



## Investigation of the Effect of Near and Far Fault Earthquake on Seismic Response of Controlled Concrete Gravity Dams with Rubber Damper

Majid Pasbani Khiavi<sup>1</sup>, Mortaza Ali Ghorbani<sup>2</sup>, Arash Ghaed Rahmati<sup>3</sup>

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

2- Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

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

### ABSTRACT

A large part of the dynamic force applied to the dam is the hydrodynamic force generated in the reservoir due dam and reservoir interaction. The nature and method of applying this force in near and far fault earthquake records on structures was different and structures behave differently against each of these types of records. One of the solutions to control the seismicity of the concrete gravity dam is to use seismic dampers at the interface of the dam and the reservoir to reduce the hydrodynamic pressure on the dam. Therefore, in this study to investigate the effect of damping on the seismic performance of a concrete gravity dam, two near fault and two far fault earthquake records were used for the analysis. Output responses including maximum response of dam crest displacement and 1st principle stress at heel have been selected as critical responses. Ansys software, based on finite element method, was selected for dam modeling and seismic analysis and Newmark method has been used to solve the dynamic equation. The results of the analysis show the positive effect of the isolation layer in reducing the seismic responses to the dam in both far and near earthquake fields. In addition, it can be said that rubber damper performs better in the near fault than in the far fault.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 15 January 2021

**Revise Date:** 20 July 2021

**Accept Date:** 15 August 2021

**Keywords:** Concrete gravity dam  
Rubber damper  
Interaction  
Seismic control  
Near and far fault

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.301030.2539

\*Corresponding author: Majid Pasbani Khiavi  
Email address: pasbani@uma.ac.ir

## بررسی تأثیر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی کنترل شده با میراگر لاستیکی

مجید پاسبانی خیاوی<sup>۱\*</sup>، مرتضی علی قربانی<sup>۲</sup>، آرش قائد رحمتی<sup>۳</sup>

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

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

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

### چکیده

بخش زیادی از نیروی دینامیکی اعمالی بر سد ناشی از نیروی هیدرودینامیکی تولید شده در مخزن در اثر اندرکنش آب و سازه می‌باشد. ماهیت و نحوه اعمال این نیرو در رکوردهای میدان دور و نزدیک زلزله بر سازه‌ها متفاوت بوده و سازه‌های مختلف در برابر هر یک از انواع رکوردهای مذکور رفتار متفاوتی دارند. یکی از راهکارهای کنترل لرزه‌ای سد بتنی وزنی استفاده از میراگرهای لاستیکی در مرز سد و مخزن جهت کاهش فشار هیدرودینامیکی وارده بر سد می‌باشد. لذا در این تحقیق برای بررسی تأثیر میراگرلاستیکی بر نمایش لرزه‌ای سد بتنی وزنی از دو رکورد میدان نزدیک و دو رکورد میدان دور زلزله برای تحلیل استفاده شده است. پاسخ‌های خروجی مورد بررسی شامل مقادیر حداکثر تغییر مکان افقی تاج سد و تنش کششی اصلی در پاشنه می‌باشد که به عنوان پاسخ‌های بحرانی انتخاب شده‌اند. برای مدل‌سازی و انجام تحلیل از نرم‌افزار انسیس که مبتنی بر روش اجزای محدود می‌باشد، بهره گرفته شده و برای حل معادلات دینامیکی از روش نیومارک استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل، تأثیر قابل ملاحظه میراگر لاستیکی به عنوان لایه ایزولاسیون را در کاهش پاسخ لرزه‌ای سد در هر دو حوزه دور و نزدیک زلزله، نشان می‌دهد. علاوه بر این نتایج حاصل نشان می‌دهد که میراگرلاستیکی در حوزه نزدیک عملکرد بهتری نسبت به حوزه دور دارد.

کلمات کلیدی: سد بتنی وزنی، میراگر لاستیکی، اندرکنش، کنترل لرزه‌ای، حوزه نزدیک و دور

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۰/۵/۳۱	۱۴۰۰/۶/۳۱	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۱/۰۲/۳۱	<a href="https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.301030.2539">https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.301030.2539</a>
*نویسنده مسئول:		مجید پاسبانی خیاوی			
پست الکترونیکی:		pasbani@uma.ac.ir			

## ۱- مقدمه

تأثیر قابل توجه فشار هیدرودینامیکی وارده بر بدنه سد، بر روی عملکرد لرزه‌ای سد بتنی در زمان وقوع زلزله و همچنین احداث بسیاری از سدهای بتنی در مناطق زلزله‌خیز، اهمیت افزایش ایمنی این سازه‌ها را در زمان وقوع زلزله نشان می‌دهد. از همین رو محققین همواره به دنبال راهکارهایی جدیدتری در جهت افزایش بیشتر ایمنی عملکرد سدهای بتنی در مقابل زلزله بوده‌اند. کنترل ارتعاش در سازه به کمک سیستم‌های مستهلک کننده انرژی از جمله راهکارهای نوینی می‌باشد که سبب کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای وارده 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. مطالعه این وسایل باعث ایجاد فلسفه طراحی جدیدی شده که روی 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 اعضای سازه‌ای و خرابی آن‌ها در این میراگرها جذب می‌شود.

