

بررسی پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سدهای بتنی قوسی موجود تحت ورودی زلزله کالیبره شده حاصل از روش دیکانولوشن

مهدی ورمزیاری^۱، سعیدرضا صباغ یزدی^{۲*}، حسن میرزابزرگ^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استاد گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. دانشیار گروه مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*syazdi@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۷/۰۹/۱۳]

تاریخ دریافت: [۹۶/۰۷/۰۸]

چکیده

در این مقاله آثار ورودی زلزله کالیبره شده حاصل از روش دیکانولوشن در بستر پی روی پاسخ خطی و غیرخطی سدهای بتنی قوسی بررسی شده است. غیرخطی، ناشی از لغزش و باز و بسته شدن درزهای انقباضی بدنه سد می‌باشد. دریاچه تراکم‌پذیر فرض شده و با روش المان محدود و شرایط مرزی مناسب مدل شده است. برای جلوگیری از انعکاس امواج منتشرشده به داخل پی از شرایط مرزی ویسکوز استفاده شده است. سد شهید عباسپور به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و آنالیز در دو گام صورت می‌گیرد: نخست آنالیز دیکانولوشن انجام می‌شود که دامنه و محتوی فرکانسی زلزله اعمالی به بستر مدل پی را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که پاسخ شتاب مطلوب در سطح مشترک پی-سد به دست آید و با زلزله میدان آزاد هماهنگی داشته باشد سپس، پاسخ سیستم سد-پی-دریاچه تحت زلزله کالیبره شده اعمالی در بستر پی محاسبه می‌شود. نتایج روش دیکانولوشن موجود هماهنگی خیلی خوبی را بین پاسخ بازتولید شده در نقاط مختلف دره تحت زلزله کالیبره شده و مولفه‌های افقی زلزله میدان آزاد نشان می‌دهد. از یک روش دیکانولوشن اصلاح شده‌ای برای زلزله قائم استفاده شده است که همگرایی بهتری را برای زلزله‌های فرکانس بالا نتیجه می‌دهد. نوآوری این مقاله بررسی آثار ورودی زلزله کالیبره شده حاصل از روش دیکانولوشن علاوه بر آثار غیرخطی درزهای انقباضی و پی جرمدار بر پاسخ سیستم سد-پی-دریاچه است. بر اساس نتایج، مدلسازی درزهای انقباضی باعث کاهش تنش کششی به محدوده مجاز تنش در نواحی میانی تاج سد و تکیه گاه‌های نزدیک تاج سد شده است.

واژگان کلیدی: تحلیل لرزه‌ای غیرخطی، سدهای قوسی، دیکانولوشن، درز انقباضی، اندرکنش سد-پی-دریاچه. پی جرمدار

۱- مقدمه

بالا رفتن عمر سد و ظاهر شدن خرابی در سدهایی که تحت اثر زلزله در ابتدا و اواسط قرن بیستم بوجود آمده است، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. چنین سدهایی باید به

سدها سازه‌های عظیمی هستند که ممکن است خطرات بالقوه‌ای را تحت زلزله به همراه بیاورند. این امر به ویژه به دلیل

صورت منظم و در دوره‌های زمانی مشخصی مورد بازبینی کلی از نظر ایمنی لرزه‌ای قرار گیرند. چهار مدل زیر بطور عمومی برای شبیه سازی سازوکار ورودی زلزله در نظر گرفته می‌شوند: مدل با بستر صلب، مدل با پی بدون جرم، مدل با ورودی شتاب میدان آزاد و مدل با ورودی زلزله کالیبره شده حاصل از دیکانولوشن. مشخص شده که مدل اولی با پی صلب بزرگنمایی غیر ضروری در نتایج ایجاد می‌کند [1]. چوپرا در مطالعه خود گزارش کرد که مدل کردن پی بدون جرم منجر به دست بالا گرفتن تنش‌های داخل بدنه سد در حدود دو تا سه برابر می‌شود [2]. در مورد مدل ورودی زلزله میدان آزاد که شتاب مستقیم به سطح مشترک پی-سد اعمال می‌شود به یک خطای مهمی در سطح تنش‌ها و موقعیت آنها در پاسخ تخمین زده شده سوق داده می‌شود [3]. در مورد مدل ورودی زلزله حاصل از دیکانولوشن ابتدا یک آنالیز دیکانولوشن انجام می‌شود که در نتیجه آن دامنه و محتوی فرکانسی رکورد زلزله اعمالی به بستر مدل پی را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که پاسخ شتاب مطلوب در سطح مشترک پی و سد در نقاط مختلف به دست آید و با زلزله میدان آزاد یا زلزله طرح هماهنگی داشته باشد سپس پاسخ سیستم سد-پی-دریاچه تحت این زلزله کالیبره شده اعمالی در کف پی محاسبه می‌شود. برای ارائه نتایج نزدیک بر واقعیت لازم است رفتار غیرخطی حاصل از لغزش و باز و بسته شدن درزها در بدنه سد نیز مدل سازی شود. درخصوص مطالعات صورت گرفته در این زمینه، در پژوهشی رفتار طره مرکزی یک سد بتنی قوسی که توسط بلوک‌های مجاور محدود شده است صورت گرفته است [4]. با استفاده از این مدل که با یک مدل تست مقیاسی تأیید شد نتیجه گرفته شد که آثار مدلسازی درزها در پاسخ لرزه‌ای سدهای قوسی قابل ملاحظه است.

