نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و چهارم /بهار ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 24 / June 2020

بررسی اثرات درزهای قائم روی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی تحت جنبش‌های متفاوت تکیه‌گاهی (مطالعه موردی سد کارون ۴)

حامد نوری ناورود[۱*]
علیرضا مردوخ پور[۲]
رامتین صبح خیز[۳]

چکیده

از گذشته تاکنون توسط محققین، مطالعه رفتار سدها موردتوجه بوده و تحقیقات بسیاری برای شناخت و پیش‌بینی عوامل مؤثر در طراحی این سازه‌ها انجام گرفته است. در تحلیل‌های دینامیکی رایج این‌گونه از سازه‌ها معمولاً از یک شتاب ورودی برای تحلیل استفاده شده است. این در حالی است که ثابت‌شده این قبیل سازه‌ها که در تماس گسترده با زمین می‌باشند، در نقاط مختلف تکیه‌گاهی خود معمولاً شباب‌های مختلفی را تجربه می‌کنند. اعمال شباب‌های مختلف در تکیه‌گاه‌های مختلف روی سازه می‌تواند منجر به افزایش تنش‌ها و جابجایی‌ها در این قبیل از سازه‌ها شود. این تغییر تنش‌ها می‌تواند از مسائل تأثیرگذار بر پایداری سدها باشد؛ بنابراین بررسی دقیق آن روی رفتار دینامیکی سدهای بتنی قوسی از اهمیت زیادی برخورد است. علاوه بر این در اکثر تحلیل‌های صورت گرفته بر سدهای بتنی قوسی، بدنه این سدها به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود، این در حالی است که در عمل و در اجرا این سازه‌ها به‌صورت بلوک‌های بتنی کنار هم با در نظر گرفتن درزهای قائم ساخته می‌شوند. در پژوهش حاضر پس از مدل‌سازی سه‌بعدی سد کارون ۴ به‌عنوان بلندترین سد بتنی قوسی ایران در برنامه المان محدود آباکوس، سعی شده است با اعمال این درزهای قائم مقایسه‌ای بین رفتار دینامیکی سدهای بتنی قوسی تحت تحلیل‌های یکنواخت و غیریکنواخت باحالتی که بدنه سد به‌صورت دیواره یکپارچه مدل‌سازی شده، انجام شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تحلیل‌های غیریکنواخت منجر به افزایش تنش و جابجایی در بدنه سد شده است. علاوه بر این نشان داده شد، درزهای قائم رفتاری مانند تعدیل‌کننده از خود نشان داده و منجر به کاهش جابجایی و تنش روی بدنه سد شده‌اند.

واژه‌های کلیدی:

سد بتنی قوسی، درزهای قائم، پاسخ دینامیکی، جنبش‌های متفاوت تکیه‌گاهی، سد کارون ۴.

---

۱ *- کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان. لاهیجان، ایران
۲. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران
۳. دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۴/ ۰۷/ ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: ۱/ ۰۵/ ۱۳۹۸

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

مقدمه

به دلیل نقش بسیار مهم آب در بخش‌های مختلف ازجمله کشاورزی و صنعت و همچنین در حالت کلی در ادامه حیات بشر، از گذشته‌های بسیار دور تاکنون تلاش‌های بسیاری برای تأمین و ذخیره آن صورت گرفته است. از راه‌های تأمین نیازهای آبی، ساخت سد و آب‌بند است. باگذشت زمان ساختار سدها نیز تغییر کرده و پیچیده‌تر شده‌اند. با پیچیده‌تر شدن ساختار سدها، اهمیت تحلیل‌های پیچیده و دقیق‌تر نیز افزایش می‌یابد. یکی از سدهای محبوب در مهندسی، سدهای بتنی قوسی می‌باشند. علت محبوبیت این نوع از سدهای بتنی، اقتصادی بودن ساخت آن‌ها در ساختگاه‌های مناسب است. بررسی دقیق رفتار دینامیکی سدها به دلیل هزینه‌های بسیار بالای ساخت، نگهداری و بازسازی در صورت نیاز و همچنین خسارات جانی و مالی فراوان در صورت تخریب، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. نکته حائز اهمیت در سدهای بتنی قوسی این است که این سازه باید نیروهای بسیار عظیم ناشی از جمع شدن آب را که بر دیواره نازک سد وارد می‌شود را کنترل کند. علاوه بر آن، باید در برابر نیروهای بسیار مهمی مانند زلزله به دلیل ماهیت پیچیده و غیرقابل‌پیش‌بینی بودن نیز، مقاومت لازم را داشته باشد. از گذشته تاکنون توسط محققین بسیاری، مطالعه رفتار سدها موردتوجه بوده و تحقیقات بسیاری برای شناخت و پیش‌بینی عوامل مؤثر در طراحی این سازه‌ها انجام گرفته است. این تغییر تنش‌ها می‌تواند از مسائل تأثیرگذار بر پایداری سدها باشد؛ بنابراین بررسی دقیق آن روی رفتار دینامیکی سدهای بتنی قوسی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. علاوه بر این در اکثر تحلیل‌های صورت گرفته بر سدهای بتنی قوسی، بدنه این سدها به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود، این در حالی است که در عمل و در اجرا این سازه‌ها به‌صورت بلوک‌های بتنی در کنار هم و با در نظر گرفتن درزهای قائم ساخته می‌شوند. در پژوهش حاضر پس از مدل‌سازی سه‌بعدی سد کارون ۴ به‌عنوان بلندترین سد بتنی قوسی ایران، سعی می‌شود با اعمال این درزهای قائم، مقایسه بین رفتار دینامیکی سدهای بتنی قوسی تحت تحلیل‌های یکنواخت و غیریکنواخت باحالتی که بدنه سد به‌صورت دیواره یکپارچه مدل‌سازی شده، انجام شود. با توجه به اهمیت سدهای بتنی قوسی تاکنون محققین بسیاری در داخل و خارج از کشور مطالعات گسترده‌ای را برای بررسی رفتار دینامیکی این سازه‌ها انجام داده‌اند. در ادامه به مواردی از پژوهش‌های محققین در این زمینه اشاره می‌شود:

جابجایی‌های ثبت‌شده تحت اثر زمین‌لرزه در ۳ نقطه در پایه و در دو طرف دیواره سد در تراز تاج، برای بررسی و مطالعه رفتار لرزه‌ای سد امبیستا[۱] به‌طور مستقیم بکار رفته است. نتایج حاصل‌شده از این پژوهش به‌وضوح نشان داد که تحلیل‌های یکنواخت تفاوت آشکاری با تحلیل‌های غیریکنواخت دارند و ضرورت استفاده از تحلیل‌های غیریکنواخت را بیان می‌کند.(کالچیاتی و همکاران[۲] ۱۹۷۹)