کنترل لرزه‌ای به عنوان یکی از تکنولوژی‌های مدرن بیشتر در سازه‌های مهندسی مانند ساختمان‌ها و پل‌ها استفاده شده و تأثیرات عملی خود را در برخی از حوادث لرزه‌ای قوی نشان داده است. این تکنولوژی به یک رویکرد توسعه مدرن در مهندسی زلزله تبدیل شده است. با این وجود در زمینه‌ی ایمنی سدهای بزرگ در مراحل اولیه باقی مانده است. در ساختمان‌ها میراگرهای لرزه‌ای معمولاً در پایه ساختمان قرار می‌گیرند در صورتی که در سدها برای کاهش فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن، بر روی بالادست بدنه‌ی سد نصب می‌شوند. از اولین اقدامات کنترل لرزه‌ای در سدهای بتنی می‌توان به استفاده از میله‌های تقویتی فولادی در سد قوسی انگوری<sup>۱</sup> در اتحاد جماهیر شوروی اشاره کرد که هزینه‌ی زیادی صرف می‌گردد بکار رفته (۲۳۰۰۰ تن) شد. از این رو توسعه‌ی تکنولوژی کنترل لرزه‌ای یک ضرورت و در عین حال دارای چالش‌هایی می‌باشد. ساخت و توسعه‌ی میراگرهای لرزه‌ای در سد از سال ۱۹۵۰ در کشورهایی چون روسیه و فرانسه آغاز گردید. اولین نمونه میراگرهای لرزه‌ای تحت عنوان بالشتک هوا بر روی سد بتنی وزنی کلیوولوری<sup>۲</sup> با ارتفاع بیش از ۲۰ متر در اتحاد جماهیر شوروی صورت گرفت که فشارهای ناشی از انفجار حدود ۶۷ تا ۸۸ درصد کاهش پیدا کردند [۱]. با این حال فرانکس سد و ضربه‌ی موج در آب، بیش از حد بالا بودند (۱۳-۲۳ هرتز) که برای سدهای مرتفع مناسب نبود. در سال ۱۹۸۰ بالشتک هوا در دو سد قوسی چیرکی<sup>۳</sup> با ارتفاع ۲۳۲ متر و میاتلی<sup>۴</sup> با ۸۶ متر در روسیه استفاده شد [۲]. در سال ۱۹۹۰ بالشتک هوا در طراحی سد بتنی وزنی مک<sup>۵</sup> با ارتفاع ۱۵۵ متر در روسیه به کار گرفته شد که با کاهش ۹ درصدی سطح مقطع سود فراوانی به بار آورد [۱]. گاز با فشار معمولی در بالشتک هوا به کمپرسور هوا و سیستم لوله تأمین هوا بستگی دارد. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از محفظه‌ی افزایش بالشتک هوا در نیروگاه برق آبی نشان داد که نشت هوا در محفظه‌ی افزایش کم می‌باشد. به عنوان نمونه نشت هوا از محفظه‌ی افزایش بالشتک هوا با حجمی حدود ۱۱۰۰۰۰ متر مکعب در نیروگاه برق آبی کوئیلدال<sup>۶</sup> نروژ که محفظه بالشتک آن یکی از بزرگترین‌ها در جهان است تقریباً ۰/۱۷ نانو متر مکعب در دقیقه می‌باشد. علاوه بر این برق مصرفی متوسط چند سال یا هر ساله ۵۴۷۰۰۰ کیلو وات ساعت می‌باشد. با توجه به مطالب بالا تأمین هوا و نگهداری بالشتک هوا موجه به نظر نمی‌رسد. مطالعات اولیه در زمینه‌ی تأثیر میراگرهای لرزشی بر پاسخ سد توسط هال<sup>۷</sup> و ال‌ایدی<sup>۸</sup> در سال ۱۹۸۲ ارائه شد [۳]. آنها یک مدل سد بتنی وزنی با بالن‌های پر از هوا و یا حباب‌های گاز تزریق شده جهت فراهم کردن لایه هوا در وجه بالا دست سد، به صورت دوبعدی و به روش اجزای محدود مورد تحلیل قرار دادند هیچکدام از این دو روش، کاهشی را در پاسخ دینامیکی سد مخزن ایجاد نکرد. در ادامه هال و همکارانش در سال ۱۹۹۲، تأثیر یک ماده‌ی نرم چسبنده به وجه بالادست یک سد بتنی را روی کاهش پاسخ سد مطالعه کردند [۴]. آنها، تراکم‌پذیری ماده را مشابه با رفتار یک بعدی گاز کامل فرض نمودند؛ ولی با این مدل برای لایه‌ی نرم، کاهش قابل توجه‌ای 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،

1 Engury

2 Klivobolouri

3 Chirkey

4 Miately

5 Mok

6 Kvilldal

7 Hall

8 El-Aidi

ارتعاشات سد و سیستم جدایی در هنگام زلزله اتفاق بیفتد. در نتیجه، طرح پرده‌ی جداساز نیازمند به هزینه اضافی و نگهداری برای رسیدن به یک اطمینان بالا می‌باشد. حاتمی<sup>۹</sup> در سال ۱۹۹۶ کاهش فشار هیدرودینامیکی اعمال شده را با استفاده از یک لایه ایزولاسیون با ضخامت ثابت در محل تماس سد و مخزن مطالعه کرد. او برای بررسی اثر لایه ایزولاسیون از روند حل تحلیلی استفاده نمود و تأثیر وجود لایه ایزولاسیون را در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد نشان داد [۵، ۶].

در سال‌های اخیر در زمینه تقویت لرزه‌ای سدهای بتنی، چن<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ تأثیر استفاده از بالشتک هوا به عنوان لایه ایزولاسیون را در کاهش پاسخ لرزه‌ای سد مطالعه کردند [۷]. آنها روند کاهش پاسخ سد را هنگام استفاده از بالشتک هوا در بالادست سد بررسی نموده و نشان دادند که با افزایش شدت زلزله تأثیر بالشتک در کاهش پاسخ بیشتر می‌شود.

پاسبانی خیوی<sup>۱۱</sup> و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ قابلیت استفاده از میراگر لاستیکی را در بهبود عملکرد لرزه‌ای سد بتنی وزنی بررسی کرده و میزان کاهش پاسخ را مطالعه نمودند. آنها برای استفاده مطلوب از قابلیت میراگر لاستیکی، با استفاده از مدل احتمالاتی هندسه بهینه را به لحاظ اقتصادی و عملکرد برای میراگر استخراج کردند [۸].

با توجه به این که سدها معمولاً در مناطق کوهستانی احداث می‌شوند، لذا وجود گسل در فواصل دور و نزدیک محور سد اجتناب‌ناپذیر است. بررسی پتانسیل لرزه‌خیزی هر گسل در فاصله دور و یا نزدیک و تأثیر زمین‌لرزه ناشی از آن بر پایداری سد، یکی از معیارهای اصلی مکان‌یابی محور سد می‌باشد. لذا بررسی دقیق تأثیر زمین‌لرزه‌های میدان‌های دور و نزدیک بر پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای در طراحی سد و ارزیابی پایداری سدهای موجود، برخوردار می‌باشد. زلزله‌های نزدیک گسل به زلزله‌هایی اطلاق می‌شود که فاصله شان از مرکز آزاد شدن انرژی کمتر از یک حد معینی باشد. هر چند به طور قطعی و دقیق نمی‌توان فاصله مشخصی برای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک تعریف کرد اما به طور معمول فرض می‌شود جنبش‌های ثبت شده در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از محل گسیختگی و کانون زلزله، نگاشت‌های حوزه نزدیک باشند [۱۳-۹]. اما مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک می‌تواند بیش از ۲۰ کیلومتر باشد [۱۴]. به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد حرکات زمین در نزدیکی گسل، رکوردهای ضبط شده حرکات زمین در این مناطق نشان دهنده انرژی بالای این زمین لرزه‌ها در شروع زلزله می‌باشد که می‌تواند آسیب و خسارت‌های فراوانی به سازه‌ها وارد کند [۱۵]. بنابراین در سال‌های اخیر در بسیاری از مطالعات به بررسی تأثیر زمین‌لرزه‌های دور و نزدیک گسل بر روی عملکرد سازه‌های مختلف مهندسی عمران نظیر ساختمان‌ها و پل‌ها پرداخته شده است [۱۶-۲۴]. آکوسه<sup>۱۲</sup> و شیمشک<sup>۱۳</sup> پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی تحت اثر زمین‌لرزه‌های دور و نزدیک گسل را مورد مطالعه قرار دادند [۲۵]. آنها دریافتند که تغییر شکل‌های ایجاد شده در سد تحت اثر زلزله نزدیک گسل بیشتر از دور از گسل می‌باشد. بایراکتار<sup>۱۴</sup> و همکاران به بررسی تأثیر زلزله‌های نزدیک گسل بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای سد بتنی وزنی پرداختند [۲۶-۲۸]. نتایج حاصل از تحقیق آنها بیان‌کننده تأثیر بیشتر زلزله نزدیک گسل بر روی جابجایی و تنش به وجود آمده در بدنه سد می‌باشد.