۲- تاریخچه تحقیقات

برای ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سدهای موجود، یک آنالیز جامع سه بعدی که بتواند موارد زیر را در بر گیرد لازم است: (۱) اندرکنش سد-پی-دریاچه، (۲) رفتار غیرخطی ناشی از لغزش و بازشدگی درزهای انقباضی عمودی، (۳) اعمال شرایط

مرزی مناسب در حد امکان نزدیک به واقعیت در محیط سیال و مرز دور پی، (۴) انتخاب ورودی زلزله کالیبره شده که بتواند پاسخی برابر با زلزله طرح در سطح مشترک سد-پی مدل پی ایجاد نماید. چندین پژوهشگر بر روی پاسخ خطی سدهای بتنی قوسی با فرض پی بدون جرم مطالعه کردند [5]. برنامه کامپیوتری EACD-3D یک روش تحلیلی برای آنالیز لرزه‌ای سه بعدی سدهای بتنی قوسی شامل آثار اندرکنش سد و دریاچه و همچنین انعطاف پذیری پی است و برای تحلیل در فضای فرکانسی از آن بهره گرفته می‌شود [6]. نسخه EACD-3D-96 به گونه‌ای توسعه یافته است که آثار میرایی تشعشی و اینرسی ناشی از جرم پی را نیز شامل می‌شود [7]. با این وجود، این برنامه قابلیت مدلسازی رفتار غیرخطی شامل باز و بسته شدن و لغزش درزها را ندارد. میرزابزرگ و همکارانش [8] اثر عبور موج عبوری زلزله را در طول کف دریاچه بر پاسخ لرزه‌ای سد قوسی بررسی کردند. در مطالعه آنها پی به صورت محیط جرم‌دار فرض شده بود. باوجود این، از رفتار غیرخطی باز و بسته شدن و لغزش درزها صرف‌نظر شده بود و ورودی زلزله در سطح مشترک سد-پی و دریاچه -پی اعمال شد.

میرزابزرگ و همکارانش در سال ۲۰۱۶ آثار مدلسازی پی جرم‌دار را بر پاسخ غیرخطی سدهای بتنی قوسی موجود شامل عملکرد درزهای عمودی و محیطی در بدنه سد بررسی کردند [9]. نتایج آنها نشان داد که ماکزیمم تنش‌های اصلی کششی و فشاری در بدنه سد با فرض رفتار غیرخطی درزها به ترتیب ۳۲ و ۲۵ درصد نسبت به نتایج مدل با پی بدون جرم کاهش می‌یابد. عالم‌باقری و قائمیان در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای را روی عملکرد لرزه‌ای سد بتنی قوسی Morrow Point که شامل درزهای عمودی در بدنه سد می‌شد انجام دادند [10]. آنها نتیجه گرفتند که افزایش تعداد درزها باعث کاهش عمومی تغییر مکان بازشدگی و لغزش درزها می‌شود و مدل سازی درز، ایمنی لرزه‌ای سد را افزایش می‌دهد. احمدی و همکاران یک مدل المان درزه غیرخطی برای تحلیل سیستم سد قوسی و مخزن ارائه کردند. اندرکنش کامل دینامیکی سد در نظر گرفته شد و از اندرکنش پی با سازه صرف‌نظر شد. در مطالعه آنها سد قوسی موروپونت تحت زلزله تفت تحلیل شده و مشاهده شد که

تنش‌های کششی از مقاومت کششی بتن فراتر رفته اما تنش‌های فشاری هنوز در حد الاستیک باقی مانده بودند [11]. به هر حال کارهای کمی صورت گرفته که در آنها به صورت همزمان آثار پی جرم‌دار، غیرخطی ناشی از درزهای انقباضی بدنه سد و حرکات زمین را به شکل ورودی زلزله منطبق بر واقعیت بر پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی لحاظ کند.

در میان سازوکار مختلف ورودی زلزله، مدل ورودی زلزله بر پایه روش دیکانولوشن^۱ یک روش ارجح است که آثار پخش موج را در مرزهای مصنوعی محیط نیمه بینهایت پی حذف می‌کند. دیکانولوشن یک فرایند ریاضی است که دامنه محتوی فرکانسی رکورد زلزله اعمالی به بستر پی را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که پاسخ شتاب مطلوب در سطح مشترک پی و سد به دست آید و با زلزله سطح زمین (میدان آزاد) هماهنگی داشته باشد. پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی تحت سازوکار مختلف ورودی زلزله توسط Bayrakhtar و همکاران صورت گرفته است. بر اساس نتایج، مدل ورودی زلزله در بستر پی بر اساس دیکانولوشن جابجایی، تنش و فشار هیدروستاتیک کمتری را نسبت به مدل فونداسیون بدون جرم و مدل فونداسیون صلب نتیجه می‌دهد [12]. در سال ۲۰۱۱، Sooch ارزیابی لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی را تحت سازوکار ورودی مختلف زلزله بررسی کرد که در آن از روش دیکانولوشن موجود و اصلاح شده برای طیف متنوعی از زلزله‌ها استفاده شد. بر اساس نتایج کار ایشان، مدل ورودی زلزله بر پایه روش دیکانولوشن نسبت به مدل زلزله میدان آزاد و مدل فونداسیون بدون جرم، نتایج هماهنگ بر واقعیت بدست می‌دهد [13]. مطالعات متنوعی روی سازوکار ورودی مختلف زلزله مورد مطالعه قرار گرفته است [14]. مدل‌های استفاده شده در مطالعه آنها شامل بستر سنگی، پی بدون جرم، رکوردهای ورودی زلزله بر پایه روش دیکانولوشن و ورودی زلزله میدان آزاد^۲ بود. برنامه کامپیوتری SHAKE در مرجع [15] برای دیکانولوشن زلزله ورودی برای طیف وسیعی از مطالعات قبلی استفاده شده است [16]. به هر حال استفاده دیکانولوشن در روش

