

بررسی تأثیر خصوصیات مکانیکی مصالح لایه ایزولاسیون بر بهبود پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی

امیر پیروز نیا^{۱*}

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر خصوصیات مکانیکی مصالح لایه ایزولاسیون در مرز بین سد و مخزن جهت بهبود پاسخ لرزه‌ای سد وزنی با درنظر گرفتن اثرات اندرکنش سد-مخزن پرداخته می‌شود. از آنجایی که سدهای بتنی، دارای میرایی بالایی در مقایسه با سایر سازه‌ها نیستند لذا به کارگیری لایه‌ای با میرایی بالا در ناحیه‌ی مرزی محل تماس سد و مخزن می‌تواند راهکار امیدوارکننده جهت کاهش پاسخ لرزه‌ای سدها باشد. انتخاب و به کارگیری مصالح لایه ایزولاسیون مناسب و قابل اجرا با در نظر گیری خصوصیات مکانیکی آن جهت دستیابی به بهبود پاسخ لرزه‌ای سد، جزو اهداف پژوهش است. به عنوان مطالعه‌ی موردنی، سد کوینا در کشور هند با نرم‌افزار انسیس به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی گردیده و آنالیز دینامیکی به روش نیومارک با اعمال تؤام مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه کوینا مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها تحت حالتی که در آن، سد بدون لایه و دارای لایه‌ای متشکل از سه نوع ماده تحت عنوانین چوب‌پنبه، پلی بوتادین الاستومر و لاستیک به ضخامت ثابت ۱۵۰ سانتی‌متر بوده است که نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها، تأثیر لایه نرم در کاهش پاسخ‌های مربوطه را نشان می‌دهند. دلیل این امر استهلاک امواج فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن هنگام وقوع زمین‌لرزه به وسیله‌ی لایه است.

واژه‌های کلیدی

آنالیز دینامیکی، اندرکنش، خصوصیات مکانیکی، سد وزنی، لایه ایزولاسیون.

* پژوهشگر دکترای عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان. amir.pirooznia@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۹

مقدمه

در ایران به جهت وجود مشکلات ناشی از کمبود آب و شرایط اقلیمی خاص، همواره آب به عنوان مائدای بسیار ارزشمند و راهبردی مدنظر بوده است. به طوری که این موضوع سبب گردید تا بندسازی، سدسازی و احداث دیگر تأسیسات ذخیره‌سازی و انتقال آب در آثار بجامانده در فرهنگ و تمدن ایرانی، نمود خاصی داشته باشد.

بارجوع به مطالعات تحلیلی و تجربه‌های واقعی، زمین‌لرزه‌های مختلف بروز مشکلات فراوانی در سدهای بتی را نشان می‌دهند. درنتیجه، به دلیل نگرانی برای اینمی لرزه‌ای سدها، رفتار لرزه‌ای سدهای بتی موضوع مطالعات جامعی بوده است. سدها از جمله مهم‌ترین سازه‌هایی هستند که باید در تحلیل، طراحی و ساخت آنها دقت کافی جهت اینمی بودن هر چه بیشتر طرح به کار برد شود. از سویی دیگر، با توجه به حجم عملیات و پیچیدگی اجرای این‌گونه سازه‌ها، جنان چه فقط اینمی مدنظر قرار گیرد، طرح غیراقتصادی و در مواردی غیرعملی خواهد شد. بنابراین به کار بردن روش‌های نوآورانه می‌تواند در افزایش دوام سدهای بتی وزنی در برابر زمین‌لرزه، پاسخ لرزه‌ای مناسب آن، کاهش هزینه‌های احداث و زمان اجرای پروژه سد، صرفه‌جویی در مصرف مواد و منابع و انرژی و حتی اجرای سد در مناطقی که دسترسی زیادی به مصالح اینبوه که در احداث سد لازم است، امکان‌پذیر می‌شود. در طراحی سامانه‌های مهندسی، طرحی مطلوب‌تر است که علاوه بر تأمین اهداف موردنظر، هزینه‌ی کمتری نیز داشته باشد. از این‌رو، کمینه کردن هزینه و بهینه‌سازی طرح‌های مهندسی

از دیرباز در علوم مهندسی مورد توجه قرار گرفته است.

مدل‌سازی اثرات اندرکنش در مسائل مربوط به تحلیل لرزه‌ای سدها دارای سابقه طولانی است. اولین مطالعه را در این زمینه، وسترگارد^۱ در سال ۱۹۳۳ ارائه داد. چوپرا^۲ در سال ۱۹۶۷ اثرات تراکم‌پذیری سیال را روی نیروی ناشی از اندرکنش سازه و سیال بررسی کرد. مدل فیزیکی او مشابه با مدل وسترگارد بود. در بیشتر تحقیقات انجام شده با فرض صلب بودن سد، نیروهای ناشی از اندرکنش در حین حرکت لرزه‌ای زمین

⁸ Lombardo

⁹ Air-Curtain

¹⁰ Hall

¹¹ El-Aidi

¹² Hall

¹ Westergaard

² Chopra

³ Hanna

⁴ Humar

⁵ Lee

⁶ Tsai

⁷ Reflective

حاتمی در سال ۱۹۹۶، با انتخاب مدل ساده برای سیستم سد و مخزن کاهش فشار هیدرودینامیکی اعمال شده را با استفاده از یک لایه‌ی ایزولاسیون با ضخامت ثابت بررسی کرد. او برای بررسی اثر لایه‌ی ایزولاسیون از روند حل تحلیلی استفاده نمود و تأثیر وجود پرده‌ی جdasاز را در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد، نشان داد.

در تحقیقات اخیر نیز ژانگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۱، تأثیر بالشتک هوای^۶ بر کاهش پاسخ لرزه‌ای سد جینپینگ^۷ به ارتفاع ۳۰۵ متر را با استفاده از مدل عناصر محدود مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای مدل سازی و تحلیل از فرمول‌بندی اویلری-لاگرانژی^۸ استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از بالشتک هوای در وجه بالادست، فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر وجه بالادست را تا حدود ۸۰ درصد و تنش‌های اصلی را تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد.

