نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره نهم / تابستان ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 9 / September 2016

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

امیر پیروزنیا [*۱]

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر خصوصیات مکانیکی مصالح لایه‌ی ایزولاسیون در مرز بین سد و مخزن جهت بهبود پاسخ لرزه‌ای سد وزنی با درنظرگرفتن اثرات اندرکنش سد- مخزن پرداخته می‌شود. ازآنجایی‌که سدهای بتنی، دارای میرایی بالایی در مقایسه با سایر سازه‌ها نیستند لذا به‌کارگیری لایه‌ای با میرایی بالا در ناحیه‌ی مرزی محل تماس سد و مخزن می‌تواند راهکار امیدوارکننده جهت کاهش پاسخ لرزه‌ای سدها باشد. انتخاب و به‌کارگیری مصالح لایه‌ی ایزولاسیون مناسب و قابل‌اجرا با در نظرگیری خصوصیات مکانیکی آن جهت دستیابی به بهبود پاسخ لرزه‌ای سد، جزء اهداف پژوهش است. به‌عنوان مطالعه‌ی موردی، سد کوینا در کشور هند با نرم‌افزار انسیس به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی گردیده و آنالیز دینامیکی به روش نیومارک با اعمال توأم مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه کوینا مورد تحلیل قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها تحت حالاتی که در آن، سد بدون لایه و دارای لایه‌ای متشکل از سه نوع ماده تحت عناوین 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 به‌وسیله‌ی لایه است.

واژه‌های کلیدی

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

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۱۰

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

مقدمه

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

با رجوع به مطالعات تحلیلی و تجربه‌های واقعی، زمین‌لرزه‌های مختلف بروز مشکلات فراوانی در سدهای بتنی را نشان می‌دهند. درنتیجه، به دلیل نگرانی برای ایمنی لرزه‌ای سدها، رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی موضوع مطالعات جامعی بوده است. سدها ازجمله مهم‌ترین سازه‌هایی هستند که باید در تحلیل، طراحی و ساخت آن‌ها دقت کافی جهت ایمنی بودن هر چه بیشتر طرح به کار برده شود. از سویی دیگر، با توجه به حجم عملیات و پیچیدگی اجرای این‌گونه سازه‌ها، چنان چه فقط ایمنی مدنظر قرار گیرد، طرح غیراقتصادی و در مواردی غیرعملی خواهد شد. بنابراین به کار بردن روش‌های نوآورانه می‌تواند در افزایش دوام سدهای بتنی 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 انبوه 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. ازاین‌رو، 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[1] در سال ۱۹۳۳ ارائه داد. چوپرا[2] 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 به‌صورت یک نیروی خارجی روی سد در نظر گرفته شده و پاسخ سد در محاسبه‌ی نیروهای اندرکنش دخالت داده نشده است. چوپرا در سال ۱۹۶۸ و ۱۹۶۹، تأثیر انعطاف‌پذیر بودن سد را روی نیروهای اندرکنش با مدل‌سازی سد به‌صورت سامانه‌ای شامل جرم، میراگر و فنر مطالعه کرد.

هانا[3] و هومر[4] در سال ۱۹۸۳، لی[5] و تسای[6] در سال ۱۹۸۹ ابراز داشتند که محل تماس سد با آب مخزن محصور شده، مرز مهمی است که در آن نیروهای استاتیکی و هیدرودینامیکی به سازه‌ی سد اعمال می‌شوند. این نیروها، سهم مهمی در آنالیز پاسخ لرزه‌ای و طراحی سد را فراهم می‌آورند.

در مطالعات پیشین فشار هیدرودینامیکی در مخزن، بدنه‌ی بالادست سد بتنی کاملاً انعکاسی[7] در نظر گرفته می‌شد. مطالعات کمی در زمینه‌ی تأثیرات مرز تا اندازه‌ای جاذب در قسمت مربوط به بدنه‌ی بالادست سد در پژوهش‌های موجود انجام شده است. این مطالعات، امکان کاهش فشار هیدرودینامیکی اعمالی در سد را به‌وسیله‌ی ایزولاسیون هیدرودینامیکی مورد آزمایش قرار داده‌اند. سامانه‌های ایزولاسیون هیدرودینامیکی تحقیقی و پژوهشی به‌صورت هوای به کار گرفته شده به‌عنوان لایه‌ی واسطه بین سد و مخزن منحصر شده بودند.

