823	5.46878	-5.6162
33.1	28.53	2.29097	0.1217	5.49094	-5.6606
39.1	33.70	2.29071	0.1340	5.46968	-5.6941
45.1	38.88	2.30684	0.1680	5.53531	-5.8035
51.1	44.05	2.32295	0.2318	5.77466	-5.9348
57.1	49.22	2.34454	0.2848	5.93799	-6.0117
63.1	54.4	2.36614	0.3025	6.04703	-6.0452
69.1	59.57	2.39318	0.3094	6.06922	-6.0787
75.1	64.74	2.43115	0.3677	5.98281	-6.0904
81.1	69.91	2.50739	0.3827	5.96152	-6.2651

87.1	75.09	2.60546	0.3544	6.2552	-6.6135
93.1	80.26	2.6817	0.3938	6.55974	-6.8642
99.1	85.43	2.8071	0.3817	6.80995	-7.1040
105.0	90.52	2.9817	0.4021	7.20137	-7.4416
110.5	95.26	3.20546	0.4781	7.60365	-7.8226
116.0	100	3.48387	0.4931	8.06017	-8.2579

با توجه به مقادیر جدول ۳ می توان دریافت که افزایش ارتفاع آب مخزن در محدوده بیش از ۷۰ درصد ارتفاع مخزن در حالت پر، پاسخ‌های لرزه‌ای سد را به غیر از پاسخ فشار هیدرودینامیکی به طور مؤثر افزایش می‌دهد.

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت تاثیر فشار هیدرودینامیکی بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی 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 تاثیر تراز آب مخزن بر عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی پرداخته شد. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که در اثر افزایش سطح آب مخزن، فشار هیدرودینامیکی تقریباً به صورت یکنواخت افزایش پیدا می‌کند. در حالی که پاسخ‌های لرزه‌ای سد که شامل تنش‌های اصلی کششی و فشاری پاشنه و پنجه سد و همچنین جابجایی افقی تاج سد می‌باشد فقط در اثر افزایش سطح آب مخزن در محدوده بیش از ۷۰ درصد ارتفاع مخزن سد در حالت پر به صورت مؤثر افزایش پیدا می‌کنند. در خاتمه با توجه به کاربرد مناسب تحلیل احتمالاتی در مدل ارائه شده در این مقاله می توان به موارد دیگر استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو به صورت زیر اشاره کرد:

۱- استفاده از تحلیل احتمالاتی مونت کارلو جهت بهینه‌سازی خصوصیات مصالح و ابعاد هندسی سد

۲- شناخت متغیرهایی از طراحی که دامنه تغییر آن‌ها بیشترین اثر را بر روی نتایج حاصل از طراحی سازه می‌گذارد. به بیان دیگر نتایج حاصل از طراحی نسبت به نوسان این متغیرها بیشترین حساسیت را دارا می‌باشند.

۳- طراحان به دلیل بروز خطاهای انسانی در زمان اجرا، جهت افزایش ایمنی در طراحی از ضرایب اطمینان استفاده می‌کنند. در صورتی که با شناخت تاثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد سازه از طریق آنالیز احتمالاتی، می‌توان این ضریب اطمینان را با دقت بیشتر برای متغیرهای با اثرگذاری زیاد در نظر گرفت.

## مراجع

- [1] Westergaard, H. M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. *Transactions ASCE*. 98, 418-432.
- [2] Zangar, C. N. (1952). *Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects* (No. 11). Technical Information Office.
- [3] Kotsubo, S. (1957). Dynamic water pressure on dams due to irregular earthquakes. *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*. 1957(47), 38-45.
- [4] Kotsubo, S. (1961). External forces on arch dams during earthquakes. *Memories Faculty of Engineering*.
- [5] Chopra, A. K. (1967). Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 93(6), 205-224.
- [6] Chopra, A. K. and Chakrabarti, P. (1981). Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 9(4), 363-383.

- [7] Navayi Neya, B. and Alijani Ardeshir, M. (2013). An Analytical Solution for Hydrodynamic Pressure on Dams Considering the Viscosity and Wave Absorption of the Reservoir. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 38(8), 2023–2033.
- [8] Navayi Neya, B. and Kalani Sarokolayi, L. (2014). Foundation flexibility effect on dynamic response of concrete gravity dams under correlated translational and rotational components of ground motion. *Journal of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University*. 44(3), 99-111.
- [9] Kostov, M., Boncheva, H., Stefanov, D., Varbanov, G., Kaneva, A. and Koleva, N. (1998). Seismic risk assessment of large concrete gravity dams. *11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris*.
- [10] Fairbairn, E., Dubeux, V., Paz, C. and Ebecken, N. (2000). Application of probabilistic approach to the analysis of gravity dam centrifuge tests. *8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*.
- [11] Yanmaz, A.M. and Beşer, M.R. (2005). On the reliability--based safety analysis of the Porsuk dam. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 29(5), 309-320.
- [12] Rohaninejad, M. and Zarghami, M. (2012). Combining Monte Carlo and finite difference methods for effective simulation of dam behavior. *Advances in Engineering Software*. 45(1), 197-202.
- [13] Altarejos-García, L., Escuder-Bueno, I., Serrano-Lombillo, A. and de Membrillera-Ortuño, M.G. (2012). Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis. *Structural Safety*. 36, 1-13.
- [14] Feng, G., Ma, C., Zheng, D.J., Yao, Z., You, L.F. and Tang, D.Z. (2013). The application of matlab-based Monte Carlo method in hydraulic structures reliability. *In Applied Mechanics and Materials*. 351, 1576-1580.
- [15] Mirzabozorg, H., Lamea, M. and Sehhat, H. (2012). Hydrodynamic isolation and 3D seismic response of concrete arch dams. *Dam Engineering*. 22(3), 227-250.
- [16] Alembagheri, M. and Seyedkazemi, M. (2015). Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 44(1), 41-58.
- [17] 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, Korean Society of Civil Engineers*. 20(5), 1977-1986.
- [18] Pasbani Khiavi M. (2017). Investigation of seismic performance of concrete gravity dams using probabilistic analysis. *GRAĐEVINAR*. 69(1), 21-29.
- [19] Matos, J. A. S. D. C. (2007). *Uncertainty treatment in civil engineering numerical models*. Master Degree in Structures of Civil Engineering, University of Porto, Faculty of Engineering.
- [20] Küçükarslan, S., Coşkun, S. B. and Taşkın, B. (2005). Transient analysis of dam–reservoir interaction including the reservoir bottom effects. *Journal of Fluids and Structures*. 20(8), 1073-1084.
- [21] Fenves, G. L. and Chopra A. K. (1985). Effect of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction on frequency response functions for concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 13, 13-31.