میرزا بزرگ و همکاران (۲۰۱۲)، تأثیر پرده هوای بر کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر وجه بالادست سد قوسی امیرکبیر بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که پرده جdasاز، اثرات اندرکنش بین سد و مخزن را تا مقدار زیادی از بین می‌برد.

در طول زلزله، سهم فشار هیدرودینامیکی در پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی قابل توجه است. برآیند تنש‌ها، منجر به آغاز و گسترش ترک‌های داخلی سد در طول رخداد لرزه‌ای قوی می‌گردد. راهکار صریح برای کاهش پاسخ سد بتنی این است که میرایی سازه‌ای آن به مقدار بالایی، افزایش یابد؛ اما به دلیل ساختار سازه‌ای سد و خصوصیات مصالح بتن سد، کم پیش از آید که بتوان در زمینه‌ی میرایی سازه‌ای سد از لحظه کاهش پاسخ لرزه‌ای، کاری از پیش بردازنا در راستای دستیابی به اهداف ذکر شده در بالا، روش‌های مختلفی در چند دهه‌ی اخیر ارائه شده است؛ و محققین را بر آن داشته که به توسعه‌ی روش‌های نوینی پردازنند که با استفاده از آن‌ها و با صرف زمان کمتر به طرح بهینه برای سدهای بتنی وزنی دست یابند. یکی از این روش‌های نوین، به کارگیری لایه‌ای از مواد سبک و ارزان و بادوام و کاربردی و متصل شونده به بدنه‌ی بالادست سد است. در این پژوهش برای دستیابی به طرح بهینه موردنظر باید به بررسی تأثیر خصوصیات مکانیکی مصالح برای بهبود

در پاسخ سد بتنی حاصل نشد. اگر حجم پرده‌ی جdasاز کم شود، اثر جدایی در کاهش فشار هیدرودینامیکی روی سد کاهش می‌باشد. این امر، ممکن است در هنگام نشت هوای داخل ظرف به علت تغییرات دما، ارتعاشات سد و سیستم جدایی در هنگام زلزله انفاق بیفتد. درنتیجه، طرح پرده‌ی جdasاز نیاز به هزینه اضافی و نگهداری برای رسیدن به یک اطمینان بالا است.

نظریه‌ی کاهش فشار هیدرودینامیکی در سد با به کارگیری یک پرده‌ی هوایی در سمت بالادست بدنه‌ی سد به وسیله‌ی شینین^۱ در سال ۱۹۹۲ مورد آزمون قرار گرفت. او پرده‌ی هوای را در فرم‌ها و شکل‌های حباب‌های هوای و مجراهای هوایی مورد بررسی قرار داد. نظریه‌ی حباب هوای، به دلیل نیاز به مقدار زیادی هوای برای فراهم آوردن لایه‌ی هوای پایدار، عملی به نظر نمی‌رسید. همچنین هزینه‌ی گرافی برای نظریه‌ی حباب هوای به عنوان یک نوع ایزولاسیون فعل وجود داشت.

ساوینوف^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۲، مطالعات علمی و نظری درباره‌ی تأثیر پرده‌های هوایی در ایزولاسیون هیدرودینامیکی سدها را پیش برداشتند. آن‌ها، رفتار مکانیکی خطی در طول عمق پرده را مورد بررسی قرار دادند. ساوینوف و همکاران اشاره کردند که تراکم پذیری آب، تأثیر طرح پرده‌ی ایزولاسیون هوایی را افزایش می‌دهد.

گلیس^۳ و همکاران (۱۹۹۲) و آسکوف^۴ و همکاران (۱۹۹۲) نظریه‌ی ایزولاسیون هیدرودینامیکی را به وسیله‌ی آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی و همچنین در نمونه‌ی اصلی مجهر شده با پرده‌ی هوایی، امتحان کردند. ایشان نتیجه گرفتند که کاهش قابل توجهی در نیروی هیدرودینامیکی در سد به علت تأثیر لایه‌ی ایزولاسیون رخ داده است. همچنین دریافتند که اگر حجم مخصوص هوای در پرده، کاهش یابد تأثیر ایزولاسیون در کاهش فشار هیدرودینامیکی در سد کم می‌شود. این به علت نشت هوای به بیرون مجراهای تحت تأثیرات تغییرات درجه‌ی هوای بیو ارجانیسم‌ها و لرزش‌های سد و سیستم ایزولاسیون به دلیل رخدادهای لرزه‌ای انفاق می‌افتد. درنتیجه، طرح پرده‌ی هوای ایزولاسیونی مستلزم صرف هزینه‌های اضافی و نگهداری در طول دوران بهره‌برداری است.