لومباردو[8] و همکاران در سال ۱۹۸۷، نظریه‌ی پرده‌ی هوایی[9] برای کاهش بارگذاری لرزه‌ای در سدهای بتنی را مطرح کردند. هال[10] و ال-ایدی[11] در سال ۱۹۸۲، امکان کاهش فشار هیدرودینامیکی را با توجه به دو گزینه‌ی تجربی بالن‌های هوای مهار شده و حباب‌های گاز تزریق شده، برای فراهم کردن لایه‌ی هوا در وجه بالادست سد امتحان کردند. هیچ‌کدام از این دو روش، کاهشی را در پاسخ دینامیکی سد - مخزن به وجود نیاورد. در ادامه هال[12] و همکاران در سال ۱۹۹۲، تأثیر یک ماده‌ی نرم چسبنده به وجه بالادست یک سد بتنی را روی کاهش پاسخ سد مطالعه کردند. آن‌ها، تراکم‌پذیری ماده را مشابه با رفتار یک‌بعدی گاز کامل فرض نمودند؛ ولی با این مدل برای لایه‌ی نرم، کاهش قابل‌توجهی

[1] Westergaard
[2] Chopra
[3] Hanna
[4] Humar
[5] Lee
[6] Tsai
[7] Reflective
[8] Lombardo
[9] Air-Curtain
[10] Hall
[11] El-Aidi
[12] Hall

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

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، ارتعاشات سد و سیستم جدایی در هنگام زلزله اتفاق بیفتد. درنتیجه، طرح پرده‌ی جداساز نیاز به هزینه اضافی و نگهداری برای رسیدن به یک اطمینان بالا است.

نظریه‌ی کاهشِ فشار هیدرودینامیکی در سد با به‌کارگیری یک پرده‌ی هوایی در سمت بالادست بدنه‌ی سد به‌وسیله‌ی شینین[1] در سال ۱۹۹۲ مورد آزمون قرار گرفت. او پرده‌ی هوا را در فرم‌ها و شکل‌های حباب‌های هوا و مجراهای هوایی مورد بررسی قرار داد. نظریه‌ی حباب هوا، به دلیل نیاز به مقدار زیادی هوا برای فراهم آوردن لایه‌ی هوای پایدار، عملی به نظر نمی‌رسید. همچنین هزینه‌ی گزافی برای نظریه‌ی حباب هوا به‌عنوان یک نوع ایزولاسیون فعال وجود داشت.

ساوینوف[2] و همکاران در سال ۱۹۹۲، مطالعات علمی و نظری درباره‌ی تأثیر پرده‌های هوایی در ایزولاسیون هیدرودینامیکی سدها را پیش بردند. آن‌ها، رفتار مکانیکی خطی در طول عمق پرده را مورد بررسی قرار دادند. ساوینوف و همکاران اشاره کردند که تراکم‌پذیری آب، تأثیر طرح پرده‌ی ایزولاسیون هوایی را افزایش می‌دهد.

گلیس[3] و همکاران (۱۹۹۲) و آسکوف[4] و همکاران (۱۹۹۲) نظریه‌ی ایزولاسیون هیدرودینامیکی را به‌وسیله‌ی آزمایش‌های مدل آزمایشگاهی و همچنین در نمونه‌ی اصلی مجهز شده با پرده‌ی هوایی، امتحان کردند. ایشان نتیجه گرفتند که کاهش قابل‌توجهی در نیروی هیدرودینامیکی در سد به علت تأثیر لایه‌ی ایزولاسیون رخ داده است. همچنین دریافتند که اگر حجم مخصوص هوا در پرده، کاهش یابد تأثیر ایزولاسیون در کاهش فشار هیدرودینامیکی در سد کم می‌شود. این به علت نشت هوا به بیرون مجراها تحت تأثیرات تغییرات درجه‌ی هوا، بیو ارگانیسم‌ها و لرزش‌های سد و سیستم ایزولاسیون به دلیل رخدادهای لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. درنتیجه، طرح پرده‌ی هوای ایزولاسیونی مستلزم صرف هزینه‌های اضافی و نگهداری در طول دوران بهره‌برداری است.