موارد اشاره شده در زمینه کنترل لرزه‌ای نشان می‌دهد که در طراحی سیستم‌های مهندسی، طرحی مطلوب‌تر است که علاوه بر تأمین اهداف موردنظر، به لحاظ اجرایی هزینه کمتر نیز داشته باشد. از این رو کمینه کردن هزینه و بهینه‌سازی طرح‌های مهندسی از دیرباز در علوم مهندسی موردتوجه قرار گرفته است. یکی از راه‌های کاهش تأثیر اندرکنش سد و مخزن بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای، استفاده از میراگرهای هیدرودینامیکی بر روی بدنه‌ی بالادست سد، در محل تماس با مخزن می‌باشد. استفاده از میراگرهای هیدرودینامیکی علاوه بر کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه سد، از نظر اقتصادی و اجرایی نیز دارای هزینه کمتری نسبت به سایر طرح‌ها می‌باشد. استفاده از ماهیچه بتنی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین راه‌حل‌های افزایش ایمنی سد، تنها دارای تأثیرات موضعی بر روی بدنه سد می‌باشد. این در حالی است که در زمان وقوع زلزله امکان آسیب‌دیدگی سایر قسمت‌های بدنه سد نیز وجود دارد. همچنین استفاده از بالشتک هوا با توجه به تأمین هوا و نگهداری آن به لحاظ اقتصادی و اجرایی توجیه‌پذیر نمی‌باشد.

با توجه به موارد بیان شده و تأثیر فشار هیدرودینامیکی تولید شده در اثر اندرکنش بر پاسخ لرزه‌ای، در این تحقیق در مرحله اول به قابلیت تأثیر میراگر لاستیکی در استهلاک فشار هیدرودینامیکی تولید شده و کاهش پاسخ سد بتنی وزنی پرداخته می‌شود. در ادامه تحقیق و بعد

9 Hatami

1 Chen

1 Pasbani Khiavi

1 Akkose

1 Simsek

1 Bayraktar

0

1

2

3

4

از بررسی عملکرد لایه ایزولاسیون، در مرحله بعدی با توجه به تاثیر و اهمیت زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، تاثیر و قابلیت میراگر بحث شده بر پاسخ و کنترل لرزه‌ای سیستم تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا نقش و اهمیت میراگر استفاده شده به صورت لایه ایزولاسیون بالادست در کنترل لرزه‌ای و کاهش پاسخ‌ها بخصوص برای زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک نشان داده شود.

## ۲- معادلات حاکم بر سیستم و شریط مرزی

در گذشته، اثرات دینامیکی مخزن در بحث سیستم کوپله سد- دریاچه با استفاده از روش جرم اضافی به صورت تقریبی محاسبه می‌شد. واضح است که تقریب پاسخ‌ها به کمک اضافه کردن جرم سد برای مسائلی مانند بررسی وضعیت ترک‌ها در سازه سد مناسب نمی‌باشند و می‌باید در اندیشه‌ی راه‌حل‌های دقیق‌تر بود. سیستم سد- دریاچه را می‌توان به عنوان یک سیستم کوپله در نظر گرفت، از آن جهت که دو ساختار فیزیکی متفاوت به صورت سیال و سازه در دو دامنه متفاوت تنها در مرز مشترک با یکدیگر تداخل دارند. در چنین مسائلی اندرکنش موجود سبب می‌شود که پاسخ هر دو ساختار سیال و سازه به صورت همزمان در نظر گرفته شود. معادله حاکم بر مخزن معادله انتشار موج بوده و روش تناوبی بر مبنای تغییر مکان، که به طور قطع دارای پاسخ‌های پایدار می‌باشد برای حل معادله کوپله سد- مخزن مطابق رابطه زیر بکار گرفته شده است:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} - [M]\{\ddot{U}_g\} + [Q]\{P\} \quad (1)$$

که در آن  $[M]$ ،  $[C]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی بدنه سد می‌باشند. ماتریس  $[Q]$  ماتریس ارتباط دهنده محیطها، بردار نیروی حجمی و هیدرواستاتیکی،  $\{P\}$  و  $\{U\}$  به ترتیب بردار فشار هیدرواستاتیکی و جابجایی می‌باشند.  $\{\ddot{U}_g\}$  نیز بردار مربوط به شتاب حرکت زمین است [۲۰]. شرایط مرزی در نظر گرفته برای سیستم در ادامه اشاره می‌شود.

توزیع فشار هیدرواستاتیکی در مخزن برای سیستم کوپله سد- مخزن را می‌توان به کمک معادله موج فشاری حاکم بر مخزن چنین بیان کرد:

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

که در آن  $P$  فشار هیدرواستاتیکی،  $C$  سرعت امواج صوتی در سیال و  $t$  پارامتر زمان می‌باشد. برای حل معادله (۱) نیاز به شرایط مرزی حاکم بر مخزن می‌باشد که در ادامه تشریح می‌شود.

با توجه به این که بدنه‌ی سدهای بتنی آب‌بند می‌باشند، هیچگونه جریانی در عرض مرز مشترک بین سیال و سازه وجود ندارد. با استفاده از معادله‌ی اوپلر و برخی عملیات محاسبات ریاضی، معادله‌ی زیر برای مرز مشترک بدست می‌آید:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho a_n^s \quad (3)$$

$\rho$  جرم مخصوص آب،  $n$  بردار نرمال عمود بر سطح تماس و مخزن و  $a_n^s$  شتاب نرمال سد در مرز مشترک در جهت بالادست می‌باشد. در مورد مخازن همراه با رسوبات موجود در کف آن، می‌توان فرض کرد که فشار هیدرواستاتیکی امواج برخوردکننده به کف مخزن تنها به صورت متعامد عمل کرده و در محیط رسوبات موجود در کف مخزن به صورت امواج انبساطی انتشار می‌یابد. در این حالت شرط مرزی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = \rho a_y^s \quad (4)$$