⁵ Zhang

⁶ Air-Cushion

⁷ Jinping

⁸ Eulerian-Lagrangian Formulation

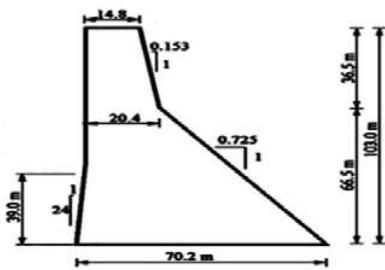
¹ Sheinin

² Savinov

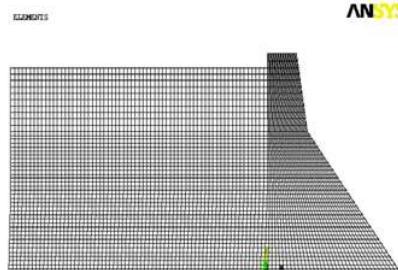
³ Gellis

⁴ Askov

کوینا^۴ در کشور هند تحت آنالیز و تحلیل قرار گرفته شده است. برای رسیدن به یک نتیجه‌ی مطلوب در پژوهش موجود، یک لایه‌ی نرم به سطح رویه‌ی بن سد به ضخامت ($t=15.0\text{ cm}$) در سراسر ارتفاع سد وزنی متصل شده است. با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بنی و وزنی و شکل هندسی مخزن، مسئله به صورت سهبعدی در نظر گرفته شده است. هدف از در نظرگیری بعد سوم به اندازه عرض واحد بلندترین بلوک سد (11 m) با المان‌های سهبعدی برای تحلیل دو بعدی با رفتار کرنش مسطح در جهت مدل‌سازی و آنالیز لرزه‌ای سد وزنی در نرم‌افزار انسیس^۵ انجام شده است. برای این منظور، عناصر مناسبی که رفتار تراکم‌پذیری سیال را نمایش دهد و همچنین برای مرز دوردست قطع شده نیز از شرط مرزی سامرفلد استفاده شده است. مشخصات هندسی سد بنی وزنی کوینا در شکل (۱)، مدل مشبندی شده سیستم سد - مخزن در شکل (۲) با فونداسیونی صلب، مخزنی بر از آب تا تراز $96/5$ متری ارتفاع سد و به طول چهار برابر ارتفاع سد ارائه شده است. همچنین مدل هندسی دارای لایه یکپارچه در محل تماس سد - مخزن به ارتفاع 10^3 m در شکل (۳) نشان داده شده است. مدل دارای لایه‌ای متشکل از سه نوع ماده تحت عنوانی چوب‌پنبه^۶، پلی بوتا دین الاستومر^۵ و لاستیک^۶ است.



شکل (۱): ابعاد هندسی مقطع عرضی سد بنی وزنی کوینا



شکل (۲): مدل سد - مخزن

پاسخ لرزه‌ای تنشهای اصلی سد بنی وزنی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

مدل اندرکنش آب و سازه

شرایط مرزی برای معادله‌ی حاکم در زیر توضیح داده شده است:

شرط مرزی بالادست مخزن

با لرزش سد، اگر طول مخزن نامحدود فرض شود، امواج فشاری هیدرودینامیکی در مخزن و انتشار به سمت بالادست تولید می‌شود و سپس این امواج حذف می‌شود.

باید توجه کرد که طول مخزن به عنوان یک طول محدود در مدل‌سازی عددی فرض می‌شود؛ بنابراین یک مرز مصنوعی با اثری مشابه به مخزن نامحدود به کار برده می‌شود. این مرز بر پایه شرط مرزی سامرفلد^۱ مدل‌سازی می‌شود:

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

شرط مرزی سطح آزاد

با صرف نظر کردن از امواج سطحی شرط مرزی موردنظر به صورت زیر است:

$$P = 0 \quad (2)$$

شرط مرزی محل تماس سد و مخزن

در مرز مخزن و سد، اندرکنشی بین این دو اتفاق می‌افتد که درنتیجه نیروی اینرسی ناشی از حرکت دیواره مخزن است؛ بنابراین فشار به کار برده شده روی دیواره مخزن به وسیله‌ی نیروی اینرسی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (3)$$

در این معادله، ρ دانسیته‌ی سیال و \ddot{u}_n بردار شتاب سازه در مسیر عمود بر مرز مشترک سیال و سازه هستند.

نحوه تحلیل سیستم و معرفی مدل‌ها

برای انتخاب و به کارگیری مصالح لایه ایزولاسیون مناسب و قابل اجرا با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی آن در راستای دست یافتن به بھبود پاسخ لرزه‌ای سد بنی وزنی، پاسخ سد

⁴ Cork

⁵ Polybutadiene-elastomer

⁶ Rubber

¹ Sommerfeld

² Koyna

³ ANSYS

۵/۰ است. همچنین به دلیل عمق و ارتفاع زیاد مخزن سد بتنی وزنی، از اثر امواج سطحی آب صرف نظر شده و فشار در سطح آزاد مخزن، صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین مصالح سد بتنی وزنی دارای رفتار همگن، خطی و ایزوتروپیک فرض می‌شود که برخی اطلاعات درباره‌ی مشخصات مصالح سیال و سازه در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول (۱): مشخصات مصالح سازه‌ای (سد) و سیال (آب)

سرعت صوت (m/s)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m³)	مصالح
-	۰/۲	۳۱	۲۶۴۳	بتن سد
۱۴۴۰	-	-	۱۰۰۰	آب مخزن

برای مدل‌سازی مصالح بدنی سد وزنی بتنی از المان SOLID65 که ۸ گرهی سه‌بعدی با درجات آزادی x و y است استفاده شده است. در بخش اندرکنش مخزن با پی‌صلب برای آب مخزن از المان FLUID30 و ۸ گرهی سه‌بعدی آکوستیک استفاده شده است که یک المان اویلری- لاگرانژی است و از فشار به عنوان پارامتر گرهی استفاده می‌کند. در مقایسه با دیدگاه لاگرانژی- لاگرانژی که از جابه‌جایی به عنوان پارامتر گرهی استفاده می‌کند، به تعداد کمتری از معادلات کل سیستم منجر شده و حجم محاسبات کمتری نیاز دارد. اطلاعات درباره‌ی خصوصیات مکانیکی مصالح لایه اعمالی در محل تماس سد - مخزن با مصالح چوب‌پنبه، پلی بوتادین الاستومر و لاستیک در جدول (۲) مشخص شده است:

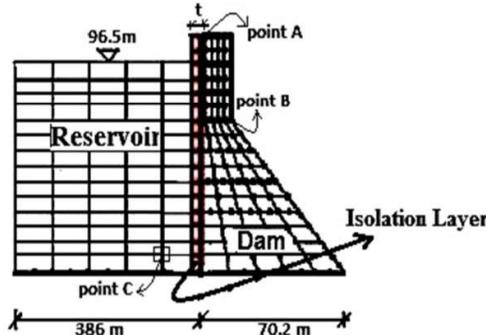
جدول (۲): خصوصیات مکانیکی مصالح لایه ایزولاسیون

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی (kg/m³)	مصالح
۰/۲۵	۳۲	۱۸۰	چوب‌پنبه
۰/۴۹	۱/۶	۹۱۰	پلی بوتادین الاستومر
۰/۴۹۹	۰/۵	۱۳۰۰	لاستیک