رفتار لرزه‌ای سد قوسی پاکویما[۳] را تحت تحریک‌های غیریکنواخت تکیه‌گاهی موردمطالعه قرار گرفت. برای برآورد میزان جابجایی‌های سطح آزاد دره، یک مدل دوبعدی از دره را تهیه و تحت امواج برشی قرار گرفت (نواک[۴] ۱۹۸۸)

مطالعه‌ای را در مورد رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی تحت تحریک‌های غیریکنواخت در دیواره‌های دره انجام گرفت. در پژوهش از اندرکنش سد و فونداسیون صرف‌نظر شد. سپس مدل تهیه‌شده تحت امواج برشی حجمی در زوایای مختلف قرار گرفت و جابجایی‌های حاصل‌شده برای نقاط مختلف مقایسه شد (کوجیک[۵] ۱۹۸۸)

---

۱ Embista
۲ Calciati
۳ Pacoima
۴ Novak
۵ Kojic

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

پاسخ دینامیکی سد بتنی پاکویما را تحت زلزله نورث ریج[۱] سال ۱۹۹۴ بررسی شد. نشان داده شد که بازشدگی درزه‌ها، موج کاهش تنش‌های کنسول و قوس شده است ولی تحریک‌های غیریکنواخت، این تنش‌ها را افزایش می‌دهد (مجتهدی و فنوس[۲] ۲۰۰۰)

پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی را تحت تحریک‌های غیریکنواخت موردبررسی قرار گرفت. در مطالعه تأثیر هندسی واقعی سه‌بعدی دره، هندسه و مخزن تحت امواج برشی حجمی موردبررسی قرار گرفت (ماسو و همکاران[۳] ۲۰۰۲)

پاسخ دینامیکی سد بتنی قوسی پاکویما را با روش متفاوتی موردبررسی قرار گرفت. با مدل‌سازی بازشدگی درزها، رفتار لرزه‌ای سد تحت این بازشدگی و اثرات آن بر تنش‌های ایجادشده روی بلوک‌ها را بررسی شد (آلوز[۴] ۲۰۰۵)

از طریق توسعه برنامه EACD امکان در نظر گرفتن تحریک غیریکنواخت را به این کد اضافه شد (وانگ و چوبرا[۵] ۲۰۰۸)

با استفاده از الگوریتم عددی جدید، به تولید سری‌های زمانی در نقاط مختلف تکیه‌گاه سد پاکویما با اعمال تأخیر زمانی پرداخته شد. ایشان در پژوهش خود از روش المان مرزی سه‌بعدی استفاده شد و سپس رابطه‌ای را برای طیف ارتباطی متناسب با ساختگاه‌های دره‌ای شکل ارائه شد (تاری نژاد و همکاران[۶] ۲۰۱۳).

رفتار لرزه‌ای سد بتنی قوسی دز را تحت تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاهی با اعمال اثرات مخزن موردبررسی قرار گرفت.(حریری اردبیلی و میرزا بزرگ[۷] ۲۰۱۱). با استفاده از روش زمان دوام، پایداری لرزه‌ای سد بتنی قوسی دز را موردبررسی قرار گرفت. کارایی این روش را در مقایسه با روش تاریخچه زمانی ارزیابی شد (حریری اردبیلی و همکاران[۸] ۲۰۱۴). در پژوهشی اثرات پخش دما در سدهای بتنی قوسی موردبررسی قرار گرفت (میرزا بزرگ و همکاران[۹] ۲۰۱۴). بررسی خصوصیات جنبش چند تکیه‌گاهی و اثرات آن روی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌هایی که دارای سطح تماس گسترده روی زمین می‌باشند همانند پل‌ها، لوله‌های انتقال آب و سدها را موردمطالعه قرار گرفت (لین و همکاران[۱۰] ۱۹۹۷، کنالکی و درکریقیان[۱۱] ۲۰۱۲، آلوز ۲۰۰۵)

با استفاده از روش عددی قدرتمند المان مرزی به بررسی جامع روی رفتار دینامیکی دره‌های منشوری و غیرمنشوری تحت تحریک غیریکنواخت تکیه‌گاهی پرداخته شد. در تحلیل‌های دینامیکی رایج، این‌گونه از سازه‌ها معمولاً از یک شتاب ورودی برای تحلیل استفاده شد. این در حالی است که ثابت‌شده، این قبیل سازه‌ها که در تماس گسترده با زمین می‌باشند، در نقاط مختلف تکیه‌گاهی خود معمولاً شتاب‌های مختلفی را تجربه می‌کنند (تاری نژاد و همکاران ۲۰۱۷).

بنابراین در پژوهش حاضر سعی شده است به این مسئله پرداخته شود. اعمال شتاب‌های مختلف، در تکیه‌گاه‌های مختلف روی سازه‌ها می‌تواند منجر به افزایش تنش‌ها و جابجایی‌ها، در این قبیل از سازه‌ها شود.

مواد و روش‌ها

روش ارتعاش تصادفی

کنترل و نگهداری آب‌های سطحی به دلیل اهمیت بسیار زیاد آن در ادامه حیات همه موجودات همواره حائز اهمیت بوده است. در این میان یکی از سدهای بتنی محبوب که به دلیل شرایط اقتصادی در ساخت و همچنین زیبایی خاص خود ازنظر مهندسی، بیشتر موردتوجه بوده، سد بتنی قوسی می‌باشند. ساخت این سدها علاوه بر فوایدی که در بالا ذکر شد، نشان‌دهنده توانایی مهندسی یک کشور نیز به شمار می‌رود. به دلیل حجم بسیار بالای شدت خسارات ناشی از تخریب و

---

۱ Northridge
۲ Mojtahedi and Fenves
۳ Maeso et al
۴ Alves
۵ Wang and Chopra
۶ Tarinejad et al
۷ Hariri Ardebili and Mirzabozorg
۸ Hariri Ardebili et el
۹ Mirzabozorg et al
۱۰ Lin et al
۱۱ Konakli, and Der Kiureghian