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 جداساز را در کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر سد، نشان داد.

در تحقیقات اخیر نیز ژانگ[5] و همکاران در سال ۲۰۱۱، تأثیر بالشتک هوا[6] بر کاهش پاسخ لرزه‌ای سد جینپینگ[7] به ارتفاع ۳۰۵ متر را با استفاده از مدل عناصر محدود مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای مدل‌سازی و تحلیل از فرمول‌بندی اویلری-لاگرانژی[8] استفاده کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که استفاده از بالشتک هوا 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 هوا را بر کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر وجه بالادست سد قوسی امیرکبیر بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که پرده جداساز، 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 تنش‌ها، 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 می‌آید که بتوان در زمینه‌ی میرایی سازه‌ای سد از لحاظ کاهش پاسخ لرزه‌ای، کاری از پیش برد لذا 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 بپردازند که با استفاده از آن‌ها و با صرف زمان کمتر به طرح بهینه برای سدهای بتنی وزنی دست یابند. یکی ازاین‌روش‌های نوین، به‌کارگیری 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

[1] Sheinin
[2] Savinov
[3] Gellis
[4] Askov
[5] Zhang
[6] Air-Cushion
[7] Jinping
[8] Eulerian-Lagrangian Formulation

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

پاسخ لرزه‌ای تنش‌های اصلی سد بتنی 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 به‌عنوان 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[1] مدل‌سازی می‌شود:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\frac{1}{C}\frac{\partial P}{\partial t} \qquad (۱)$$

شرط مرزی سطح آزاد

با صرف‌نظر کردن از امواج سطحی شرط مرزی موردنظر به‌صورت زیر است:

$$P = 0 \qquad (۲)$$

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 دیواره‌ی مخزن به‌وسیله‌ی نیروی اینرسی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \qquad (۳)$$

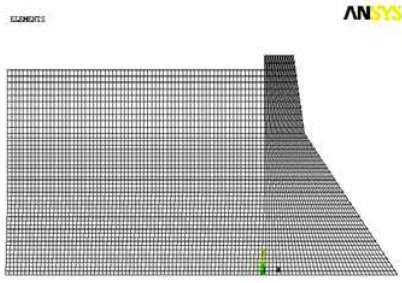
در این معادله، ρ دانسیته‌ی سیال و $\ddot{u}_n$ بردار شتاب سازه در مسیر عمود بر مرز مشترک سیال و سازه هستند.

نحوه تحلیل سیستم و معرفی مدل‌ها

برای انتخاب و به‌کارگیری مصالح لایه ایزولاسیون مناسب و قابل‌اجرا با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی آن در راستای دست یافتن به بهبود پاسخ لرزه‌ای سد بتنی وزنی، پاسخ سد کوینا[2] 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 بتن سد به ضخامت (t=۱۵۰cm) در سراسر ارتفاع سد وزنی متصل شده است. با توجه به شرایط حاکم بر رفتار سد بتنی وزنی و شکل هندسی مخزن، مسئله به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. هدف از در نظرگیری بعد سوم به اندازه عرض واحد بلندترین بلوک سد (۱m) با المان‌های سه‌بعدی برای تحلیل دوبعدی با رفتار کرنش مسطح در جهت مدل‌سازی و آنالیز لرزه‌ای سد وزنی در نرم‌افزار انسیس[3] انجام شده است. برای این منظور، عناصر مناسبی که رفتار تراکم‌پذیری سیال را نمایش دهد و همچنین برای مرز دوردست قطع‌شده نیز از شرط مرزی سامرفلد استفاده شده است. مشخصات هندسی سد بتنی وزنی کوینا در شکل (۱)، مدل مش‌بندی شده سیستم سد – مخزن در شکل (۲) با فونداسیونی صلب، مخزنی پر از آب تا تراز ۹۶/۵ 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 ۱۰۳m در شکل (۳) نشان داده شده است. مدل دارای لایه‌ای متشکل از سه نوع ماده تحت عناوین چوب‌پنبه[4]، پلی بوتادین الاستومر[5] و لاستیک[6] است.