که در آن،  $a_y^s$  شتاب در مرز بین سیال و کف بستر در راستای قائم می‌باشد. در مسئله اندرکنش سیال و سازه در سدها همواره مدل کردن اجزا محدود طول دریاچه به دلیل بزرگ بودن آن نسبت به سایر ابعاد موجود بحث برانگیز بوده و به همین جهت در این مورد فرضیات و استدلال‌های مختلفی وجود دارد. در مطالعه حاضر نیز برای جذب کامل انتشار موج در جهت بالادست از شرط مرزی سامرفلد به صورت زیر استفاده شده است:

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

برای مدل‌سازی موج‌های سطحی در سطح آزاد دریاچه با صرف‌نظر از اثر کشش سطحی (موج‌های ثقلی)، معادله زیر برقرار است:

$$P = 0 \quad (6)$$

### ۳- روش تحقیق

در این تحقیق برای مدل‌سازی سیستم و انجام تحلیل لرزه‌ای از نرم‌افزار انسیس<sup>۵</sup> استفاده می‌شود. این نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزای محدود بوده و قابلیت مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده و اعمال شرایط مرزی متنوع را همراه با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال دارا می‌باشد. در نرم‌افزار انسیس المان‌های مناسبی که رفتار سد و فونداسیون و همچنین خاصیت تراکم‌پذیری آب را نشان دهد، موجود می‌باشد. برای این منظور، برای گسسته‌سازی سد و فونداسیون از عناصر هشت‌گره‌ی SOLID182 و برای آب دریاچه از عناصر چهارگره‌ی FLUID29 برای سیال مجاور و غیر مجاور سازه استفاده شده است.

یکی دیگر از قابلیت‌های نرم‌افزار انسیس امکان تعریف شتاب‌نگاشت زمین لرزه وارد بر سیستم به صورت مستقیم می‌باشد که به کل بدنه سیستم اعمال می‌شود. در این تحقیق برای انجام تحلیل دینامیکی از روش نیومارک استفاده شده است که در نرم‌افزار انسیس این روش تعریف شده و فقط نیاز به تعریف ضرایب مربوطه دارد. روش نیومارک بک روش عددی ضمنی است که به صورت غیر مشروط پایدار می‌باشد. برای برقراری پایداری عددی، پارامترهای روش نیومارک در نرم‌افزار به صورت  $\gamma_1 = 0.25$  و  $\gamma_2 = 0.5$  انتخاب شده است. اثرات میرایی نیز در نرم‌افزار انسیس قابل تعریف می‌باشد که در این مقاله برای اعمال اثرات میرایی روش ریلی انتخاب شده است.

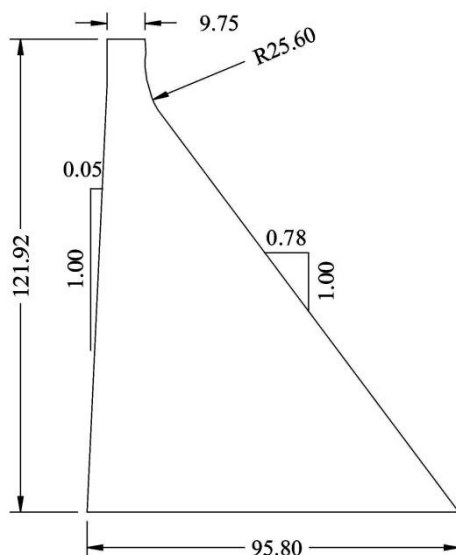
با توجه به موارد بیان شده می‌توان گفت که همه مراحل مدل‌سازی و تحلیل سیستم سد- مخزن- فونداسیون و نیز استخراج نتایج به صورت منحنی‌های تاریخچه زمانی در محیط نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود.

با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بتنی وزنی و شکل هندسی مخزن، مدل سد به صورت دوبعدی با رفتار تنش مسطح در نظر گرفته شده و اثرات اندرکنش با فونداسیون در مدل لحاظ شده است. به منظور جلوگیری از بازتاب امواج برخوردکننده به سنگ فونداسیون، از مدل فونداسیون بدون جرم استفاده شده است. در صورت لحاظ کردن جرم، نیروی زلزله به صورت مناسب به فونداسیون اعمال نمی‌شود. با در نظر گرفتن فونداسیون بدون جرم، اثرات تشدیدکننده جرم فونداسیون در مدل لحاظ نشده و صرفاً سختی آن در نظر گرفته می‌شود. اندازه مدل فونداسیون بدون جرم لازم نیست خیلی بزرگ باشد و فقط کافی است تخمین قابل قبولی برای انعطاف‌پذیری فونداسیون فراهم کند. معمولاً یک مدل فونداسیون که به اندازه ارتفاع سد در پایین دست و دو برابر آن در جهت عمق گسترش یافته است، می‌تواند این شرایط را تأمین کند.

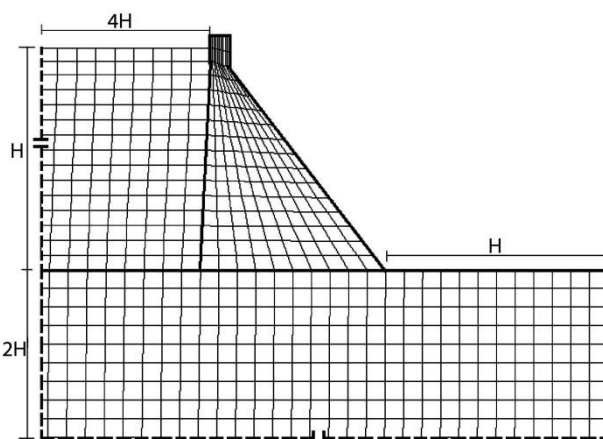
### ۴- مدل سد بتنی وزنی

به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق، سد پایین‌فالت به ارتفاع ۱۲۲ متر به صورت دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود. این سد روی رود کینک نزدیک فرسنو، کالیفرنیا واقع شده است. ساختن این سد از سال ۱۹۴۹ توسط مهندسی ارتش آمریکا آغاز شد و در سال ۱۹۵۴ به اتمام رسید. مشخصات هندسی سد پایین‌فالت و سیستم سد- مخزن- فونداسیون به همراه میراگر لاستیکی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر

به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ و مشخصات مصالح مدل در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۹]. برای میراگر لاستیکی قابل اتصال بر وجه بالادست سد می‌توان از موادی همچون رزین (لاستیک) استفاده نمود.