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

هزینه‌های ساخت، نگهداری و ترمیم، بررسی و شناخت دقیق از رفتار این سازه در برابر نیروهایی، ازجمله نیروی زمین‌لرزه را بسیار مهم می‌سازد. روشی که برای تحلیل دینامیکی این قبل سازه‌ها معمولاً مورداستفاده قرار گرفته است، استفاده از جنبش یکنواخت ورودی در پی آن به‌عنوان عامل تحریک لرزه‌ای است. این در حالی است که توسط محققین بسیاری نشان داده‌شده که سازه‌های عظیم همچون سدها و پل‌ها که دارای گستردگی زیاد در سطح زمین می‌باشند، در نقاط مختلف سازه شتاب‌های مختلفی را تجربه کرده‌اند. مطالعات انجام‌شده روی رکوردهای واقعی ثبت‌شده، نشان داده است که زمانی که امواج به سطح زمین می‌رسند، در نقاط مختلف ازنظر دامنه و فاز دارای اختلاف می‌باشند. جنبش متفاوت تکیه‌گاهی باعث ایجاد جابجایی‌های متفاوت در نقاط مختلف سازه شده که می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های اضافی شود. برای بررسی جنبش غیریکنواخت سازه‌ها نیاز به دسترسی به داده‌های تاریخچه زمانی در نقاط مختلف می‌باشد که به علت عدم دسترسی به این داده‌ها انجام این تحلیل‌ها با مشکل مواجه است (بی و هائو[۱] ۲۰۱۱)

تحریک غیریکنواخت زمین‌لرزه روی یک بستر مسطح سنگی با تابع چگالی طیف توان برابر در تمام نقاط، فرض می‌شود. تابع چگالی طیف توان متقاطع برای تحریک زمین‌لرزه بر روی یک سازه در n تکیه‌گاه به‌صورت زیر نوشته می‌شود (بی و هائو ۲۰۱۱)

$$S(i\,\omega)=\begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(i\omega) & S_{1n}(i\omega) \\ S_{21}(i\omega) & S_{22}(i\omega) & S_{2n}(i\omega) \\ S_{n1}(i\omega) & S_{n2}(i\omega) & S_{nn}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در رابطه ارائه‌شده $S_{ij}(i\omega)$ و $S_{ii}(\omega)$، $i.\,j = 1 \dots n$ به ترتیب تابع چگالی طیف توان متقاطع و تابع چگالی طیف توان خود ارتباطی می‌باشند.

بعدازاینکه ماتریس چگالی طیف توان تشکیل شد، به دلیل اینکه یک ماتریس هرمی‌ای[۲] است، می‌توان به‌صورت حاصل‌ضرب دو ماتریس پایین مثلثی در ماتریس هرمی‌ای آن نوشته شود:

(۲)

$$S(i\,\omega) = L(i\omega)L^{H}(i\,\omega)$$

برای تجزیه این ماتریس به‌طور رایج از روش چولسکی[۳] استفاده شده است و سپس درایه‌های ماتریس پایین مثلثی به‌صورت (۳) نوشته می‌شود.

$$L(i\,\omega)=\begin{bmatrix} L_{11}(\omega) & 0 & 0 \\ L_{21}(i\omega) & L_{22}(\omega) & 0 \\ L_{n1}(i\omega) & L_{n2}(i\omega) & L_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

بعد از تعیین درایه‌های ماتریس مثلثی، سری‌های زمانی برای تکیه‌گاه‌های مختلف با استفاده از رابطه 4 تعیین می‌شود. (۴)

$$ui\,(t) = \sum_{m=1}^{i}\cdot\sum_{n=1}^{N} A\,im\,(wn)\cos[\,\omega nt + \beta im(\omega n) + \varphi mn(\omega n)] \quad (۴)$$

در این رابطه $A\,im$ برابر دامنه و $\beta im(\omega)$ فاز سری زمانی تولیدشده می‌باشند. $\varphi mn(\omega)$ فاز تصادفی و n تعداد فرکانس‌های گسسته شده است (بی و هائو ۲۰۱۱)

برای انجام تحلیل غیریکنواخت ۱۰ مجموعه شتاب مختلف تولید و در راستای محور y شکل (۱) روی مرز فونداسیون در ۱۰ قسمت مختلف در فواصل ۱۰۰ متری، به مدل اعمال شد. در شکل (۱) نمونه‌ای از شتاب‌ها و جابجایی‌های تولیدشده، ارائه‌شده است.

معرفی مسئله و پارامترها

سد کارون ۴ بر روی رودخانه کارون در استان چهارمحال و بختیاری احداث و به‌عنوان بلندترین سد بتنی دو قوسی کشور شناخته می‌شود. مطالعات اولیه طرح کارون ۴ در سال ۱۳۴۵ (۱۹۶۷ میلادی) در چارچوب طرح توسعه منابع آب و همچنین

[۱] Bi, K. and Hao, H.

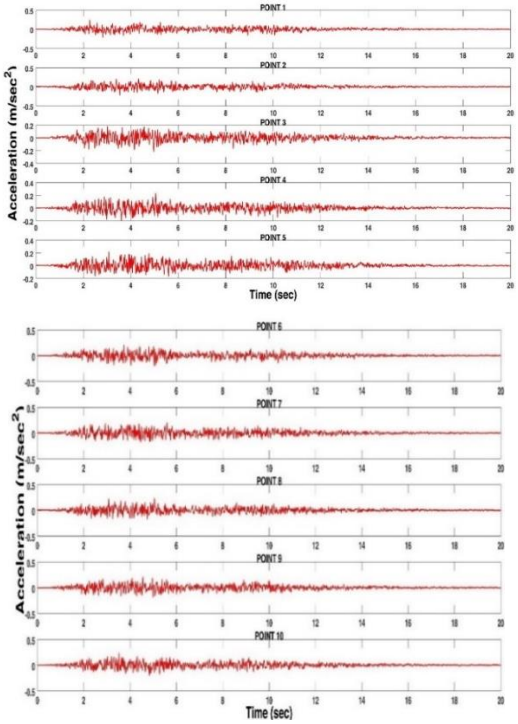
[۲] Hermit

[۳] Choleski

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

برنامه‌ریزی کلی منابع آب حوضه رودخانه کارون توسط شرکت مهندسین مشاور بین‌المللی "هارزا[۱]" انجام پذیرفته است.