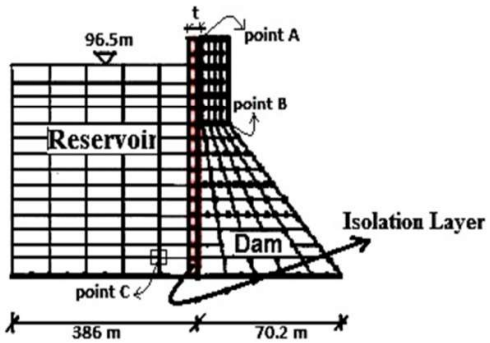
شکل (۱): ابعاد هندسی مقطع عرضی سد بتنی وزنی کوینا



شکل (۲): مدل سد - مخزن

[1] Sommerfeld
[2] Koyna
[3] ANSYS
[4] Cork
[5] Polybutadiene-elastomer
[6] Rubber

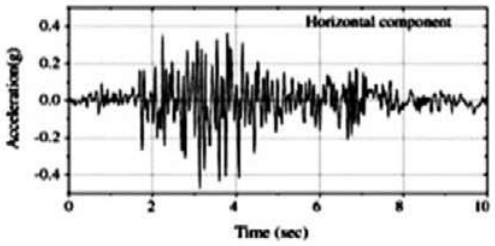
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]



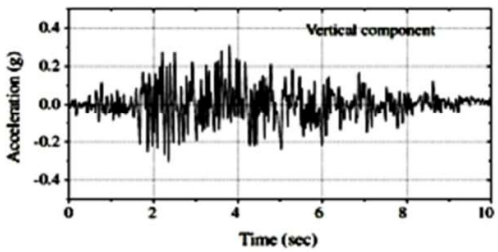
شکل (۳): مدل دارای لایه یکپارچه متشکل از مصالح چوب پنبه، پلی بوتادین الاستومر و لاستیک

برای انجام تحلیل لرزه‌ای و انتگرال‌گیری عددی از روش نیومارک[1] استفاده شده که پارامترهای آن به‌صورت $\beta =$ ۰/۲۵ و $\gamma =$ ۰/۵ انتخاب شده و گام زمانی برابر $\Delta t =$ ۰/۰۱ sec در نظر گرفته شده است.

به‌منظور آنالیز دینامیکی، ۱۰ ثانیه‌ی اول مؤلفه‌ی افقی و قائم شتاب‌نگاشت سد کوینا که در سال ۱۹۶۷ با بزرگی ۶/۵ ریشتر 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 تراکم‌پذیر است که تمامی المان‌های موجود در مرز دوردست مخزن دارای نسبت جذب موج، یک و المان‌های موجود در بین مرز مخزن و پی صلب، ۵/۰ است. همچنین به دلیل عمق و ارتفاع زیاد مخزن سد بتنی وزنی، از اثر امواج سطحی آب صرف‌نظر 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)

مصالح	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	سرعت صوت (m/s)
بتن سد	۲۶۴۳	۳۱	۰/۲	-
آب مخزن	۱۰۰۰	-	-	۱۴۴۰

برای مدل‌سازی مصالح بدنه 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 پی صلب برای آب مخزن از المان FLUID30 و ۸ گرهی سه‌بعدی آکوستیک استفاده شده است که یک المان اویلری- لاگرانژی است و از فشار به‌عنوان پارامتر گرهی استفاده می‌کند. در مقایسه با دیدگاه لاگرانژی-لاگرانژی که از جابه‌جایی به‌عنوان 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

مصالح	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
چوب‌پنبه	۱۸۰	۳۲	۰/۲۵
پلی بوتادین الاستومر	۹۱۰	۱/۶	۰/۴۹
لاستیک	۱۳۰۰	۰/۵	۰/۴۹۹