نتایج

تحلیل‌های مودال سیستم

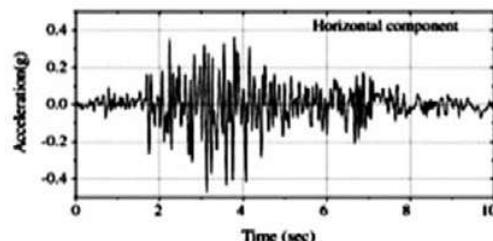
برای بررسی رفتار دینامیکی سد، باید فرکانس مودهای ارتعاش سد محاسبه شود تا بتوان با داشتن ضرایب میرایی^۲



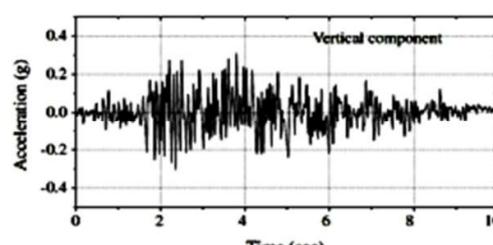
شکل (۳): مدل دارای لایه یکپارچه متشکل از مصالح چوب‌پنبه، پلی بوتادین الاستومر و لاستیک

برای انجام تحلیل لرزه‌ای و انتگرال‌گیری عددی از روش نیومارک^۱ استفاده شده که پارامترهای آن به صورت $\beta = ۰/۰/۵$ و $\gamma = ۰/۵$ انتخاب شده و گام زمانی برابر $۰/۰/۱$ sec در نظر گرفته شده است.

به منظور آنالیز دینامیکی، ۱۰ ثانیه‌ی اول مؤلفه‌ی افقی و قائم شتاب‌نگاشت سد کوینا که در سال ۱۹۶۷ با بزرگی ۶/۵ ریشرتر ثبت شده، با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) انتخاب شده است.



شکل (۴): مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت زلزله کوینا

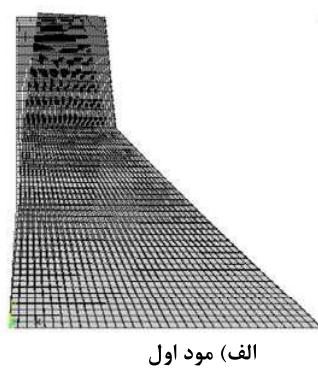


شکل (۵): مؤلفه‌ی قائم شتاب‌نگاشت زلزله کوینا

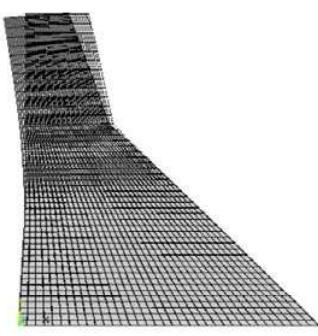
برای تحلیل مدل‌های موردنظر، فرض‌هایی در پژوهش مدنظر قرار گرفته شده که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: آب مخزن، محیطی همگن و ایزوتروپ، غیر لزج، غیر چرخشی و با تغییر مکان‌های کوچک و تراکم پذیر است که تمامی المان‌های موجود در مرز دوردست مخزن دارای نسبت جذب موج، یک و المان‌های موجود در بین مرز مخزن و پی‌صلب،

¹ Newmark

² Damping Coefficient

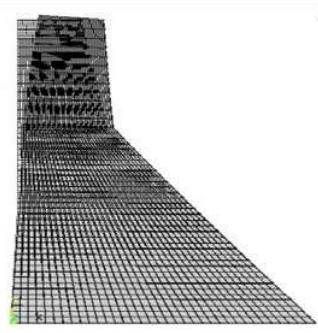


الف) مود اول

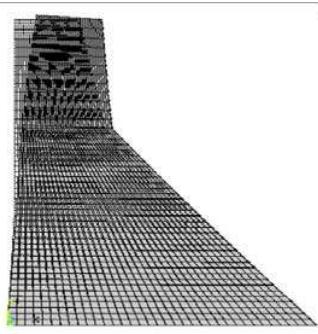


ب) مود دوم

شکل (۶): اشکال مودی برای سیستم سد بدون لایه



الف) مود اول سیستم دارای لایه ایزولاسیون



ب) مود دوم سیستم دارای لایه ایزولاسیون

شکل (۷): اشکال مودی برای سیستم سد دارای لایه Rubber

سازه بر اساس میرابی رایلی^۱ محاسبه شود که به آن میرابی وابسته به فرکانس نیز می‌گویند. به منظور تحلیل‌های تاریخچه زمانی لازم است ضرایب میرابی رایلی α و β محاسبه شوند که برای به دست آوردن ضرایب میرابی رایلی α و β از روابط زیر استفاده شده است:

$$\xi = \alpha/2\omega_i + \beta\omega_i/2 \quad (6)$$

که در آن ξ میرابی مصالح است.

با انتخاب دو فرکانس زاویه‌ای اصلی ω_1 و ω_2 از تحلیل مودال^۲ و در نظر گرفتن درصد میرابی ثابت برای مصالح روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\xi = \alpha/2\omega_1 + \beta\omega_1/2 \quad (7)$$

$$\xi = \alpha/2\omega_2 + \beta\omega_2/2 \quad (8)$$

و از آنجا می‌توان گفت:

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{(\omega_1+\omega_2)} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{(\omega_1+\omega_2)} \quad (10)$$

با استفاده از تحلیل مودال مدل‌ها با فرض ضرایب میرابی رایلی بر اساس مودهای ارتعاشی اول و دوم و ضریب میرابی ۵ درصد برای مصالح بتن بدن سد به دست آمداند و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

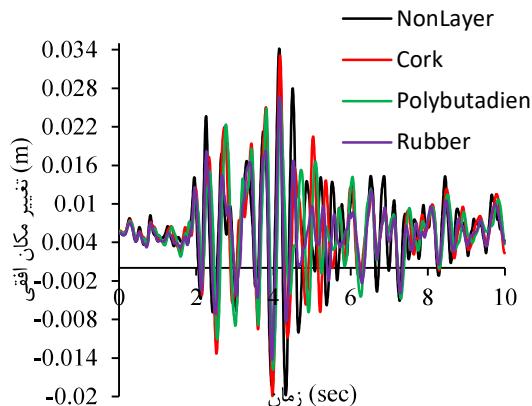
جدول (۳): دوره‌های طبیعی هشت مدل‌ها (f (Hz))