شکل (۱): شتاب‌های تولیدشده بر روی سنگ بستر

مطالعات مرحله اول و دوم طرح نیز که توسط شرکت مهندسی مشاور "مهاب قدس" و شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران انجام‌شده و هم‌اکنون مراحل پایانی خود را طی می‌کند. لازم به ذکر است که با توجه به بزرگی و پیچیدگی طرح، در طی مطالعات مرحله دوم شرکت فرانسوی "کوینه بلیه[۲]" نیز به‌عنوان همکار، مطالعات طرح را کنترل و مورد تائید قرار داده است. سد مخزنی کارون ۴ در استان چهارمحال و بختیاری در فاصله ۱۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد و چهار کیلومتری پایین‌دست محل تلاقی رودخانه‌های ارمند و بازفت واقع‌شده است. رودخانه کارون، پرآب‌ترین رودخانه ایران بوده که از سلسله جبال زاگرس سرچشمه می‌گیرد و در پایین‌دست بند انحرافی گتوند وارد دشت خوزستان می‌شود و نهایتاً به خلیج‌فارس می‌پیوندد. در دهه‌های اخیر پتانسیل تولید برق این رودخانه موردتوجه خاص واقع‌شده و اقدامات گسترده‌ای جهت بالفعل نمودن این توانائی صورت پذیرفته است. ازجمله این اقدامات، احداث سری سدهای کارون جهت کنترل سیلاب‌های این رودخانه و تولید انرژی برق‌آبی از کیلومترهای ۳۷۷ تا ۷۴۷ رودخانه است.

از اهداف این سد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تنظیم آب رودخانه کارون به میزان ۳,۷ میلیارد مترمکعب در سال
- کنترل طغیان و سیلاب‌های مخرب رودخانه کارون
- تولید انرژی برق‌آبی به میزان ۲۱۰۷ میلیون کیلووات ساعت



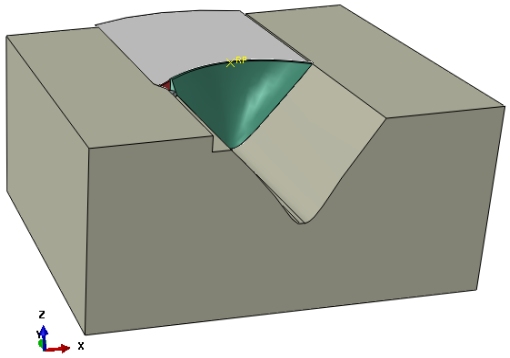
شکل (۲): نمایی از سد و مخزن سد کارون ۴.

جدول (۱): مشخصات مصالح سد و مخزن کارون ۴

بتن بدنه	جرم حجمی	kg/m3۲۴۰۰
	مدول الاستیسیته	GPa۲۴
	ضریب پواسون	۰/۲
	ضریب آلفای میرایی	۱/۱۲
	ضریب بتای میرایی	۰/۰۰۴۲
آب	جرم حجمی	۱۰۰۰
	مدول بالک	۲/۰۷
دریچه	جرم حجمی	۷۸۰۰
	مدول الاستیسیته	۲۰۹
	ضریب پواسون	۰/۳

[۱] Harza
[۲] Koine billie

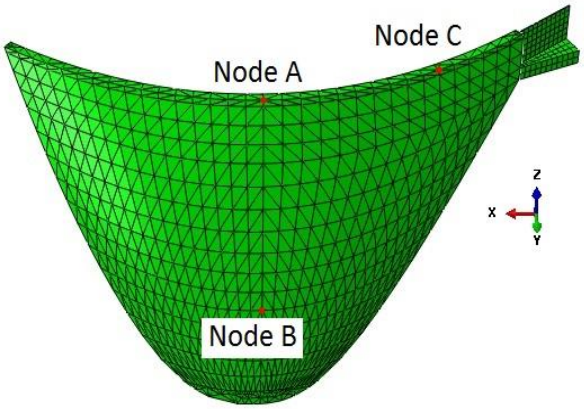
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]



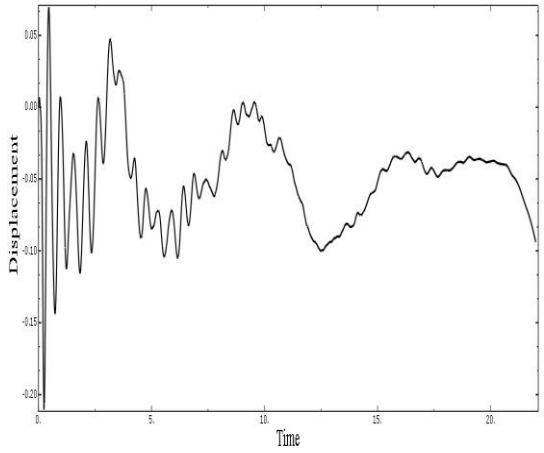
شکل (۳): تصویر سد، مخزن و فونداسیون مدل شده

شبیه‌سازی جنبش زمین‌لرزه و بررسی اثرات آن روی پاسخ لرزه‌ای سد بتنی قوسی بدون درز قائم

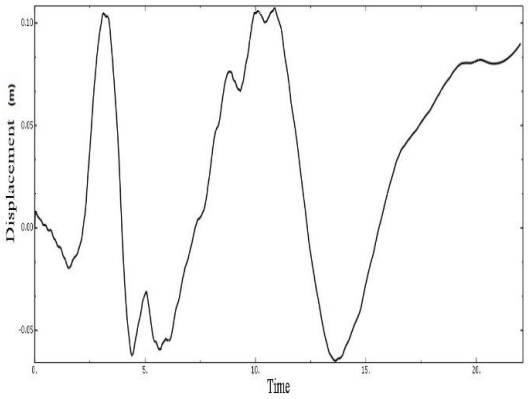
مطابق شکل (۴)، سه نقطه به ترتیب روی تاج، سمت راست در تراز تاج و همچنین یک نقطه روی قسمت میانی سد در بالادست در نظر گرفته شده‌اند. مدل سه‌بعدی تهیه‌شده از سد کارون ۴ در برنامه آباکوس ابتدا تحت جنبش‌های یکنواخت قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج حاصل از این تحلیل، ارائه‌شده است. همان‌گونه که در شکل (۵) قابل‌مشاهده است، نمودار جابجایی تاج سد در نقطه a تحت جنبش یکنواخت جابجایی حداکثر ۲۱ سانتی‌متری را تجربه کرده و چنانکه که مورد انتظار هست باگذشت زمان از این میزان جابجایی کاسته شده است.



شکل (۴): نقاط موردمطالعه روی تاج، سمت راست و قسمت میانی سد.



شکل (۵): نمودار جابجایی (متر) تاج سد (نقطه A) تحت جنبش یکنواخت (متر).