SHAKE خیلی پرزحمت است از آنجایی که پاسخ بدست آمده در طول این برنامه به مقادیر پارامترهای کنترل کننده شبیه مدول برشی، نسبت میرایی ویسکوز در مورد پی انعطاف پذیر خیلی حساس است. در سال ۲۰۱۴، در پژوهشی آثار دو سازوکار مختلف ورودی زلزله شامل مدل ورودی پی بدون جرم و زلزله کالیبره شده در بستر پی بر پاسخ سد قوسی بررسی شد. نتایج نشان داده است که مدل ورودی پی بدون جرم منجر به افزایش بازشدگی و لغزش درزها و همچنین افزایش تنش کششی و فشاری در بدنه سد در حدود ۲۱ و ۳۳ درصد در مقایسه با تحریک در بستر پی شده است [17]. در پژوهشی جامع روی رفتار لرزه‌ای سد Morrow Point نتایج حاکی از این بود که بکار نبردن مرز غیرانعکاسی در بستر پی باعث ایجاد شتاب بزرگتر از مقدار مورد انتظار در سطح مشترک سد-پی می‌شود [18]. در پژوهشی، پاسخ غیر خطی زلزله بر روی سد Pacoima با در نظر گرفتن اندرکنش سد-پی-دریاچه تحت سازوکار مختلف زلزله ورودی صورت گرفته است. بر اساس نتایج آنها، ورودی زلزله میدان آزاد در فصل مشترک سد-پی و روش دیکانولوشن بر خلاف ورودی زلزله غیریکنواخت مود خرابی را در بدنه سد نتیجه نمی‌دهد [19].

هدف از این مطالعه، بررسی رفتار لرزه‌ای خطی و غیرخطی سدهای بتنی قوسی موجود تحت ورودی زلزله کالیبره شده (حاصل از فرایند دیکانولوشن مدل پی) در بستر پی سد است. غیرخطی، ناشی از مدلسازی باز و بسته شدن و لغزش درزهای انقباضی عمودی در بدنه سد است. برای جلوگیری از انعکاس امواج منتشر شده به داخل پی از شرایط مرزی ویسکوز استفاده شده است. شایان ذکر است که نوآوری اصلی این مقاله بررسی آثار ورودی زلزله کالیبره شده حاصل از روش دیکانولوشن موجود و اصلاح شده مدل پی علاوه بر غیرخطی درزهای انقباضی و فونداسیون جرم‌دار بر پاسخ سیستم سد-پی-دریاچه است. برای بررسی نتایج، پاسخ بدنه سد در دو حالت خطی و غیرخطی با یکدیگر مقایسه شده اند.

۴- درزهای انقباضی

عملکرد المان تماسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

1 Deconvolution
2 Free field

باعث جلوگیری از حرکت نسبی گره‌های متناظر المان درز در جهت سختی تعریف شده، می‌شود. این ضرایب به ترتیب 24 GPa/m و 24 GPa/m در نظر گرفته شده است [20]. Fig. 2b در شکل (2b) بر اساس قانون اصطکاک کولمب برابر است با حاصلضرب F_n در ضریب اصطکاک. همچنین که در شکل نشان داده شده است، المان درز نیروی کششی یا تنش کششی را نمی‌تواند تحمل کند. به هر حال آن می‌تواند نیروی فشاری و برشی را بر اساس به ترتیب سختی فشاری و سختی برشی تحمل نماید. هنگامی که نیروی برشی از نیروی مقاوم برشی تجاوز کند دوگره المان نسبت به هم شروع به لغزش می‌نمایند. C ضریب چسبندگی و μ ضریب اصطکاک است. در سدهای بتنی بخاطر اثر ناچیز ضریب چسبندگی روی نتایج مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین ضریب اصطکاک واحد فرض می‌شود طوریکه زاویه اصطکاک برابر با 45° درجه شود.

۶- مدل المان محدود

سد بتنی دوقوسی شهید عباسپور با ارتفاع 200 متر از روی پی واقع در یال جنوب غربی تاق‌دیس کارون در فاصله 135 کیلومتری شمال شرقی شهر اهواز و 50 کیلومتری شرق شهر مسجد سلیمان واقع شده است. ضخامت سد در تراز تاج و پی به ترتیب 6 و $33/5$ متر است. آثار غیرخطی باز و بسته‌شدن درزها در نظر گرفته می‌شود. مدل سد-پی-دریاچه در نرم افزار ANSYS تهیه شده است [21]. به منظور مدل سازی بدنه سد (بدنه، تراست بلوک و سرریز) و پی به ترتیب از ۳۹۸۷ و ۲۳۲۷۰ المان SOLID185 که دارای هشت گره با درجه آزادی انتقالی در هر سه جهت، استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی دریاچه از ۷۷۷۰ المان FLUID30 که دارای ۸ گره با یک درجه آزادی فشار در هر گره، مورد استفاده قرار گرفته است. کلیه درزهای عمودی براساس نقشه‌های موجود در موقعیت واقعی مدل‌سازی شده‌اند. تعداد ۲۰۸۲ المان CONTAC52 برای مدل‌سازی درزهای عمودی در بدنه سد استفاده شده است. لازم به ذکر است که بین کلیه بلوک‌ها، بین بدنه و تراست بلوک و در نهایت بین تراست بلوک و سرریز،