نتایج

تحلیل‌های مودال سیستم

برای بررسی رفتار دینامیکی سد، باید فرکانس مودهای ارتعاش سد محاسبه شود تا بتوان با داشتن ضرایب میرایی[2]

[1] Newmark
[2] Damping Coefficient

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

سازه بر اساس میرایی رایلی[1] محاسبه شود که به آن میرایی وابسته به فرکانس نیز می‌گویند. به‌منظور تحلیل‌های تاریخچه زمانی لازم است ضرایب میرایی رایلی α و β محاسبه شوند که برای به دست آوردن ضرایب میرایی رایلی α و β از روابط زیر استفاده شده است:

$$\xi = \alpha/2\omega_i + \beta\omega_i/2 \qquad (۶)$$

که در آن ξ میرایی مصالح است.

با انتخاب دو فرکانس زاویه‌ای اصلی ω_1 و ω_2 از تحلیل مودال[2] و در نظر گرفتن درصد میرایی ثابت برای مصالح روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\xi = \alpha/2\omega_1 + \beta\omega_1/2 \qquad (۷)$$

$$\xi = \alpha/2\omega_2 + \beta\omega_2/2 \qquad (۸)$$

و از آنجا می‌توان گفت:

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{(\omega_1+\omega_2)} \qquad (۹)$$

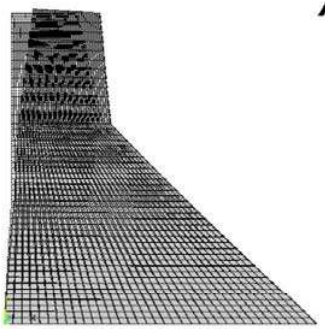
$$\beta = \frac{2\xi}{(\omega_1+\omega_2)} \qquad (۱۰)$$

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

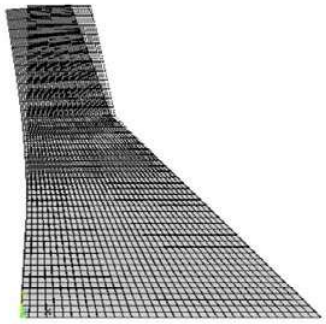
جدول (۳): دوره‌های طبیعی هشت مود مدل‌ها ((f (Hz)

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

به‌عنوان نمونه، اشکال مودی[3] برای مقادیر فوق در شکل‌های زیر برای مدل بدون لایه و دارای لایه Rubber آمده است:

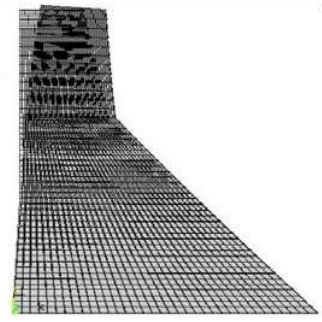


الف) مود اول

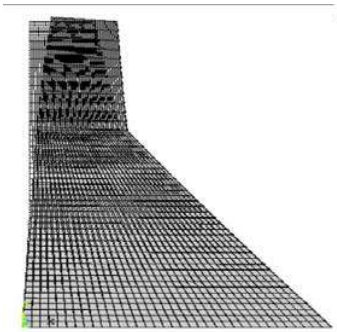


ب) مود دوم

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

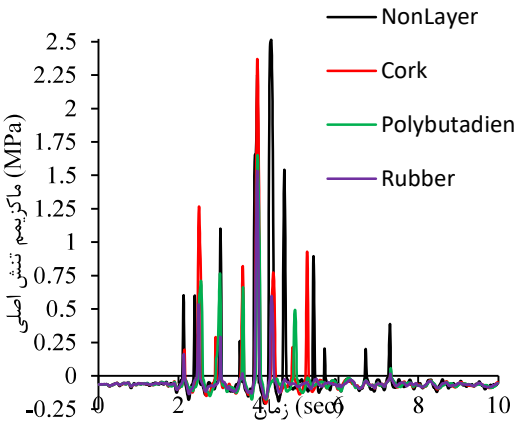
[1] Riley Damping
[2] Modal Analysis
[3] Mode Shapes