شکل ۱. ابعاد سد پابن فلت



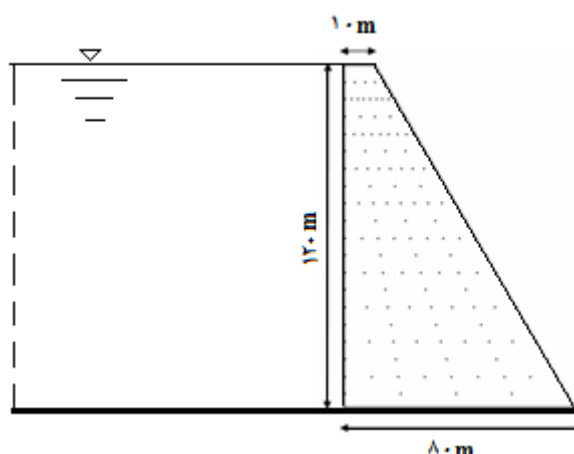
شکل ۲. مدل هندسی و گسسته‌سازی سیستم

جدول ۱. مشخصات مصالح برای دو حالت مدل [۳۰، ۶]

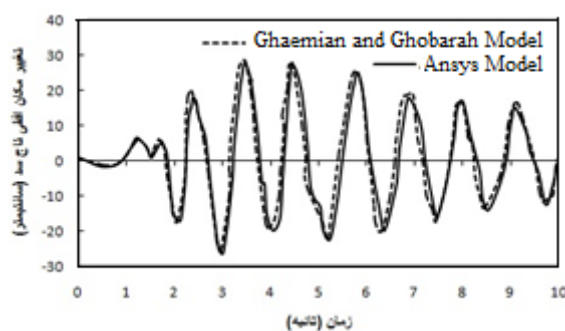
مشخصات مصالح	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	جرم مخصوص (کیلوگرم بر متر مکعب)	میرایی (درصد)	سرعت صوت در آب (متر بر ثانیه)
سد	۰/۲	۲۲/۴	۲۴۸۳	۵	-
فونداسیون	۰/۳۳	۲۲/۴	۰	۵	-
لایه ایزولاسیون	۰/۴۹۹	۰/۰۰۰۵	۱۳۰۰	۱۰	-
آب	-	-	۱۰۰۰	-	۱۴۴۰

### ۵- صحت‌سنجی نرم‌افزار و مدل اجزای محدود

برای ارزیابی دقت و قابلیت نرم‌افزار انسیس در تحلیل دینامیکی سد بتنی وزنی با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال، یک مدلی از سد بتنی وزنی مطابق شکل ۳ که در سال ۱۹۹۸ توسط قائمیان<sup>۶</sup> و گوباراه<sup>۱</sup> با استفاده از روش عددی و شبکه‌بندی متناوب با اعمال شتاب‌نگاشت السنترو مورد آنالیز قرار گرفته، انتخاب شده است [۳۱]. مخزن سد کاملاً پر بوده و مدول الاستیسیته، وزن واحد حجم و ضریب پواسون بتن به ترتیب ۳۴۳۰ مگا پاسکال، ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۲ و فرکانس اساسی سد ۶/۸۳۷ رادیان بر ثانیه است. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان تاج سد برای مدل عددی و نرم‌افزار انسیس در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان به دقت و قابلیت مناسب نرم‌افزار انسیس در تحلیل مسئله اندرکنش سد و مخزن پی برد.



شکل ۳. هندسه مدل سد مربوط به صحت‌سنجی

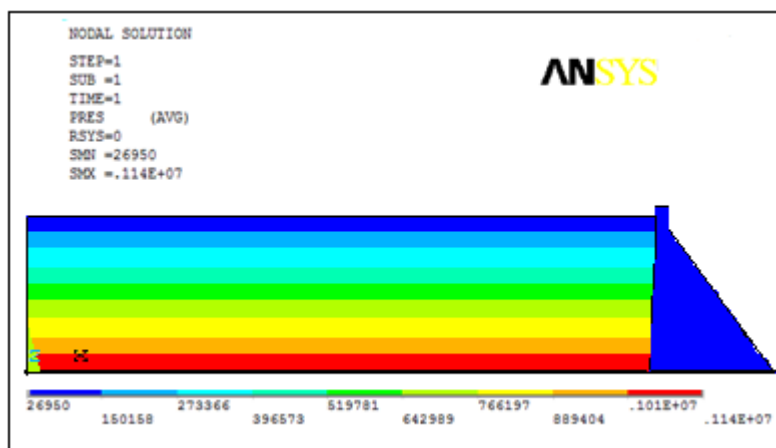


شکل ۴. مقایسه تاریخیچه زمانی تغییر مکان حداکثر تاج سد

جهت صحت‌سنجی مدل اجزای محدود تهیه شده برای سد پایین‌فالت و دقت نرم‌افزار انسیس، در ابتدا مدل سد انتخاب شده به صورت استاتیکی تحلیل شده و کانتور توزیع فشار هیدرواستاتیکی مطابق شکل ۵ استخراج شده است. این کانتور مقدار فشار هیدرواستاتیکی کف مخزن را برابر با ۱/۱۴ مگاپاسکال نشان می‌دهد.

<sup>۶</sup>Ghaemian  
<sup>۱</sup> Ghojarah





شکل ۵. کانتور توزیع فشار هیدرواستاتیکی در مخزن سد

با توجه به امکان محاسبه فشار هیدرواستاتیکی به صورت تحلیلی می‌توان توزیع فشار حاصل از مدل و راه‌حل تحلیلی را باهم مقایسه نمود. مقدار فشار هیدرواستاتیک به وجود آمده در کف مخزن با استفاده از روند حل تحلیلی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \rho gh = 1000 * 9.81 * 116 = 1137960 Pa = 1.13796 MPa \quad (۶)$$

که در آن  $h$  نشان‌دهنده ارتفاع مخزن و  $\rho$  نشان‌دهنده چگالی آب می‌باشد.

مقایسه نتیجه حاصل از روش عددی و تحلیلی برای مقدار فشار در کف مخزن، دقت قابل قبول مدل اجزای محدود تهیه شده با نرم‌افزار انسیس را نشان می‌دهد.