این المان قادر به تحمل فشار در جهت نرمال و برش در جهت مماسی است. در این دیاگرام، بردار V شرایط المان تماسی را در فضا بیان می‌کند، که در آن V_n مولفه نرمال و V_s و V_r مولفه‌های مماسی را نشان می‌دهند. همچنین شکل (۲) رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان را برای حالت‌های نرمال و مماسی نشان می‌دهد. در این شکل F_n ، F_r و F_s مولفه‌های بردار نیرو، F_g نیروی لغزشی در درز، F_t نیروی برشی برآیند در درز و در نهایت K_n و K_t سختی نرمال و مماسی را در درز نشان می‌دهند. همچنین α زاویه‌ی بین دو مولفه‌ی در صفحه برش را نشان می‌دهد [20].

شکل ۱. فلوچارت محاسبه نیرو در درزها [20]

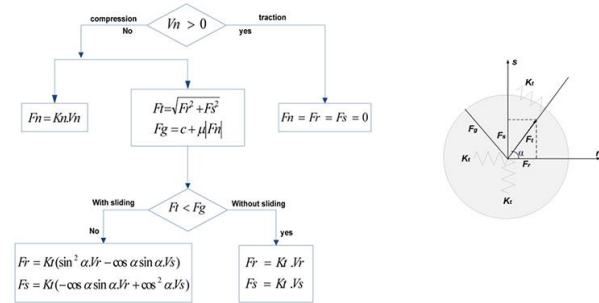


Fig. 1. Flowchart for calculating forces in joints [20]

شکل ۲. رابطه‌ی نیرو- تغییر مکان در درز [20]

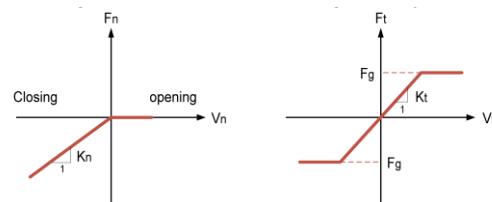


Fig. 2. Force-deflection relations for joint: (a) normal opening; (b) tangential movement [20]

به طور کلی تعیین دقیق مقادیر سختی نرمال فشاری K_n و سختی برشی K_s در المان درز ممکن نیست. تعیین ضرایب سختی نرمال و برشی درزهای عمودی با تحلیل حساسیت روی نمونه‌های مختلف امکان پذیر است. ضرایب سختی صفر معادل آن است که سختی المان درز، در سختی کل سازه منظور نشود. این امر مانند مدل نمودن دو بلوک به صورت جدا است که بین آنها اندرکنشی وجود ندارد. ضرایب سختی بالا نیز

حرارتی قبلا با مقایسه نتایج مدل با نتایج بدست آمده از روش پایش بدنه سد در مراجع [22, 23] صورت گرفته است. در جدول (۱) ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی بتن حجیم و پی در شرایط استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است [24].

جدول ۱. ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی مصالح بتن حجیم و پی [24]

Label	Static	Dynamic
E_{concrete} (GPa)	30	30*1.15
ρ_{concrete} (kg/m ³)	2400	2400
ν_{concrete}	0.20	0.14
f_t^{concrete} (MPa)	3.9	3.9*1.5
f_c^{concrete} (MPa)	40	41.8
E_{rock} (GPa)	13~15	13~15
ρ_{rock} (kg/m ³)	2500	2500
ν_{rock}	0.25	0.25
C_{water} (m/s)	1440	1440
ρ_{water} (kg/m ³)	1000	1000

Table 1. Material properties for mass concrete, foundation rock and reservoir [24]

۷- دیکانولویشن

۷-۱- تعریف مساله

برای ارزیابی پاسخ یک سد در طول یک زلزله، شتاب زلزله در کف بستر پی اعمال می‌شود که به طور عمودی به وسیله یک سازوکار انتشار موج الاستیک انتشار می‌یابد تا به بالای فونداسیون برسد. آنالیز دیکانولویشن برای محاسبه تاریخچه زمانی شتابی که بتواند در بستر پی برای باز تولید تاریخچه زمانی شتاب مطلوب در نقاط مختلف بستر سد اعمال شود، انجام می‌گیرد. بعد از آن تاریخچه زمانی شتاب کالیبره شده به بستر پی برای انجام آنالیز اعمال می‌شود.

۷-۲- روش دیکانولویشن موجود

در روش دیکانولویشن موجود، ابتدا همان شتاب میدان آزاد در کف پی اعمال می‌شود. سپس تاریخچه شتاب در یک نقطه مرجع مشخص واقع در سطح مشترک سد و پی (تقریبا در یک چهارم ارتفاع دره نسبت به کف دره) با استفاده از تحلیل المان محدود بدست می‌آید. این شتاب بدست آمده در نقطه مرجع واقع در سطح مشترک سد و پی سپس با زلزله میدان آزاد بعد از این که هر دوی آنها به حوزه فرکانس انتقال داده

درز عمودی تعبیه شده است. ابعاد پی در هر جهت حدود ۲/۵ برابر ارتفاع بدنه سد در نظر گرفته شده است. همچنین دریاچه سد به سمت بالادست در حدود ۲/۵ برابر ارتفاع سد امتداد یافته است. تحت بار وزن، فشار آب و دما درزهای عمودی بسته مانده است. مقدار میرایی سازه‌ای برابر با ۱۰ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، از میرایی ریلی برای تعیین ماتریس میرایی سازه استفاده شده است