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

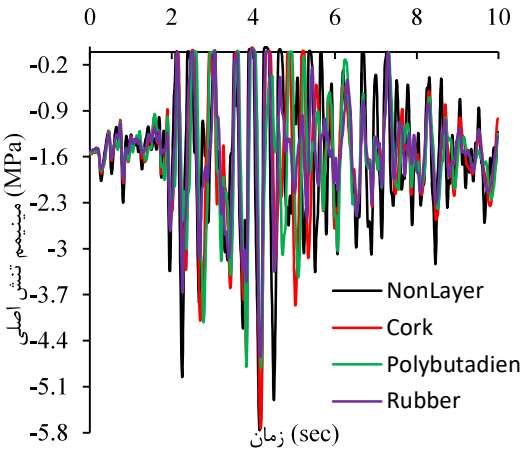
تحلیل‌های دینامیکی سیستم

شکل و طراحی سدهای بتنی وزنی به گونه‌ای است که وزن آن برای پایداری سازه در مقابل کلیه نیروهای وارده، 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 بدنه‌ی سد است که این تنش‌ها، منجر به ترک‌هایی می‌گردند و به دنبال آن ضریب 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 پایین‌دست سد (نقطه B) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS، برای سیستم بدون لایه و دارای لایه‌ی ایزولاسیون با مواد موردنظر در منحنی‌های (۸) و (۹) استخراج شده‌اند.

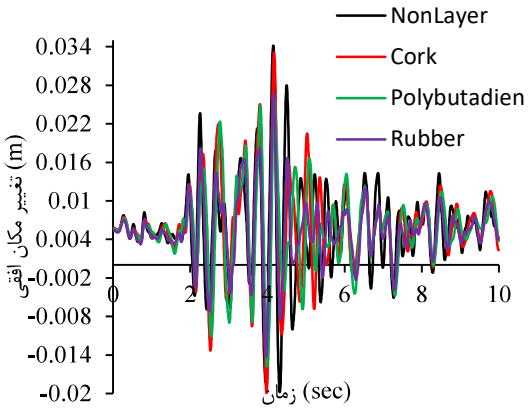


شکل (۸): منحنی پاسخ تاریخچه زمانی تنش اصلی اول در تراز شکستگی بدنه پایین‌دست سد (نقطه B)

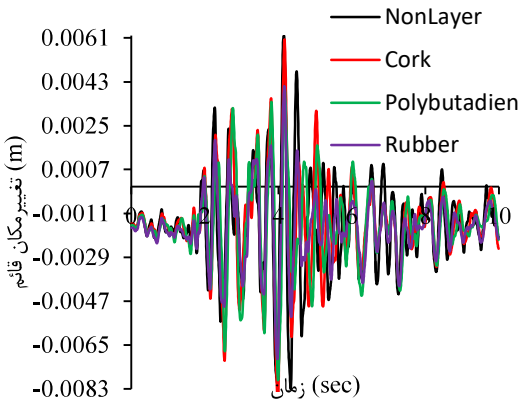


شکل (۹): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی تنش اصلی سوم در تراز شکستگی بدنه پایین‌دست سد (نقطه B)

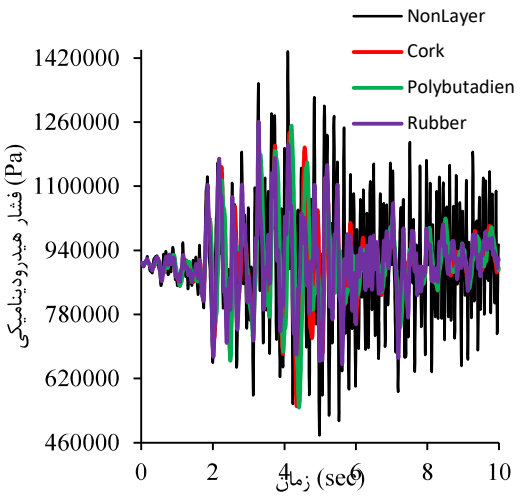
در ادامه به‌عنوان پاسخ تاریخچه زمانی تغییر مکان در جهات افقی و قائم تاج سد و همچنین فشار هیدرودینامیکی برای حالات مختلف بدون لایه و دارای لایه با چهار نوع مدل موردنظر در منحنی‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده‌اند.