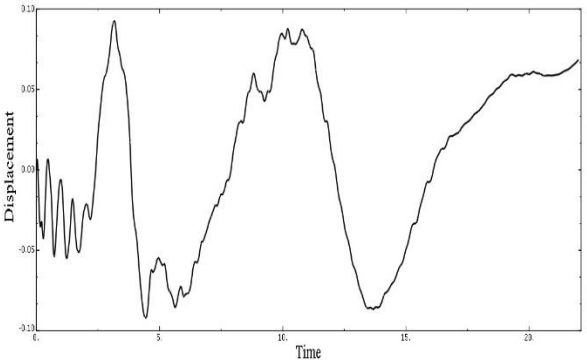


شکل (۶): نمودار جابجایی (متر) نقطه میانی روی سد (نقطه B) تحت جنبش یکنواخت.

در شکل (۶) نمودار جابجایی نقطه میانی روی سد (نقطه b)، تحت جنبش یکنواخت ارائه‌شده است. همان‌گونه که قابل‌مشاهده است، این نقطه نسبت به نقطه هم‌راستای خودش، ولی روی تاج سد، جابجایی کمتری را تجربه کرده، به‌گونه‌ای که حداکثر جابجایی در این نقطه برابر ۱۱ سانتی‌متر و تقریباً به‌اندازه نصف نقطه تاج سد جابجا شده است. در ادامه در شکل (۷) نمودار جابجایی نقطه روی سمت راست تحت جنبش یکنواخت ارائه‌شده است. همان‌گونه که قابل‌مشاهده است این نقطه در مقایسه با نقطه b نوسان بیشتری را نشان می‌دهد.

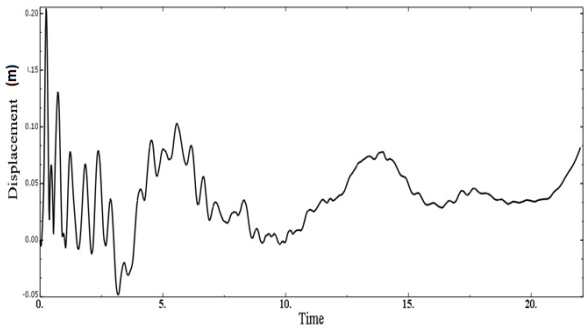
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

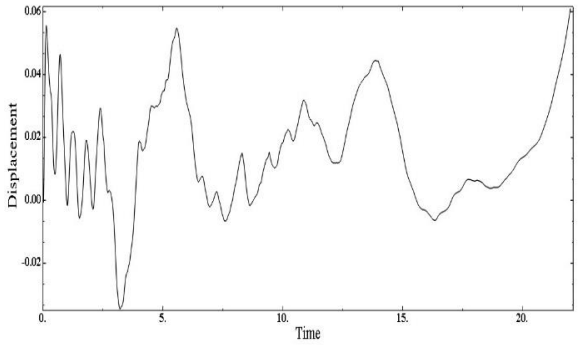


شکل (۷): نمودار جابجایی (متر) نقطه روی سمت راست (نقطه C) تحت جنبش یکنواخت.

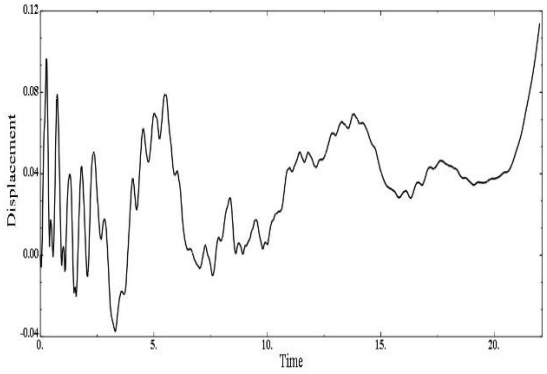
در ادامه تحلیل‌های انجام‌شده در این بخش، سد تحت شتاب‌های غیریکنواخت قرار می‌گیرد. شکل‌های ۹،۸ و ۱۰ نمودار جابجایی نقاط مختلف روی بدنه‌ی سد را در این وضعیت نشان می‌دهند. همانطورکه نشان داده می‌شود، نقطه تاج سد تحت شتاب غیریکنواخت، جابجایی حداکثری ۲۲ سانتی‌متری را تجربه کرده است. این حالت نسبت به وضعیت یکنواخت، نوسان و مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. در شکل (۹) تغییر مکان نقطه b مقدار حداکثری ۶ سانتی‌متر را در وضعیت جنبش غیریکنواخت نشان می‌دهد این در حالی است که در حالت جنبش یکنواخت، این نقطه مقدار بیشتری را تجربه کرده بود. علاوه بر این، چنانکه قابل‌مشاهده است این نقطه نوسان بیشتری را در حالت دوم ثبت کرده است. در شکل (۱۰) نمودار جابجایی نقطه سمت راست روی سد (نقطه C) تحت شتاب‌های غیریکنواخت ارائه‌شده است. این نقطه حداکثر جابجایی ۱۲ سانتی‌متر را ثبت کرده و نسبت به وضعیت جنبش یکنواخت، جابجایی و نوسان بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل (۸): نمودار جابجایی نقطه تاج سد (نقطه A) تحت شتاب‌های غیریکنواخت



شکل (۹): نمودار جابجایی (متر) نقطه میانی روی سد (نقطه B) تحت شتاب‌های غیریکنواخت



شکل (۱۰): نمودار جابجایی (متر) نقطه سمت راست روی سد (نقطه C) تحت شتاب‌های غیریکنواخت

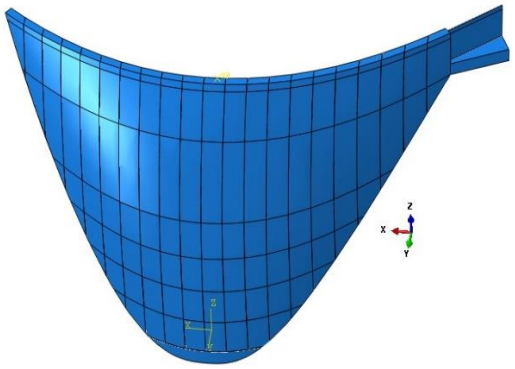
ارزیابی اثرات درزهای قائم روی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی تحت جنبش‌های یکنواخت و غیریکنواخت ساختگاهی

در ادامه تحلیل‌های انجام‌شده روی رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی، در این بخش اثرات درزهای قائم روی پاسخ دینامیکی سدهای بتنی قوسی در حالت جنبش‌های غیریکنواخت، بررسی و باحالت بدون درزه مقایسه می‌شود. برای انجام این مقایسه همانند قسمت‌های قبلی از سد کارون ۴ و مدل‌سازی در برنامه آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی سد بتنی قوسی با درزه، ابتدا بدنه سد به شکل بلوک‌های جدا از هم ساخته و سپس در کنار هم قرار گرفتند. در ادامه، خصوصیات درزه بین بلوک‌ها، با تعریف تماس بین سطوح، مدل‌سازی شد.