شکل ۳. نمایی از بدنه سد (بدنه، تراست بلوک و سرریز)

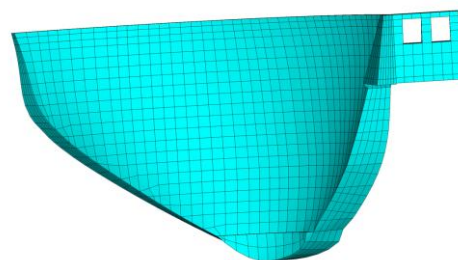


Fig. 3. Finite element model of the dam

شکل ۴. نمایی کلی از سیستم مورد بررسی

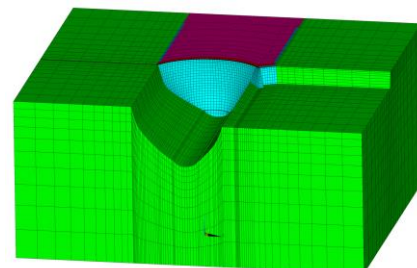


Fig. 4. Overview of Finite element model of the dam-reservoir-foundation system

برای ساخت مرحله‌ای بدنه با توجه به نبود اطلاعات، براساس تجربه ۵ مرحله بتن ریزی و ۶ مرحله تزریق در نظر گرفته شده است:

شکل ۵. درزهای عمودی بدنه سد



Fig. 5. Finite element model of the contraction vertical joints
شایان ذکر است که درستی آزمایی و کالیبراسیون مدل المان محدود سد تحت بار وزن، فشار هیدروستاتیک و بارگذاری

می‌شود.

سپس سیگنال شتاب اصلاح شده به حوزه زمان برگردانده می‌شود. و آنالیز مدل المان محدود پی با استفاده از این رکورد اعمالی صورت می‌گیرد. روش تا آنجا تکرار می‌شود که شتاب در نقطه مرجع سطح مشترک پی با سد با شتاب میدان آزاد هماهنگی پیدا کند. مشخص شده است که روش اصلاح شده برای هر دو بازه فرکانس‌های بالا و پایین به خوبی کار می‌کند. در روش دیکانولوشن موجود، خطا در طبیعت تبدیل فوریه و تبدیل فوریه معکوس وجود دارد همچنان که فرایند تکرار الگوریتم برای رسیدن به جواب مطلوب پیش می‌رود. در صورتی که روش اصلاح شده تضمین می‌کند که خطاهای معرفی شده ناشی از تبدیل فوریه و تبدیل فوریه معکوس به کمترین برسد.

۷-۴- زلزله میدان آزاد (زلزله طرح)

سه مولفه شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه سد پاکوئما^۱ طی زلزله نورتریج^۲ ۱۹۹۴ برای دیکانولوشن مدل پی انتخاب شدند. PGA سه مولفه افقی و قائم به ترتیب برابر با $0.3g$ ، $0.43g$ و $0.17g$ هستند. همچنین نقطه مرجع برای ارائه نتایج دیکانولوشن در یک چهارم ارتفاع دره نسبت به کف دره در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که هماهنگی خیلی خوبی برای نقاط مختلف دره بین پاسخ شتاب و زلزله میدان آزاد به دست آمده است.

۷-۵- نتایج روش دیکانولوشن

شکل (۶) مقایسه شتاب بدست آمده از دیکانولوشن در نقطه مرجع واقع در سطح مشترک سد و پی را با زلزله میدان آزاد به ترتیب در جهات عرضی، طولی و قائم نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است برای جهات افقی هماهنگی خیلی خوبی دیده می‌شود. اما در جهت قائم که با استفاده از روش اصلاح شده سعی شده تا حدی اختلاف فاحش با زلزله میدان آزاد جبران شود. شکل (۷) هماهنگی نسبتاً کامل پاسخ شتاب برای دو نقطه در دو طرف دره (شامل

شدند مقایسه می‌شوند. الگوریتم انتقال به حوزه فرکانس با استفاده از آنالیز فوریه صورت می‌گیرد. سپس ضرایب اصلاح برای هر فرکانس از تقسیم مقادیر مربوط به میدان آزاد بر پاسخ نقطه مرجع بدست می‌آید. سپس سیگنال اصلاح شده با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به حوزه زمان برگردانده می‌شود و آنالیز المان محدود با استفاده از این شتاب اصلاح شده اعمالی در کف پی برای باز تولید شتاب در نقطه مرجع انجام می‌گیرد و این فرایند تا آنجایی تکرار می‌شود تا پاسخ شتاب در نقطه مرجع به زلزله میدان آزاد نزدیک شود. در نهایت رکوردی که بدست می‌آید رکورد کالیبره شده نام دارد که برای انجام آنالیز سیستم سد-پی-دریاچه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۷-۳- روش دیکانولوشن اصلاح شده

روش‌های دیکانولوشن موجود برای همه انواع رکوردهای زلزله شامل فرکانسهای بالا و فرکانس‌های پایین موثر نیستند. و برای رکوردهای فرکانس‌های بالا نتایج مطلوبی را ارائه نمی‌دهد اما برای رکوردهای با فرکانس‌های پایین در بیشتر موارد به خوبی کار می‌کند. در این بخش برای غلبه بر این محدودیت از یک روش اصلاح شده‌ای برای زلزله قائم استفاده شده است [13].