Rubber	Polybutadiene-elast	Cork	بدون لایه	
۱/۸۸۵	۲/۱۹	۲/۴۰	۲/۷۴	مود اول
۱/۸۸۶	۲/۹۷	۳/۱۷	۳/۷۶	مود دوم
۱/۸۸۸	۳/۸۵	۳/۸۸	۴/۱۲	مود سوم
۱/۸۹۴	۳/۸۶	۴/۷۹	۵/۲۳	مود چهارم
۱/۸۹۵	۳/۸۷	۵/۴۸	۶/۵۶	مود پنجم
۱/۹۰۸	۳/۸۸	۶/۱۳	۷/۷۵	مود ششم
۱/۹۱۰	۳/۸۹	۷/۰۵	۸/۶۷	مود هفتم
۱/۹۲۵	۳/۹۱	۷/۶۷	۱۰/۱۲	مود هشتم

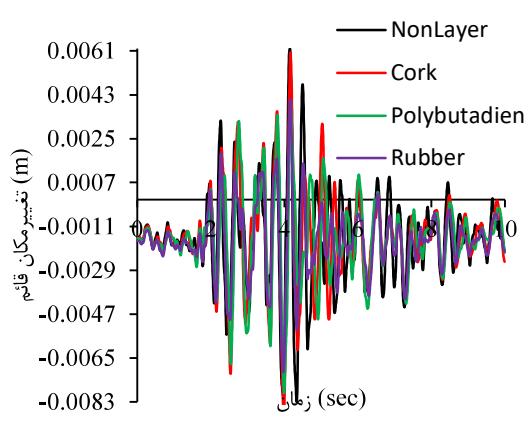
به عنوان نمونه، اشکال مودی^۳ برای مقادیر فوق در شکل‌های زیر برای مدل بدون لایه و دارای لایه Rubber آمده است:

³ Mode Shapes¹ Riley Damping² Modal Analysis

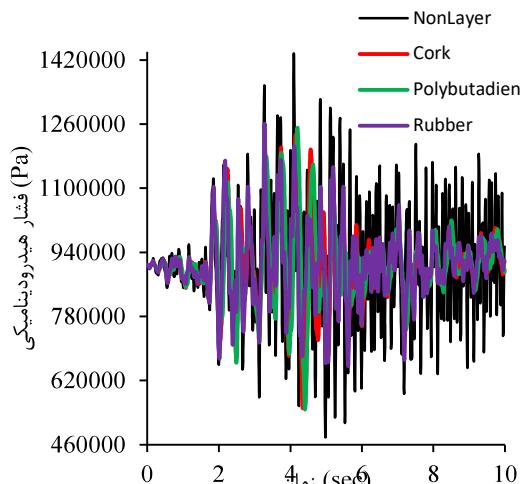
در ادامه به عنوان پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان در جهات افقی و قائم تاج سد و همچنین فشار هیدرودینامیکی برای حالات مختلف بدون لایه و دارای لایه با چهار نوع مدل موردنظر در منحنی‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده‌اند.



شکل (۱۰): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان افقی تاج سد (نقطه A)



شکل (۱۱): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان قائم تاج سد (نقطه A)

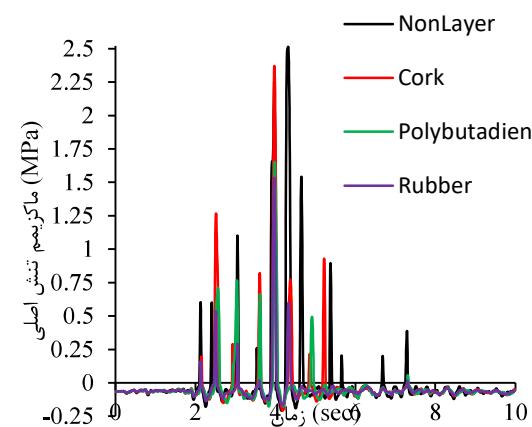


شکل (۱۲): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی فشار هیدرودینامیکی در نزدیکی پاشنه سد (نقطه C)

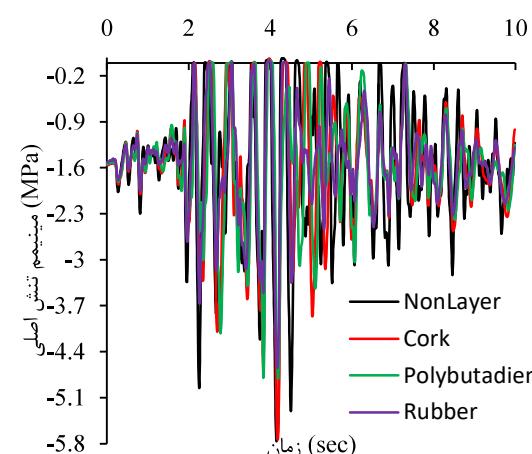
تحلیل‌های دینامیکی سیستم

شكل و طراحی سدهای بتُنی وزنی به گونه‌ای است که وزن آن برای پایداری سازه در مقابل کلیه نیروهای وارد، به کار گرفته می‌شود. یکی از مهم‌ترین ملاک‌ها در طراحی سد وزنی، تنش‌های اصلی ایجاد شده در سد، بخصوص در پاشنه سد و کاهش تنش‌های موجود در بدنه سد است که این تنش‌ها، منجر به ترک‌هایی می‌گردند و به دنبال آن ضربه اطمینان طراحی سدها را کاهش می‌دهند.