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

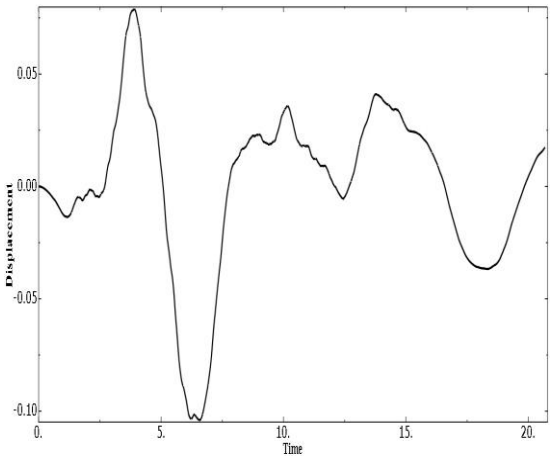
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

شکل (۱۱) سد بتنی دو قوسی کارون ۴ با مدل‌سازی درزه‌های قائم بین بلوک‌ها را نشان می‌دهد.

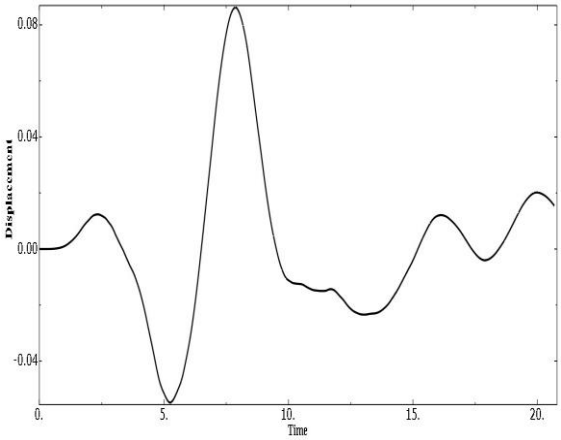


شکل (۱۱): سد کارون ۴ به همراه درزهای قائم بین بلوک‌ها

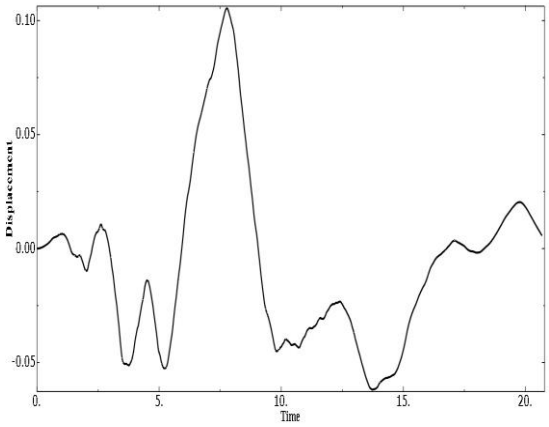
مطابق شکل (۴)، سه نقطه به ترتیب روی تاج، سمت راست در تراز تاج و همچنین یک نقطه روی قسمت میانی سد در بالادست در نظر گرفته شده‌اند. مدل سه‌بعدی تهیه‌شده از سد کارون ۴ با اعمال درزه‌های قائم در برنامه آباکوس، ابتدا تحت جنبش‌های غیریکنواخت قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج حاصل‌شده از این تحلیل، ارائه‌شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) قابل‌مشاهده است، نمودار جابجایی تاج سد در نقطه a تحت جنبش غیریکنواخت، جابجایی حداکثر ۱۱ سانتی‌متری را تجربه کرده و همان‌طور که انتظار می‌رود، باگذشت زمان، از این میزان جابجایی کاسته شده است. این میزان جابجایی، در مقایسه با سد بدون درز و با بدنه یکپارچه، پاسخ کاهشی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۳) نمودار جابجایی نقطه میانی سد (نقطه b) تحت جنبش غیریکنواخت ارائه‌شده است. چنانکه قابل‌مشاهده است، این نقطه نسبت به نقطه هم‌راستای خودش، ولی روی تاج سد، جابجایی کمتری را تجربه کرده، به‌گونه‌ای که حداکثر جابجایی در این نقطه برابر ۹ سانتی‌متر است. در ادامه در شکل (۱۴) نمودار جابجایی نقطه روی سمت راست تحت جنبش غیریکنواخت ارائه‌شده است. همان‌گونه که قابل‌مشاهده است، این نقطه در مقایسه با نقطه b، نوسان و میزان جابجایی بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): نمودار جابجایی (متر) تاج سد (نقطه A) تحت جنبش غیریکنواخت با درزهای قائم



شکل (۱۳): نمودار جابجایی (متر) نقطه B تحت جنبش غیریکنواخت با درزهای قائم

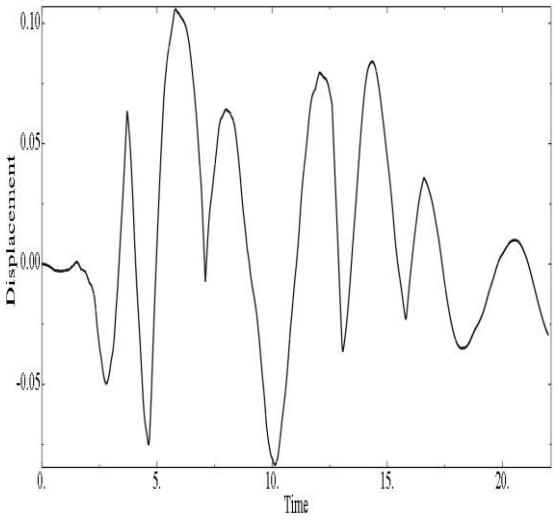


شکل (۱۴): نمودار جابجایی (متر) نقطه C تحت جنبش غیریکنواخت با درزهای قائم

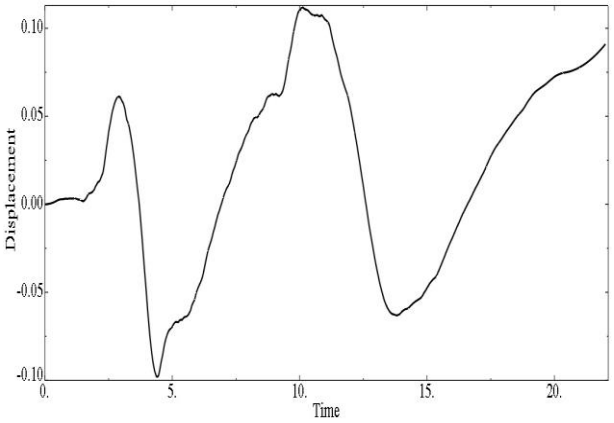
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