شبیه روش قبلی بعد از اینکه سیگنال شتاب میدان آزاد و شتاب نقطه مرجع در حوزه فرکانس با یکدیگر مقایسه شدند، ضرایب اصلاح برای سیگنال نهایی این بار به گونه‌ای دیگر بدست می‌آیند به جای هماهنگی دادن دامنه فوریه (Fourier amplitudes) در دامنه‌های مختلف، طیف پاسخ‌ها با یکدیگر تنظیم می‌شود. و طیف پاسخ‌های تاریخیچه شتاب باز تولید شده نقطه مرجع و شتاب میدان آزاد برای یک مجموعه‌ای از فرکانس‌های مختلف مجزا با یکدیگر مقایسه می‌شوند. ضرایب اصلاح (CF) برای هر فرکانس با محاسبه نسبت دامنه طیف پاسخ هدف یا میدان آزاد بر دامنه طیف پاسخ تاریخیچه شتاب بازتولید شده نقطه مرجع بدست می‌آید این ضریب اصلاح در سیگنال شتاب حوزه فرکانس اعمالی در کف پی ضرب می‌شود. و ضرایب، جداگانه در قسمت حقیقی و موهومی سیگنال شتاب حوزه فرکانس اعمالی در کف پی ضرب

تحلیل غیرخطی، المان‌های درز در بدنه سد مدل شده است. تراز آب دریاچه در شرایط افزایش یافته نرمال است.

۸-۱- تغییرمکان

شکل (۸) تاریخچه زمانی تغییرمکان نقطه میانی تاج سد را به ترتیب در سه جهت عرضی، طولی و قائم برای تحلیل خطی و غیرخطی نشان می‌دهد. جهت مثبت در تغییرمکان طولی به طرف بالادست است. در تحلیل غیرخطی، مقادیر بیشینه تغییرمکان نقطه میانی تاج سد در دو جهت جهت عرضی، طولی (بالادست-پایین‌دست) تحت سه مولفه همزمان زلزله با توجه به جدول (۲) به ترتیب ۰.۴۱٪، ۰.۲۱٪ نسبت به مقادیر متناظر در تحلیل خطی افزایش یافته و در جهت قائم ۰.۸٪ کاهش یافته است.

شکل ۸ مقایسه تاریخچه زمانی تغییرمکان نقطه میانی تاج سد برای تحلیل خطی و غیرخطی: (a) جهت عرضی، (b) جهت طولی، (c) جهت قائم

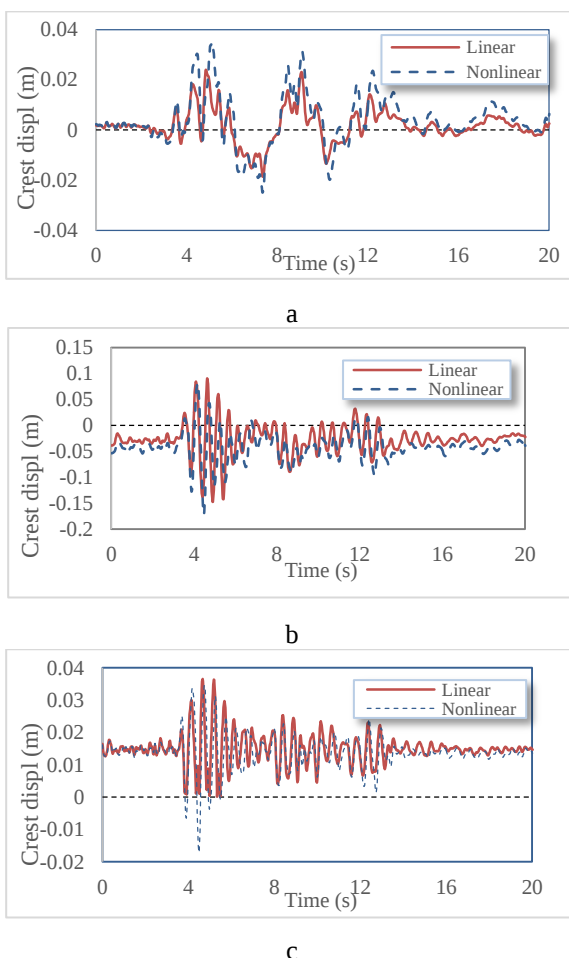


Fig. 8. Comparing crest displacement for linear and nonlinear analyses; (a) cross-stream direction (b) stream direction (c) vertical direction

نقطه مرجع) در سطح مشترک سد-پی را نشان می‌دهد.

شکل ۶. هماهنگی پاسخ شتاب بدست آمده در نقطه مرجع با زلزله میدان آزاد: (a) جهت عرضی، (b) جهت طولی، (c) جهت قائم

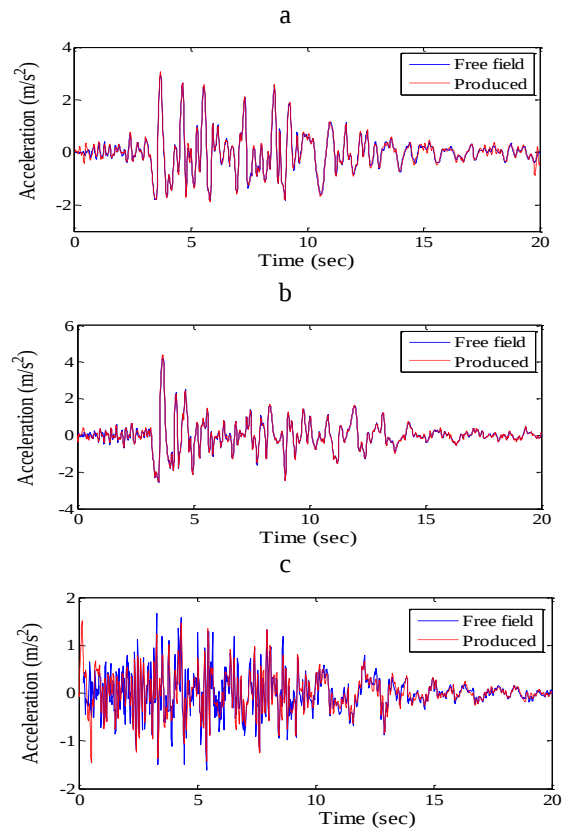


Fig. 6. Comparison between the acceleration response of deconvolved earthquake ground acceleration and the corresponding target ones; (a) cross-stream direction (b) stream direction (c) vertical direction