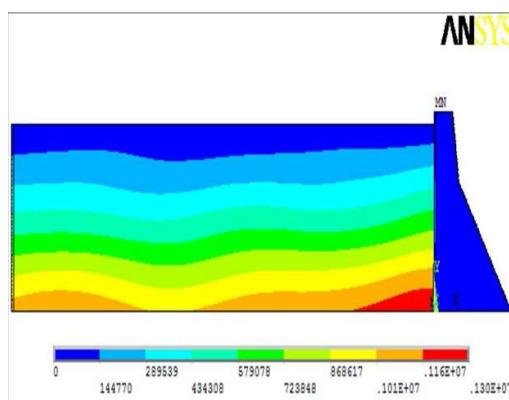
لذا جهت تحلیل و بررسی، بعد از تحلیل دینامیکی خطی مدل‌ها، تاریخچه‌های زمانی تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل در تراز شکستگی بدنه پایین دست سد (نقطه B) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، برای سیستم بدون لایه و دارای لایه ایزولاسیون با مواد موردنظر در منحنی‌های (۸) و (۹) استخراج شده‌اند.



شکل (۸): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تنش اصلی اول در تراز شکستگی بدنه پایین دست سد (نقطه B)



شکل (۹): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تنش اصلی سوم در تراز شکستگی بدنه پایین دست سد (نقطه B)



شکل (۱۶): کانتور فشار هیدرودینامیکی در حالت با لایه بر حسب (Pa)

لازم به ذکر است که این کانتورها مربوط به زمانی است که سد بیشترین تنش اصلی را در تراز شکستگی بدنه پایین دست سد و نیز مخزن، بیشینه فشار هیدرودینامیکی را دارد.

ارزیابی و مقایسه مدل‌ها

جهت بررسی مناسب‌تر و مقایسه عددی حالات مختلف، نتایج حاصل از پاسخ‌های بیشینه جدول (۴) الی (۸) ارائه شده است:

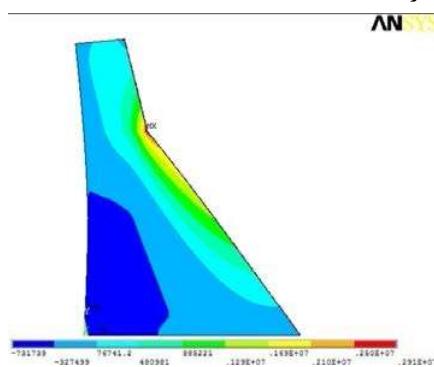
جدول (۴): مقادیر عددی تنش‌های اصلی اول بیشینه و کمینه در تراز شکستگی بدنه پایین دست سد (نقطه B)

کمینه تنش اصلی (Mpa)	بیشینه تنش اصلی (Mpa)	مدل سد
-۰/۲۰۸	۲/۵۱۳	بدون لایه
-۰/۲۰۷	۲/۳۷۱	چوب‌پنجه
-۰/۱۷۸	۱/۶۵۲	پلی بوتادین الاستومر
-۰/۱۶۹	۱/۵۳۴	لاستیک

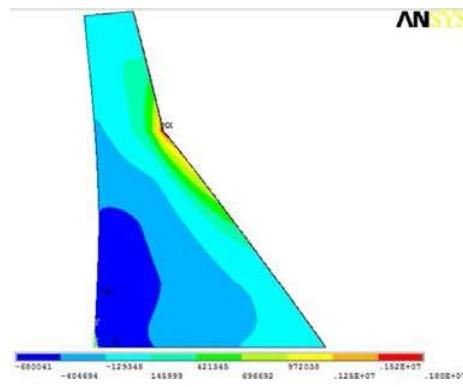
جدول (۵): مقادیر عددی تنش‌های اصلی سوم بیشینه و کمینه در تراز شکستگی بدنه پایین دست سد (نقطه B)

کمینه تنش اصلی (Mpa)	بیشینه تنش اصلی (Mpa)	مدل سد
-۵/۷۶۴	.۰/۰۷۱۷	بدون لایه
-۵/۷۴۱	.۰/۰۶۴۳	چوب‌پنجه
-۴/۸۱۲	.۰/۰۴۰۳	پلی بوتادین الاستومر
-۴/۶۴۵	.۰/۰۳۵۸	لاستیک

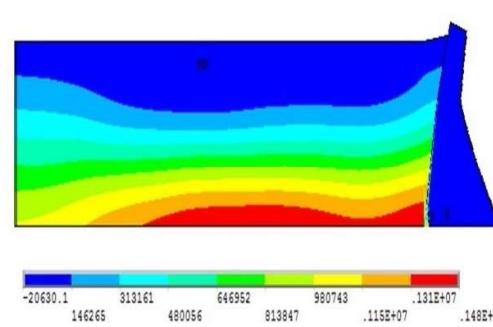
درنهایت برای اینکه روند توزیع تنش اصلی بیشینه در بدنه سد و همچنین توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن به روشنی نمایش داده شود، نتایج مربوطه برای مدل بدون لایه ایزولاسیون و همراه با لایه‌ی Rubber به ضخامت‌های ۱۵۰ سانتی‌متری به ترتیب به صورت کانتورهایی در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) ارائه شده است.



شکل (۱۳): کانتور نمایش تنش اصلی بیشینه در حالت بدون لایه بر حسب (Pa)



شکل (۱۴): کانتور نمایش تنش اصلی بیشینه در حالت با لایه بر حسب (Pa)



شکل (۱۵): کانتور فشار هیدرودینامیکی در حالت بدون لایه بر حسب (Pa)

کمینه منفی (%)	بیشینه مثبت (%)	درصد کاهش مدل بدون لایه نسبت به مدل دارای لایه چوب‌پنبه
۴/۴۲	۳/۱۷	پلی بوتادین الاستومر
۲۰/۱۵	۲۵/۰۶	لاستیک
۲۷/۹۸	۲۲/۸۵	

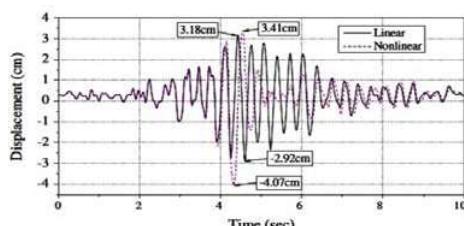
جدول (۱۲): درصد کاهش پاسخ تغییر مکان قائم