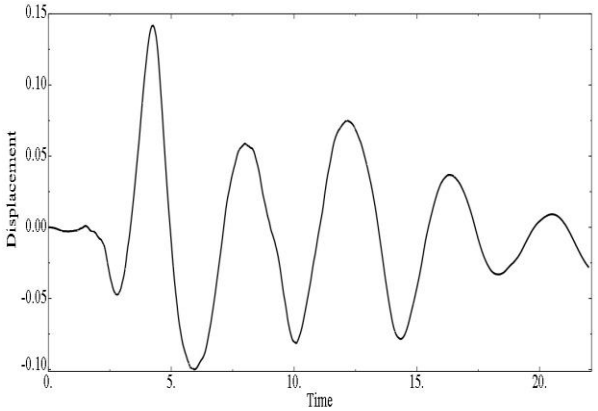
همان‌گونه که در شکل (۱۵) قابل‌مشاهده است، نمودار جابجایی تاج سد در نقطه A تحت جنبش یکنواخت، جابجایی حداکثر ۱۰ سانتی‌متری را تجربه کرده و باگذشت زمان، از این میزان جابجایی کاسته شده است. این میزان جابجایی، در مقایسه با سد بدون درز و با بدنه یکپارچه، پاسخ کاهشی را نشان می‌دهد. در شکل (۱۶) نمودار جابجایی نقطه میانی روی سد (نقطه B) تحت جنبش یکنواخت، ارائه‌شده است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، این نقطه نسبت به نقطه هم‌راستای خودش، ولی روی تاج سد، جابجایی برابر را تجربه کرده، به‌گونه‌ای که حداکثر جابجایی در این نقطه، برابر ۱۰ سانتی‌متر است. در ادامه در شکل (۱۷) نمودار جابجایی نقطه روی سمت راست، تحت جنبش یکنواخت ارائه‌شده است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، این نقطه در مقایسه با نقطه b، نوسان و میزان جابجایی بیشتری را نشان می‌دهد. در ادامه‌ی تحلیل‌های انجام‌شده روی این سه نقطه تحت جنبش یکنواخت زمین‌لرزه، تنش‌های ایجادشده نیز روی این سه نقطه موردبررسی و ارزیابی قرار گرفتند.



شکل (۱۵): نمودار جابجایی (متر) تاج سد (نقطه A) تحت جنبش یکنواخت با درزهای قائم



شکل (۱۶): نمودار جابجایی (متر) نقطه B تحت جنبش یکنواخت با درزهای قائم



شکل (۱۷): نمودار جابجایی (متر) نقطه C تحت جنبش یکنواخت با درزهای قائم

جدول (۲): ماکزیمم جابجایی (برحسب متر) مشاهده‌شده ناشی از تحلیل دینامیکی سد کارون ۴

تحلیل یکنواخت	سد بدون درز قائم	نقطه A	۰/۲۱
		نقطه B	۰/۱۱
		نقطه C	۰/۹
	سد با درز قائم	نقطه A	۰/۱
		نقطه B	۰/۱
		نقطه C	۰/۱۵
تحلیل غیریکنواخت	سد بدون درز قائم	نقطه A	۰/۲۲
		نقطه B	۰/۶
		نقطه C	۰/۱۲
	سد با درز قائم	نقطه A	۰/۱۱
		نقطه B	۰/۹
		نقطه C	۰/۱۰

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت آب در ادامه حیاط انسان، تلاش محققین بر این بوده است تا با روش‌های مختلف، این مایع حیات را، حفاظت و ذخیره کنند. کشور عزیزمان ایران نیز به دلیل قرارگیری در یک ناحیه خشک و کم آب، مسئله ذخیره‌سازی آب در آن، اهمیت بسیار بالایی پیدا می‌کند. یکی از روش‌های ذخیره‌سازی آب، ساخت سد است. ازجمله مهم‌ترین سدهایی که تاکنون ساخته‌شده، سدهای بتنی قوسی است. این نوع سدها، هم به لحاظ مهندسی، هم در طراحی و اجرا، جز سدهای خاص به شمار می‌روند. چنان‌که قبلاً اشاره شد، محققین بسیاری، اهمیت و ضرورت در نظر گرفتن تحلیل‌های متفاوت تکیه‌گاهی را بخصوص برای سازه‌های حساسی، همچون سد، پل، لوله انتقال آب و... اثبات کرده‌اند. در پژوهش حاضر با استفاده از روش ارتعاش تصادفی شتاب‌های غیریکنواخت تکیه‌گاهی روی ساختگاه سد کارون ۴ تولید شد. سپس مدل‌سازی ۳ بعدی سد کارون ۴ در برنامه المان محدود آباکوس انجام شد. در ادامه مدل تهیه‌شده، تحت این شتاب‌ها قرار گرفت. لازم به ذکر است، برای مدل‌سازی سد کارون ۴، از دو حالت مختلف استفاده شده است که به ترتیب، بدون اعمال درز قائم و با اعمال درزهای قائم است.

نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل دینامیکی به شرح ۵ مورد زیر است:

۱- افزایش جابجایی در حالت تحریک متفاوت تکیه‌گاهی، نسبت به حالت یکنواخت مشاهده می‌شود. همچنین وجود درزهای قائم، چنان‌که انتظار می‌رفت موجب کاهش جابجایی و تنش در نقاط مختلف روی سد شده است.

۲-جابجایی تاج سد تحت تحریک غیریکنواخت، نسبت به تحریک یکنواخت در حالت بدون اعمال درز قائم جابجایی بیشتری را نشان می‌دهد.

۳-برای تاج سد، چه در حالت یکنواخت و چه در حالت غیریکنواخت، میزان جابجایی با درز قائم، تقریباً نصف مقدار حداکثر جابجایی نسبت به وضعیت بدون درز قائم است.

۴- جابجایی نقطه میانی روی سد تحت تحریک غیریکنواخت، نسبت به تحریک یکنواخت، جابجایی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین تفاوت محسوسی بین وضعیت وجود درز قائم و عدم وجود درز قائم، مشاهده نمی‌شود.

۵- جابجایی قسمت سمت راست روی سد تحت تحریک غیریکنواخت، نسبت به تحریک یکنواخت در حالت بدون اعمال درز قائم جابجایی کمتری را نشان می‌دهد. همچنین، هم در حالت یکنواخت و هم غیریکنواخت، میزان جابجایی با درز قائم کمتر از حداکثر جابجایی نسبت به وضعیت بدون درز قائم می‌باشد؛ به‌طوری‌که در تحلیل یکنواخت به ۲۵ درصد جابجایی و در تحلیل غیریکنواخت با کاهش ۱۶ درصدی جابجایی بدون درز قائم روبرو است.