شکل ۷. مقایسه پاسخ شتاب در دو طرف دره

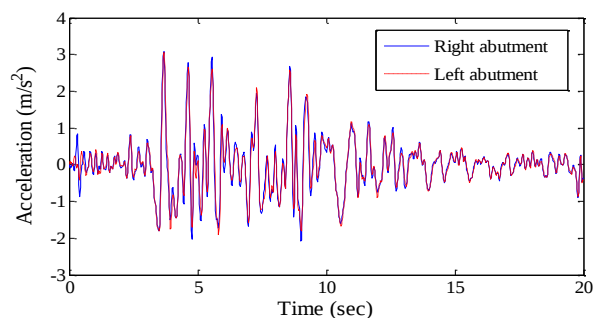


Fig. 7. Comparison between the acceleration responses for left and right abutments

۸- نتایج تحلیل خطی و غیر خطی

در این بخش کلیه نتایج تحلیل خطی و غیرخطی سیستم سد-پی-دریاچه تحت سه مولفه زلزله کالیبره شده حاصل از دیکانولوشن اعمال شده در بستر پی ارائه می‌شود. در تحلیل خطی، بدنه سد به صورت یکپارچه مدل شده درحالی‌که در

۸-۲- سطح تنش

در شکل‌های (۹) و شکل (۱۰) به ترتیب کانتورهای غیرهمزمان تنش‌های اصلی ماکزیمم (کششی) و مینیمم (فشاری) در رویه بالادست و پایین‌دست بدنه سد در تحلیل‌های خطی و غیرخطی نشان داده شده است. بطور کلی در مورد تنش‌های اصلی ماکزیمم (کششی)، در کلیه تحلیل‌ها مقادیر تنش بیش از حد مجاز کششی در رویه بالادست در مجاورت تکیه‌گاه‌ها رخ می‌دهد. در تحلیل خطی، در رویه پایین‌دست نواحی میانی تاج سد و پایین بدنه در همسایگی تکیه‌گاه، مقدار تنش کششی از حداکثر مجاز تجاوز کرده است در صورتی که در تحلیل غیرخطی، تنش در رویه پایین دست تنها در ناحیه اندکی در قسمت پایین دره از بیشینه مجاز تجاوز کرده است. به عبارت دیگر، مدلسازی درز باعث حذف عمده تنش بالای کششی (بیش از حد مجاز) در نواحی میانی تاج سد و تکیه‌گاه‌های نزدیک تاج سد شده است. برای تنش‌های اصلی مینیمم، کلیه مقادیر در تحلیل‌های خطی و غیرخطی در محدوده مجاز قرار دارد و الگوی توزیع تنش در بدنه سد در مدل خطی و غیرخطی مشابه یکدیگر است. جدول (۲) مقادیر بیشینه تنش‌های اصلی ماکزیمم و مینیمم در رویه بالادست و پایین‌دست بدنه سد را گزارش می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیل غیرخطی، مقادیر بیشینه تنش‌های اصلی ماکزیمم در رویه بالادست و پایین‌دست بدنه سد ۶٪ نسبت به مدل خطی کاهش پیدا کرده است. و مقادیر بیشینه تنش‌های اصلی مینیمم ۵٪ افزایش یافته است.

شکل (۹) کانتورهای غیرهمزمان تنش‌های اصلی ماکزیمم (کششی) در بدنه سد، (a) تحلیل خطی، (b) تحلیل غیرخطی (واحد MPa)

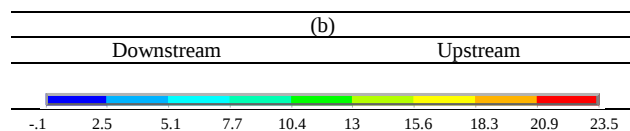
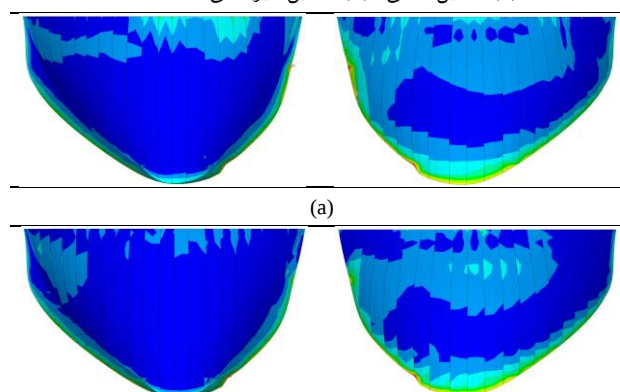


Fig. 9. Non-concurrent envelope of first (tensile) principal stresses in upstream and downstream faces of the dam body (MPa); (a) linear, (b) nonlinear

شکل ۱۰. کانتورهای غیرهمزمان تنش‌های اصلی مینیمم (فشاری) در بدنه سد، (a) تحلیل خطی، (b) تحلیل غیرخطی (واحد MPa)