کمینه منفی (%)	بیشینه مثبت (%)	درصد کاهش مدل بدون لایه نسبت به مدل دارای لایه چوب‌پنبه
۲/۱۸	۲/۴۶	پلی بوتادین الاستومر
۴/۱۸	۳۵/۴۰	لاستیک
۱۱/۹۱	۳۳/۴۹	

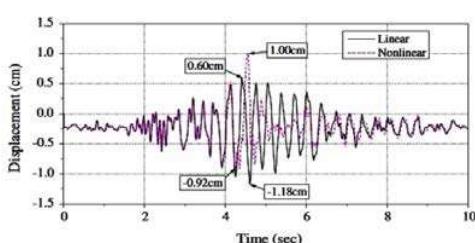
جدول (۱۳): درصد کاهش پاسخ فشار بیشینه هیدرودینامیکی

بیشینه مثبت (%)	درصد کاهش مدل بدون لایه نسبت به مدل دارای لایه چوب‌پنبه
۱۳/۷۹	پلی بوتادین الاستومر
۱۲/۸۸	لاستیک
۱۲/۲۳	

در پایان برای صحت سنجی مدل، نتایج سیستم بدون لایه سد کوینا با نتایج تحلیل انجام شده در تحقیق ژانگ (۲۰۱۳)^۱ مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از آنالیز جابه‌جایی افقی و قائم تاج سد ارائه شده در شکل (۱۰) و (۱۱) در مقایسه با نتایج به دست آمده از مدل مرجع ذکر شده در شکل (۱۷) و (۱۸)، نزدیک به هم هستند.



شکل (۱۷): پاسخ جابه‌جایی افقی تاج سد کوینا در مرجع ژانگ



شکل (۱۸): پاسخ جابه‌جایی قائم تاج سد کوینا در مرجع ژانگ

جدول (۶): مقادیر عددی تغییر مکان افقی تاج سد (نقطه A)

بیشینه منفی (m)	بیشینه مثبت (m)	مدل سد
-۰/۰۱۹۸	۰/۰۳۴۲	بدون لایه
-۰/۰۱۸۹	۰/۰۳۳۱	چوب‌پنبه
-۰/۰۱۵۸	۰/۰۲۵۹	پلی بوتادین الاستومر
-۰/۰۱۴۳	۰/۰۲۶۶	لاستیک

جدول (۷): مقادیر عددی تغییر مکان قائم تاج سد (نقطه A)

بیشینه منفی (m)	بیشینه مثبت (m)	مدل سد
-۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۶۲	بدون لایه
-۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۶۰	چوب‌پنبه
-۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۴۱	پلی بوتادین الاستومر
-۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۴۰	لاستیک

جدول (۸): مقادیر عددی فشار بیشینه هیدرودینامیکی

بیشینه فشار حوالی پاشنه (MPa)	مدل سد
۱/۴۴	بدون لایه
۱/۲۸	چوب‌پنبه
۱/۲۶	پلی بوتادین الاستومر
۱/۲۵	لاستیک

در ادامه جدول (۹) الی (۱۳) به عنوان درصد کاهش پاسخ تنش‌های اصلی برای حالات مختلف بدون لایه و دارای لایه ایزولاسیون، استخراج داده شده است:

جدول (۹): درصد کاهش پاسخ تنش‌های اصلی اول

کمینه تنش اصلی (%)	بیشینه تنش اصلی (%)	درصد کاهش مدل بدون لایه نسبت به دارای لایه چوب‌پنبه
۰/۲۲	۵/۶۷	پلی بوتادین الاستومر
۱۴/۵۴	۳۴/۲۶	لاستیک
۱۸/۴۶	۳۸/۹۸	

جدول (۱۰): درصد کاهش پاسخ تنش‌های اصلی سوم

کمینه تنش اصلی (%)	بیشینه تنش اصلی (%)	درصد کاهش مدل بدون لایه نسبت به دارای لایه چوب‌پنبه
۰/۴۰	۱۰/۳۶	پلی بوتادین الاستومر
۱۶/۵۱	۴۳/۸۵	لاستیک
۱۹/۴۱	۵۰/۰۴	

جدول (۱۱): درصد کاهش پاسخ تغییر مکان افقی

را کاهش می دهد که به دلیل استهلاک امواج فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن هنگام وقوع زمین لرزه به وسیله‌ی لایه است.

در پایان لازم به اشاره است که با توجه به کمبود منابع آب و هزینه‌های هنگفتی که در حین ساخت سد، طراحی و پیاده‌سازی سدهای بتی و یا حتی سدهای موجود است، مدل ارائه شده دارای لایه لاستیک، می‌توانند جهت افزایش ضربی اطمینان پروژه‌های عظیم نظیر سدهای وزنی بتی در برابر بارهای لرزه‌ای، مؤثر و کارآمد باشد. این امر یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از لایه‌ی ایزولاسیون است.

با توجه به جداول و نمودارهای فوق به روشی می‌توان دریافت که در مدل‌های پیشنهادی دارای لایه ایزولاسیون متصل به بدنه‌ی بتی بالا دست سد در محل مرزی تماس سیستم سد-مخزن با مصالحی همچون چوب‌پنبه، پلی‌بوتادین الاستومر و لاستیک، پاسخ‌های لرزه‌ای آنالیز شده کاهش و بهبود می‌یابند؛ اما آنچه واضح است که ایزولاسیون رزینی و همچنین کاهش لرزه‌ای سه مصالح فوق نسبت به لاستیک است که می‌تواند به دلیل اثر میرایی لایه ایزولاسیون رزینی و همچنین کاهش فشار هیدرودینامیکی حاصل از اندرکنش سد و مخزن باشد.

نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات اساسی در طراحی سدهای بتی وزنی، تأمین پایداری سازه در برابر شرایط بارگذاری مختلف است و پایداری در سد شامل کنترل در برابر واژگونی و لغزش است. از طرف دیگر، تأمین پایداری سد با تغییر در شکل هندسی سد به وقوع می‌پیوندد. در این پژوهش در زمینه بهبود پاسخ لرزه‌ای سد وزنی، بر کاهش تنش‌های موجود در بدنه‌ی سد تأکید شده است. در مطالعه‌ی موردنی انجام شده بر روی سد کوینا، با اینکه این سد از بابت لغزش و واژگونی مورد طراحی واقع شده بود ولی بعد از زمین لرزه کوینا دچار ترک خوردگی‌هایی در اطراف بدنه بالا دست و پایین دست شده بود که ضربی اطمینان طراحی سد را کاهش داده بود. از این‌رو در این پژوهش، با ایجاد زمینه در جهت کاهش تنش‌های ایجاد شده بر بدنه‌ی سد در اثر به کارگیری لایه‌ی ایزولاسیون، ریسک ایجاد و گسترش ترک‌ها پایین آورده شده و به دنبال آن، تأثیر مؤثری بر میزان اطمینان پایداری سد صورت می‌پذیرد.

- 1- As'kov, V. L., Kalitseva, I. S., Komarov, A. I. and Sheinin, I. S. (1992). "Physical modelling of phenomena of the interaction of hydraulic structures with water in the presence of an air curtain." *Hydrotechnical Construction*. 26(10), 636-646.
- 2- Cambridge material selection software, CMS 2.04, (1994).
- 3- Chopra, A. K. (1968). "Earthquake behavior of reservoir-dam system." *Journal of engineering mechanics division*. 94, 1475-1500.
- 4- Chopra, A. K. (1967). "Hydrodynamic pressure on dams during earthquakes." *Journal of engineering mechanics division*. 93, 205-223.
- 5- Gellis, V. K., Kalitseva, I. S., Mel'nikov, E. P. and Sheinin, I. S. (1992). "On-Site Studies of an Experimental Air Curtain on the Dam of the Krivoporozhsk Hydroelectric Station." *Hydrotechnical Construction*. 26(10), 647-652.
- 6- Hall, J. F., Dowling, M. J. and EL-Aidi, B. (1992). "Defensive earthquake design of concrete gravity dams." *Dam engineering*. 3, 249-264.
- 7- Hall, J. F. and EL-Aidi, B. (1989). "Hydrodynamic isolation of concrete gravity dams." *Proceeding of the seismic engineering Structure Congress*. pp. 307-316.

- 8- Hanna, Y. G. and Humar J. L. (1983). "Closure to Boundary Element Analysis of Fluid Domain." *Journal of Engineering Mechanics*. 109(2), 666-667.
- 9- Hatami, K. (1997). "Effect of Reservoir Boundaries on the seismic Response of Gravity

- 14- Sheinin, I. S. (1992). "An air curtain for protecting hydraulic structures from seismic and blast effects." *Hydrotechnical Construction.* 26(10), 609-615.
- 15- Tsai, C. S. and Lee, G. C. (1989). "Hydrodynamic pressures on gravity dams subjected to ground motion." *Journal of engineering mechanics division.* 115(3), 598-617.
- 16- Westergaard, H. M. (1933). "Water pressure on dams during earthquake." *Transactions of the American Society of Civil Engineers.* 98(2), 418-433.
- 17- Zhang, Sh., Wang, G. and Yu, X. (2013). "Seismic cracking analysis of concrete gravity dams with initial cracks using the extended finite element method." *Engineering Structural.* 56, 528-543.
- 18- Zhang, S. J., Chen, J., Zhang, Y. Z. and Liu, H. W. (2011). "Research of air-cushion isolation effects on high arch dam reservoir." *Acta Mechanica Sinica.* 27(5), 675–686.
- Dams." Ph.D. Thesis, McMaster university, Hamilton ontario, Canada.
- 10- Hatami, K. and Ghobarah, A. (1995). "Reduction of the seismic response of concrete gravity dams using hydrodynamics isolation." *Proceedings of Seventh Canadian conference earthquake Engineering,* p. 333-340.
- 11- Lombardo, V. N., Mikhailov, L. P. and Semenov, I. V. (1987). "Studies and design of earthquake resistant concrete dams." *Proceedings of International Symposium on earthquake Dams.* vol. 1, ICOLD, Beijing, China, pp. 223-241.
- 12- Mirzabozorg, H., Lamea, M. and Sehat, H. R. (2012). "Hydrodynamic Isolation and 3d Seismic Response Of Concrete Arch Dams." *Dam Engineering.* 22(3), 227-250.
- 13- Savinov, O. A., Sheinin, I. S., Kalitseva, I. S. and Sheinina, S. I. (1992). "Mathematical modeling and theoretical studies of problems of seismic stability of hydraulic structures with an air curtain." *Hydrotechnical Construction.* 26(10), 631-635.

Studying the Effects of Mechanical Properties of Materials of Isolation Layer on Improving Seismic Response of Concrete Gravity Dam

Amir Pirooznia *¹

Abstract

This study has been conducted to evaluate the effects of mechanical properties of materials of isolation layer on improvements of the seismic response of gravity dam. To achieve an innovative solution, a soft layer is assumed to be attached to the upstream face of the dam. This layer which partially absorbs the incident pressure waves from the reservoir is named the isolation layer. Due to the finite thickness and geometry of the concrete dam, the reflected waves from the downstream face of the dam and the dam-layer interface may slightly alter the equivalent value of the wave reflection coefficient at the upstream face of the dam. The Koyna dam is considered as a case study to indicate the effects of isolation layer on seismic response of gravity dams. A flexible layer attached to the upstream face of the dam and the upper level of foundation under different thickness and height is considered. The response of un-isolated dam is compared with an isolated dam under various conditions. Results have shown that the isolation layer can have the reducing effect on responses of dam model because of damping the induced hydrodynamic pressure due to earthquake.

Keywords

Dynamic Analysis, Gravity Dam, Interaction, Isolation Layer, Mechanical Properties.

* Ph.D Researcher, Department of Civil Engineering, School of Engineering., University of Zanjan, Zanjan, Iran,
amir.pirooznia@gmail.com.

Received: 2016/07/19

Accepted: 2016/08/31