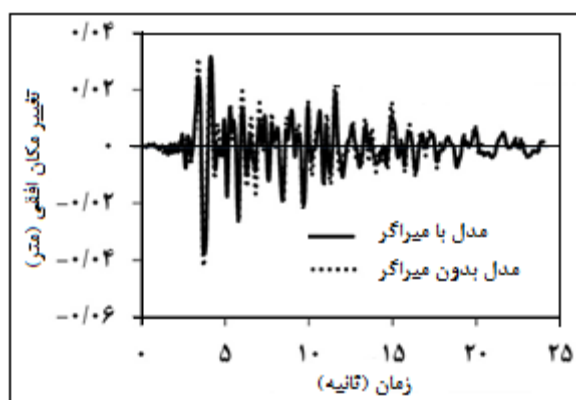
## ۶- تحلیل مدل و ارزیابی نتایج

با آنالیز مدل، مجهولات موردنظر که شامل تغییر مکان‌ها و تنش‌های سد و نیز فشار هیدرودینامیکی مخزن هستند، استخراج می‌شود. به منظور آنالیز دینامیکی رکوردهای حوزه دور و نزدیک زمین‌لرزه‌های نورث‌ریچ و سن فرناندو که در منطقه کالیفرنیا رخ داده‌اند، مطابق جدول ۲ از سایت Peer استخراج شده است. ضرایب میرایی ریلی با استفاده از فرکانس اول و دوم سیستم برابر  $\alpha = 0.5202$  و  $\beta = 0.0046$  استخراج شده است. بعد از مدل‌سازی و انجام تحلیل دینامیکی، نتایج مربوط به پاسخ‌های تغییر مکان، تنش‌های به وجود آمده در بدنه سد و فشار هیدرودینامیکی به وجود آمده در مخزن استخراج می‌شود. با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق، بررسی تأثیر لایه ایزولاسیون در حوزه‌های دور و نزدیک زلزله بر پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی است، مدل مورد نظر برای دو حالت سد با لایه ایزولاسیون و سد بدون لایه ایزولاسیون مورد تحلیل قرار گرفته است. در این مقاله محدوده زلزله‌های نزدیک گسل، شعاع ۱۵ کیلومتری مرکز سطحی زلزله و فراتر از این فاصله، حوزه دور زلزله در نظر گرفته شده است [۹].

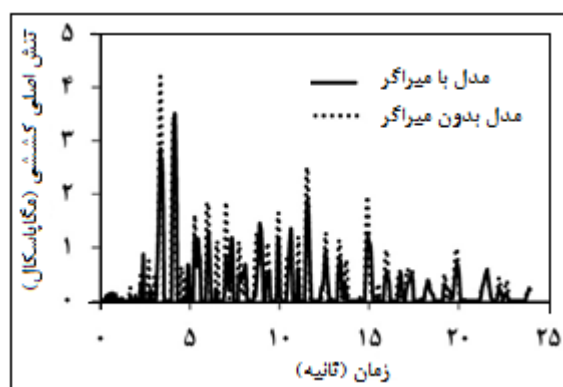
جدول ۲. مشخصات رکوردهای لرزه‌ای

فاصله از گسل (Km)	نام ایستگاه	زمین‌لرزه	
۸/۶۶	Arleta-Nordhoff Fire Sta	حوزه نزدیک	نورث‌ریچ
۸۵/۴۳	Mojave-Hwys 14 & 58	حوزه دور	
۱/۸	Pacoima Dam (upper left about)	حوزه نزدیک	سن فرناندو
۸۹/۷۲	Cedar Springs_Allen Ranch	حوزه دور	

پاسخ تاریخیچه زمانی جابجایی افقی تاج سد و تنش اصلی حداکثر در پاشنه سد تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریج برای دو حالت مدل، به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

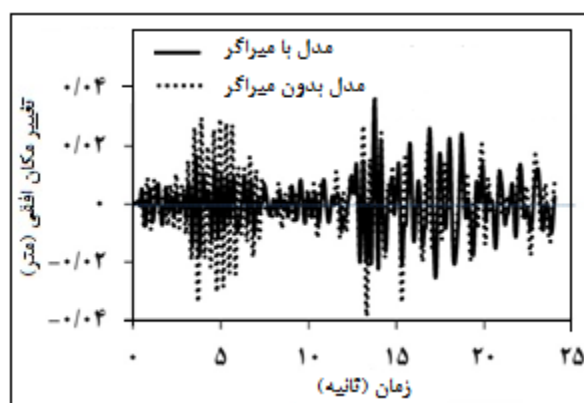


شکل ۶. مقایسه منحنی پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان افقی تاج سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریج

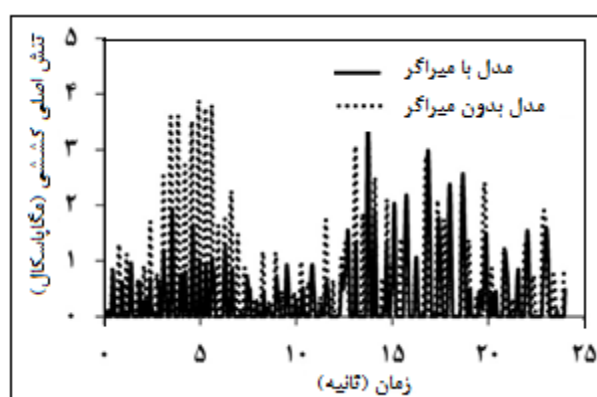


شکل ۷. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تنش اصلی حداکثر پاشنه سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه نزدیک نورث‌ریج

مقایسه منحنی‌ها کاهش تغییر مکان افقی تاج سد و تنش اصلی حداکثر در اثر استفاده از میراگر لاستیکی را نشان می‌دهد. همچنین برای بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای به وجود آمده در بدنه‌ی سد، تحت زلزله حوزه دور نورث‌ریج، نتایج مربوط به پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان تاج سد و تنش اصلی کششی در نقطه‌ی بحرانی برای دو حالت سد بدون میراگر لاستیکی و سد با میراگر لاستیکی، به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل می‌توان به تأثیر میراگر لاستیکی بر روی پاسخ‌های لرزه‌ای سد بتنی وزنی پی برد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد هنگامی که میراگر لاستیکی در نظر گرفته می‌شود پاسخ لرزه‌ای وارده بر سد کاهش می‌یابد.

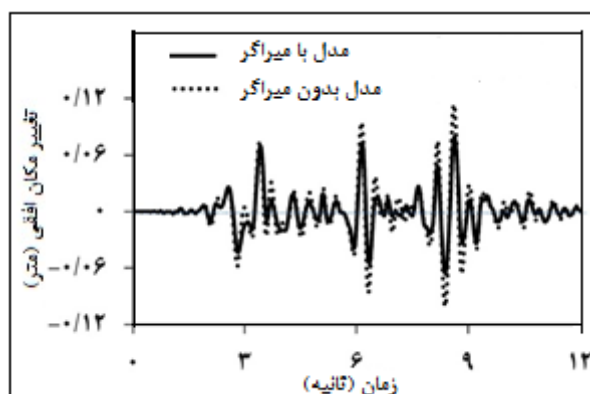


شکل ۸. مقایسه منحنی پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان ماکزیمم تاج سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه دور نورث ریج

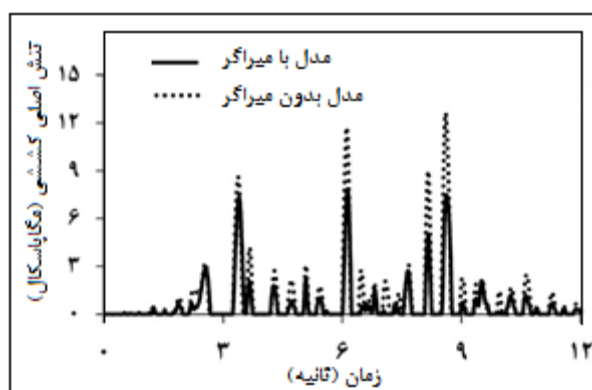


شکل ۹. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تنش اصلی حداکثر پاشنه سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه دور نورث ریج

در ادامه برای بررسی تأثیر شدت و محتوای زلزله بر پاسخهای لرزهای، مدل مورد نظر تحت اثر زلزله‌ی سن‌فرناندو مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج نیز استخراج شده است. پاسخهای تاریخیچه زمانی تغییر مکان تاج سد و تنش اصلی کششی در پاشنه سد تحت اثر زلزله‌ی حوزه نزدیک سن‌فرناندو به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.