مراجع

1- Calciati, F. Castoldi, A.Ciacci, R. and Fanelli, M.1979. Experience gained during in-situ artificial and natural dynamic excitation of large concrete dams in Italy: Analytic interpretation of result. Proceeding of ICOLD 13 Congress, New Delhi, pp.1377-1402

2- Nowak, P.S,1988. Effect of Non-Uniform Seismic Input on Arc Dam. PhD dissertation report No. EERL. -88-03-California Institute of Technology, Pasadena, California

3- Kojic, S.B.1988. Earthquake response of arc dam to non-uniform canyon motion. PhD dissertation, Southern California University

4- Mojtahedi, S. and Fenves, G.L.2000. Response of concrete Arch dam in the 1994 Northridge, California Earthquake, 11 WCEE,1713

5- Maeso O, Aznarez. J. and Domiguez, J.2002. Effect of Space Distribution of excitation on seismic response of Arch Dam. journal of engineering mechanic. 128,759-768

6- Alves SW.2004 “Nonlinear Analysis of Pacoima Dam with Spatially Nonuniform Ground Motion”, In Partial Fulfillment of the Requirements for the

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

Degree of Doctor of Philosophy. California Institute of Technology Pasadena, California

7- Wang, J. and Chopra, A. k.2008. A computer program for three-dimensional analysis of concrete dams subjected to spatially ground motion. Report NO. UCB/EERC-2008/04.Earthqueke Engineering Research center, University of California, Berkeley, California

8- Tarinejad, R, Fatehi R and Harichandarn, R.S. 2013 Response of an arch dam to non-uniform excitation generated by a seismic wave scattering model, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 52, Pages 40-54

9- Hariri-Ardebili, M.A. and Mirzabozorg, H. 2011, Reservoir Fluctuation Effects on Seismic Response of High Concrete Arch Dams Considering Material Nonlinearity, Journal of Civil Engineering Research, 1(1), pp.9-20

10- Hariri-Ardebili, M.A. Mirzabozorg, H. and Kianoush, M.R. 2014, Structural Safety of High Arch Dams with Variable Water Levels Based on Seismic Performance Evaluation, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 38(C1+), pp.175-190

11- Mirzabozorg, H. Hariri-Ardebili, M.A. Shirkhan, M. and Seyed-Kolbadi, S.M. 2014, Mathematical Modeling and Numerical Analysis of Thermal Distribution in Arch Dams considering Solar Radiation Effect, Scientific World Journal, Vol.2014, Article ID 597393, 15 pages, DOI: 10.1155/2014/597393

12- Harichandran RS, Vanmarcke EH. 1986 Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time. Journal of the Engineering Mechanics Division. 112:154–74

13- Luco, J.E. and Wong, H. L. 1986 Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, 891-908

14- Abrahamson NA. 1993 Spatial variation of multiple support inputs. In: Proceedings of the 1st US Seminar on Seismic Evaluation and Retrofit of Steel *Bridges*, San Francisco, CA

15- Der Kiureghian A, Neuenhofer A. 1992 Response spectrum method for multiple- support seismic excitation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 21:712–40

16-Harichandran, R. S. Hawwari, A. and Sweidan, B. N. 1996 Response of long-span bridges to spatially varying ground motion. J. Struct. Eng. 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:5(476), 476–484

17- Lin, J. Li, J. Zhang, W. and Williams, F. W. 1997 Random seismic responses of multi-support structures in evolutionary inhomogeneous random fields, Earthquake engineering & structural dynamics 26(1), 135-145

18- Konakli, K. and Der Kiureghian, A. 2012. Simulation of spatially varying ground motions including inherence, wave-passage and differential site-response effects. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 41(3), 495–513

19- Alves, S.W. 2005, *Nonlinear analysis of Pacoima Dam with spatially non-uniform ground motion*, PhD Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California

20- Tarinejad, R. Isari, M. TaghaviGhalesari, A. 2017 A new boundary element solution to evaluate the geometric effects of the canyon site on the displacement response spectrum, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, In press

21- Tarinejad, R. Mahjoob, H. Roshanravan, A. 2015 Development of a Neural-Autoregressive Model for Time History Analysis of an Arch Dam-Reservoir System, 10th International Congress on Civil Engineering, 5-7, University of Tabriz, Tabriz, Iran. states department of the interior, u.s. geological survey

22- Bi, K. and Hao, H. 2011 Influence of irregular topography and random soil properties on coherency loss of spatial seismic ground motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics **40**,1045–1061

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]

Investigating the Effects of Vertical Joint on the Seismic Behavior of Arched Concrete Dams under Non uniform Excitation (Case Study of Karun4 Dam)

Hamed Nouri Navroud[1*]
Alireza Mardokhpour[2]
Ramtin Sobhkhiz Foumani [3]

Abstract

Dam behavior investigation has been considered for a long time, with many studies conducted to identify and predict factors influencing such structures. In common dynamic analyses of dams, an input acceleration is typically used. At the same time, it was proved that such structures with a large contact with the ground usually experience different accelerations in their various supporting points. Applying different accelerations on different supports of a structure can increase their stresses and displacements. The stresses can be among factors affecting dam stability. Thus, it is very important to accurately study its effect on the dynamic behavior of arc concrete dams. Furthermore, in most arc dam analyses, their bodies have been treated as integrated, while such dams are constructed by putting together concrete blocks with vertical joints in practice. In the current study, after building an ABAQUS three-dimensional model of Karoon-4 Dam as the tallest arc concrete dam in Iran, it was attempted to apply the vertical joints to compare the dynamic behavior of arc concrete dams under uniform and non-uniform analyses and the case in which the dam body is modeled in an integrated form. The results revealed that the non-uniform analysis increased the stresses and displacement of the dam body. In addition, as expected, the vertical joints exerted a damper-like behavior and reduce stresses and displacement of the dam body.

Keywords: Arc Concrete Dam, Vertical Joints, Dynamic Response, Different Support Motions, Karoon-4 Dam

[1] * M.sc of Civil Engineering Department, Islamic Azad University of Lahijan, Lahijan, Iran.
[2] Assistance professor, Civil Engineering Department, Islamic Azad University of Lahijan, Lahijan Iran.
[3] PhD of Civil Engineering Department, Qom University, Qom, Iran.

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

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.3.1]