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)

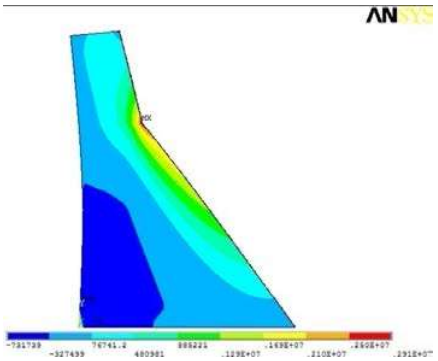


شکل (۱۲): منحنی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی فشار هیدرودینامیکی در نزدیکی پاشنه سد (نقطه C)

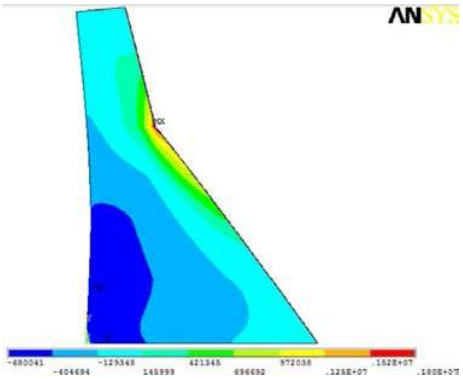
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

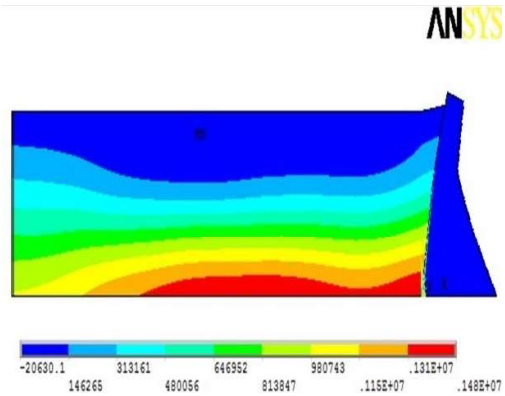
درنهایت برای اینکه روند توزیع تنش اصلی بیشینه در بدنه‌ی سد و همچنین توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن به روشنی نمایش داده شود، نتایج مربوطه برای مدل بدون لایه‌ی ایزولاسیون و همراه با لایه‌ی Rubber به ضخامت‌های ۱۵۰ سانتی‌متری به ترتیب به‌صورت کانتورهایی در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) ارائه شده است.



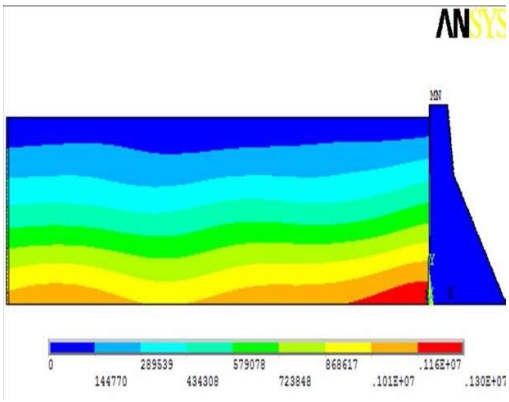
شکل (۱۳): کانتور نمایش تنش اصلی بیشینه در حالت بدون لایه بر حسب (Pa)



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)



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 پایین‌دست سد و نیز مخزن، بیشینه فشار هیدرودینامیکی را دارد.