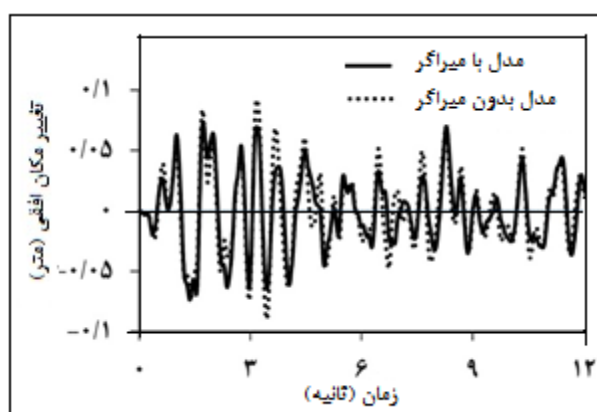
شکل ۱۰. مقایسه منحنی پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان ماکزیمم تاج سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه نزدیک سن‌فرناندو



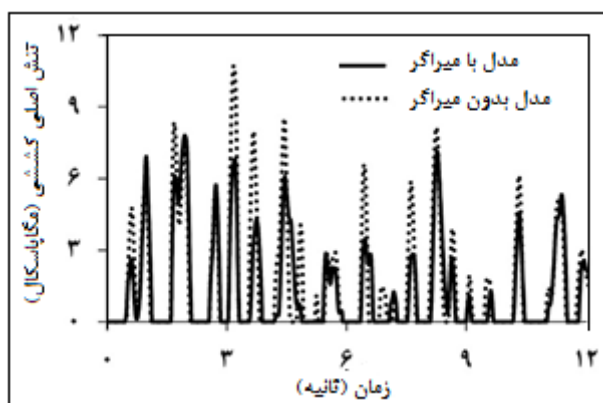
شکل ۱۱. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تنش اصلی حداکثر پاشنه سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه نزدیک سن فرناندو

بررسی نمودارها، کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای وارده بر سد تحت اثر زمین‌لرزه حوزه نزدیک سن فرناندو در اثر استفاده از لایه ایزولاسیون را نشان می‌دهد.

تحت اثر زلزله حوزه دور سن فرناندو پاسخ تاریخیچه زمانی تنش‌های اصلی کششی و تغییر مکان ماکزیمم در نقطه‌ی بحرانی برای دو حالت سد بدون میراگر لاستیکی و سد با میراگر لاستیکی، به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ملاحظه می‌گردد وجود لایه ایزولاسون سبب کاهش قابل ملاحظه پاسخ‌های لرزه‌ای سد شده است.



شکل ۱۲. مقایسه منحنی پاسخ تاریخیچه زمانی تغییر مکان ماکزیمم تاج سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه دور سن فرناندو



شکل ۱۳. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تنش اصلی کششی پاشنه سد برای دو حالت مدل تحت زلزله حوزه دور سن فرناندو

و در خاتمه برای بررسی دقیق تر چگونگی تأثیر میراگرلاستیکی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سد تحت اثر زمین‌لرزه‌های حوزه دور و نزدیک، نتایج حاصل از منحنی‌های نشان داده شده به صورت عددی ارائه شده است. جداول ۳ و ۴ مقادیر عددی پاسخ‌های تنش اصلی کششی و تغییر مکان حداکثر در تاج سد را برای حوزه‌های دور و نزدیک برای دو حالت سد با میراگرلاستیکی و سد بدون میراگرلاستیکی نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه تأثیر میراگرلاستیکی بر پاسخ حداکثر تنش اصلی کششی در پاشنه سد بر حسب مگاپاسکال

زمین لرزه	سد بدون میراگر	سد با میراگر	درصد کاهش
میدان نزدیک نورث ریج	۴/۲	۳/۵	۱۶/۷
میدان دور نورث ریج	۳/۸	۳/۴	۱۰/۷
میدان نزدیک سن فرناندو	۱۲/۶	۷/۳۶	۴۱/۶
میدان دور سن فرناندو	۱۰/۷	۷/۷	۲۸/۰

جدول ۴. مقایسه تأثیر میراگرلاستیکی بر پاسخ حداکثر تغییر مکان تاج سد بر حسب سانتیمتر

زمین لرزه	سد بدون میراگر	سد با میراگر	درصد کاهش
میدان نزدیک نورث ریج	۲/۴	۳/۷	۱۰/۷
میدان دور نورث ریج	۳/۸	۳/۶	۶/۵
میدان نزدیک سن فرناندو	۱۱/۳	۷/۹	۳۰/۴
میدان دور سن فرناندو	۹/۲	۷/۳	۲۰/۶

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول (۲) و (۳) می‌توان دریافت که میراگرلاستیکی علاوه بر اینکه در هر دو حوزه دور و نزدیک سبب کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سد شده است، به کارگیری آن در حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور کاهش بیشتری در پاسخ‌های لرزه‌ای سد ایجاد کرده است. با توجه به جداول مشاهده می‌شود که درصد کاهش پاسخ تغییر مکان برای تنش اصلی کششی به وجود آمده در پاشنه سد برای زلزله حوزه نزدیک نورث ریج و سن فرناندو به ترتیب حدود ۱۷ درصد و ۴۲ درصد می‌باشد، در حالیکه برای زلزله حوزه دور این مقادیر به حدود ۱۱ و ۲۸ درصد می‌رسد.