ارزیابی و مقایسه‌ی 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 پایین‌دست سد (نقطه B)

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

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

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

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

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

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

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

جدول (۸) مقادیر عددی فشار بیشینه هیدرودینامیکی

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

در ادامه جدول (۹) الی (۱۳) به‌عنوان 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

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

جدول (۱۰): درصد کاهش پاسخ تنش‌های اصلی سوم

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

جدول (۱۱): درصد کاهش پاسخ تغییر مکان افقی

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

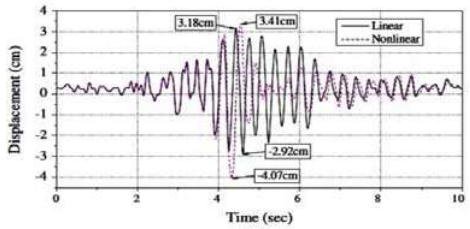
جدول (۱۲): درصد کاهش پاسخ تغییر مکان قائم

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

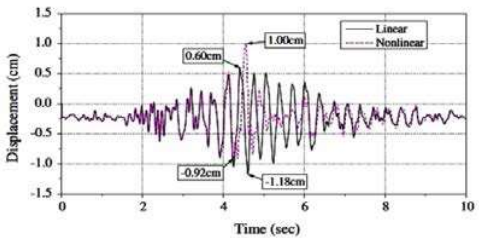
جدول (۱۳): درصد کاهش پاسخ فشار بیشینه هیدرودینامیکی

درصد کاهش مدل بدون لایه نسبت به مدل دارای لایه	بیشینه مثبت (٪)
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)[1] 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

[1] Zhang

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

با توجه به جداول و نمودارهای فوق به روشنی می‌توان دریافت که در مدل‌های پیشنهادی دارای لایه ایزولاسیون متصل به بدنه‌ی بتنی بالادست سد در محل مرزی تماس سیستم سد- مخزن با مصالحی همچون چوب‌پنبه، پلی بوتادین الاستومر و لاستیک، پاسخ‌های لرزه‌ای آنالیز شده کاهش و بهبود می‌یابند؛ اما آنچه واضح هست کاهش بسیار اندک پاسخ‌های 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 بتنی 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 موردی انجام شده بر روی سد کوینا، با اینکه این سد از بابت لغزش و واژگونی مورد طراحی واقع شده بود ولی بعد از زمین‌لرزه کوینا دچار ترک‌خوردگی‌هایی در اطراف بدنه بالادست و پایین‌دست شده بود که ضریب اطمینان طراحی سد را کاهش داده بود. ازاین‌رو در این پژوهش، با ایجاد زمینه در جهت کاهش تنش‌های ایجاد شده بر بدنه‌ی سد در اثر به‌کارگیری لایه‌ی ایزولاسیون، ریسک ایجاد و گسترش ترک‌ها پایین آورده شده و به دنبال آن، تأثیر مؤثری بر میزان اطمینان پایداری سد صورت می‌پذیرد.

نظریه‌ی تعبیه لایه ایزولاسیون، به‌عنوان یک راهکار امیدوارکننده معرفی شد اما انتخاب مصالح مناسب و به‌نوعی میراگر در این پژوهش، چالشی درخور تأمل است. در هر کدام از طرح‌های پیشنهادی، لایه ایزولاسیون در محل شرط‌های مرزی سد - مخزن به سطح رویه‌ی بتنی اتصال یافته و مورد آنالیز و بررسی قرار گرفته شد. هدف از ارائه چنین مدل‌های پیشنهادی متنوع، بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای سد بتنی وزنی است. با دقت در نتایج و بخصوص در جدول درصد کاهش پاسخ‌ها می‌توان گفت که به‌کارگیری لایه جاذب و نرمی همچون لاستیک، نسبت به موادی همچون چوب‌پنبه و پلی بوتادین الاستومر پاسخ‌های بیشینه تنش اصلی در بدنه‌ی سد را کاهش می‌دهد که به دلیل استهلاک امواج فشار هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش سد و مخزن هنگام وقوع زمین‌لرزه به‌وسیله‌ی 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 بتنی و یا حتّی سدهای موجود است، مدل ارائه شده دارای لایه لاستیک، می‌توانند جهت افزایش ضریب اطمینان پروژه‌های عظیم نظیر سدهای وزنی بتنی در برابر بارهای لرزه‌ای، مؤثر و کارآمد باشد. این امر یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از لایه‌ی ایزولاسیون است.

مراجع

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.9.6.6]

1* 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