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق برای نشان دادن اهمیت مدل‌سازی سد بتنی وزنی همراه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش و بررسی عملکرد میراگرلاستیکی در حوزه‌های دور و نزدیک زلزله، سد پایین فلت به عنوان مطالعه موردی، با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی و تحلیل شد. برای آنالیز لرزه‌ای، مؤلفه‌های افقی و قائم حوزه‌های دور و نزدیک زمین‌لرزه‌های نورث ریج و سن فرناندو به مدل اعمال شد. بعد از تحلیل مدل، نتایج حاصل که تغییر مکان افقی و تنش اصلی حداکثر می‌باشند، استخراج شدند. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مدل، می‌توان به کاهش پاسخ تغییر مکان افقی و تنش به وجود آمده در بدنه سد هنگام در نظر گرفتن میراگرلاستیکی پی برد. این میزان کاهش برای تغییر مکان افقی تاج سد تا حدود ۳۱ درصد و برای تنش کششی حداکثر تا حدود ۴۲ درصد نیز می‌رسد. دلیل این امر قابلیت بالای میراگرلاستیکی در جذب و استهلاک فشار هیدرودینامیکی تولید شده داخل مخزن در هنگام وقوع زلزله می‌باشد. علاوه بر این مقایسه عملکرد میراگرلاستیکی در حوزه‌های دور و نزدیک نشان دهنده عملکرد بهتر میراگرلاستیکی در حوزه‌های نزدیک نسبت به دور می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که استفاده از میراگرلاستیکی پاسخ لرزه‌ای سد را برای هر دو نوع زمین‌لرزه حوزه دور و نزدیک می‌تواند کاهش دهد. بنابراین میراگرلاستیکی می‌تواند انتخاب مناسبی در جهت کنترل لرزه‌ای سدهای قدیمی یا در حال ساخت به‌ویژه در

حوزه‌های نزدیک زلزله باشد. در خاتمه با توجه به تفاوت پاسخ‌های مربوط به زمین‌لرزه‌های انتخاب شده پیشنهاد می‌شود که برای هر منطقه مربوط به ساختگاه سد لازم است که شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله همان ناحیه انتخاب شده و طراحی انجام شود.

## مراجع

1. Liu, H., et al., *Simulation analysis theory and experimental verification of air-cushion isolation control of high concrete dams*. Science China Technological Sciences, 2011. 54(11): p. 2854-2868.
2. Lombardo, V., L. Mikhailov, and I. Semenov. *Studies and design of earthquake-resistant concrete dams*. in *ICOLD executive meeting 55. International symposium on earthquakes and dams*. 1987.
3. Hall, J.F. and B. El-Aidi. *Hydrodynamic isolation of concrete dams*. in *Seismic Engineering: Research and Practice*. 1989. ASCE.
4. Hall, J., J. Dowling, and B. El-Aidi, *Defensive earthquake design of concrete gravity dams*. Dam Engineering, 1992. 3(4): p. 249-263.
5. Hatami, K. and A. Ghobarah. *Reduction of the seismic response of concrete gravity dams using hydrodynamic isolation*. in *Proceedings of the seventh Canadian conference on earthquake engineering, Montreal*. 1995.
6. Hatami, K., *Effect of reservoir boundaries on the seismic response of gravity dams*, 1997.
7. Chen, J., F. Xiong, and Q. Ge, *Study on air-cushion isolation control of concrete dam and its anti-cracking effect*. Journal of Vibroengineering, 2018. 20(4): p. 1761-1773.
8. Khiavi, M.P., M.A. Ghorbani, and A.G. Rahmati, *Seismic Optimization of Concrete Gravity Dams Using a Rubber Damper*. International Journal of Acoustics & Vibration, 2020. 25(3).
9. Ambraseys, N. and J. Douglas, *Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions*. Soil dynamics and earthquake engineering, 2003. 23(1): p. 1-18.
10. Alavi, B. and H. Krawinkler, *Effects of near-fault ground motions on frame structures*. 2001: John A. Blume Earthquake Engineering Center Stanford.
11. Bray, J.D. and A. Rodriguez-Marek, *Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region*. Soil dynamics and earthquake engineering, 2004. 24(11): p. 815-828.
12. Chopra, A.K. and C. Chintanapakdee, *Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2001. 30(12): p. 1769-1789.
13. Zeinoddini, M., F. Ahmadvour, and H.M. Nikoo, *Seismic assessment of gravity quay-wall structures, subjected to near-fault ground excitations*. Procedia engineering, 2011. 14: p. 3221-3228.
14. Zhang, J. and Y. Tang, *Dimensional analysis of structures with translating and rocking foundations under near-fault ground motions*. Soil dynamics and earthquake engineering, 2009. 29(10): p. 1330-1346.
15. Liao, W.-I., C.-H. Loh, and B.-H. Lee, *Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions*. Engineering Structures, 2004. 26(14): p. 2173-2183.
16. Çavdar, Ö., *Probabilistic sensitivity analysis of two suspension bridges in Istanbul, Turkey to near-and far-fault ground motion*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012. 12(2): p. 459-473.
17. Dicleli, M. and S. Buddaram, *Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect*. Engineering Structures, 2007. 29(1): p. 21-32.
18. Jalali, R.S., M.B. Jokandan, and M.D. Trifunac, *Earthquake response of a three-span, simply supported bridge to near-field pulse and permanent-displacement step*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012. 43: p. 380-397.
19. Mazza, F. and A. Vulcano, *Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated rc framed buildings*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012. 41(2): p. 211-232.
20. Mirzabozorg, H., *Staggered solution scheme for three-dimensional analysis of dam reservoir interaction*. Dam Engineering, 2003(3): p. 147-179.
21. Mortezaei, A., H.R. Ronagh, and A. Kheyroddin, *Seismic evaluation of FRP strengthened RC buildings subjected to near-fault ground motions having fling step*. Composite Structures, 2010. 92(5): p. 1200-1211.

22. Rofooei, F.R. and R. Imani, *Evaluating the damage in steel MRF under near field earthquakes from a performance based design viewpoint*. Procedia Engineering, 2011. 14: p. 3111-3118.
23. Sharbatdar, M., et al., *Seismic response of base-isolated structures with LRB and FPS under near fault ground motions*. Procedia Engineering, 2011. 14: p. 3245-3251.
24. Trifunac, M.D., *The role of strong motion rotations in the response of structures near earthquake faults*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009. 29(2): p. 382-393.
25. Akköse, M. and E. Şimşek, *Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction*. Applied Mathematical Modelling, 2010. 34(11): p. 3685-3700.
26. Kartal, M.E. and T. Türker, *Near-fault ground motion effects on the nonlinear response of dam-reservoir-foundation systems*. Structural Engineering and Mechanics, 2008. 28(4): p. 411-442.
27. Bayraktar, A., et al., *Comparison of near-and far-fault ground motion effect on the nonlinear response of dam-reservoir-foundation systems*. Nonlinear Dynamics, 2009. 58(4): p. 655-673.
28. Bayraktar, A., et al., *The effect of reservoir length on seismic performance of gravity dams to near-and far-fault ground motions*. Natural hazards, 2010. 52(2): p. 257-275.
29. Alembagheri, M. and M. Seyedkazemi, *Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015. 44(1): p. 41-58.
30. Løkke, A. and A.K. Chopra, *Response spectrum analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation interaction*. Journal of Structural Engineering, 2015. 141(8): p. 04014202.
31. Ghaemian, M. and A. Ghobarah, *Staggered solution schemes for dam-reservoir interaction*. Journal of fluids and structures, 1998. 12(7): p. 933-948.