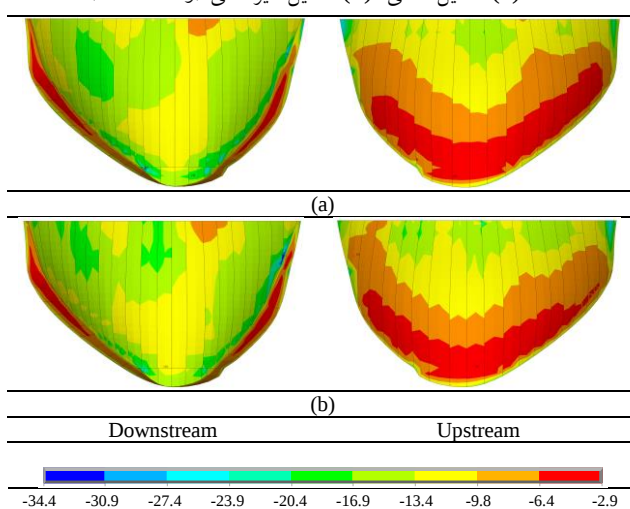


Fig. 10. Non-concurrent envelope of third (compressive) principal stresses in upstream and downstream faces of the dam body (MPa); (a) linear analyses, (b) nonlinear analyses

جدول ۲. مقادیر بیشینه تنش‌های اصلی بدنه سد و تغییر مکان تاج سد،

تحلیل خطی و غیرخطی

	Status	Linear analysis	Nonlinear analysis
	displacement (m)		
displacement (m)	Cross-stream direction	0.024	0.034
	Stream direction	-0.14	-0.17
	Vertical direction	0.037	0.034
stress (MPa)	Tensile	23.5	22.5
	Compressive	-33.4	-34.4

Table 2. Maximum values of tensile/compressive stresses and joint opening/sliding within the dam body and crest displacements; linear and nonlinear analyses

۸-۳- عملکرد درز

شکل (۱۱) بیشینه مقادیر غیرهمزمان لغزش و بازشدگی المان‌های درز در رویه بالادست بدنه سد در طول تاج را تحت سه مولفه زلزله نشان می‌دهند. بیشینه مقادیر لغزش و بازشدگی در طول تاج به ترتیب ۱/۸ و ۳/۶ میلی‌متر هستند. با توجه به شکل، بیشینه مقادیر لغزش المان‌های درز در طول تاج در سمت چپ بدنه سد و نزدیک سرریز سد رخ داده است.

روش اصلاح شده‌ای برای زلزله قائم استفاده شده است که همگرایی بهتری را برای مولفه قائم زلزله نتیجه می‌دهد.

- بر اساس نتایج تحلیل‌ها، مدل‌سازی درزهای انقباضی عمودی در بدنه سد باعث کاهش بیشینه تنش‌های اصلی کششی و افزایش بیشینه تنش‌های اصلی فشاری در بدنه سد به ترتیب به میزان ۶٪ و ۵٪ شده است. همچنین، بیشینه تغییر مکان نقطه میانی تاج سد در جهت پایین‌دست برای تحلیل‌های خطی و غیرخطی به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۷ متر است.

- مدل‌سازی درز منجر به کاهش تنش کششی به محدوده مجاز تنش در نواحی میانی تاج سد و تکیه‌گاه‌های نزدیک تاج سد شده است که در مدل خطی دارای تنش بیش از حد مجاز تنش کششی بودند. برای تنش‌های اصلی مینیمم، کلیه مقادیر در تحلیل‌های خطی و غیرخطی در محدوده تنش مجاز قرار دارد.

- بیشینه مقادیر غیرهمزمان لغزش و بازشدگی المان‌های درز در روی رویه بالادست بدنه سد در طول تاج به ترتیب ۱۸/۱ و ۶/۳ میلی‌متر هستند. بیشینه مقادیر لغزش المان‌های درز در طول تاج در سمت چپ بدنه سد و نزدیک سرریز سد رخ داده است. همچنین بیشینه مقادیر بازشدگی المان‌های درز در طول تاج در جناح راست بدنه رخ داده است.

References

۱۰- مراجع

- [1] Léger, P.; Boughoufalah, M.; "Earthquake input mechanisms for time-domain analysis of dam-foundation systems"; *Engineering Structures*; 11(1), 1989, 37-46.
- [2] Chopra, A.K.; "Earthquake Analysis of Arch Dams: Factors to be considered"; *The Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering*; Beijing, China. 2008.
- [3] Chopra, A.K.; Wang, J.T.; "Earthquake response of arch dams to spatially varying ground motion"; *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*; 39(8), 2010, 887-906.
- [4] Taskov, L.; Jourukovski, D.; "Analytical studies of nonlinear behaviors of arch dams using shaking table test results of an arch dam fragment"; *9th World Conference on Earthquake Engineering*; VI, 1988, 385-390, Tokyo, Japan.
- [5] Mojtahedi, S.B.; Fenves, G.; "Effect of Contraction Joint Opening on Pacoima Dam in the 1994 Northridge Earthquake"; *University of California, Berkeley, CA*. 2000.
- [6] Fok, K.L., Hall, J.F.; Chopra, A.K.; EACD-3D: A

همچنین بیشینه مقادیر بازشدگی المان‌های درز در طول تاج در جناح راست بدنه رخ داده است.

شکل ۱۱. مقادیر بیشینه لغزش و بازشدگی المان‌های درز در رویه بالادست

بدنه سد در طول تاج سد

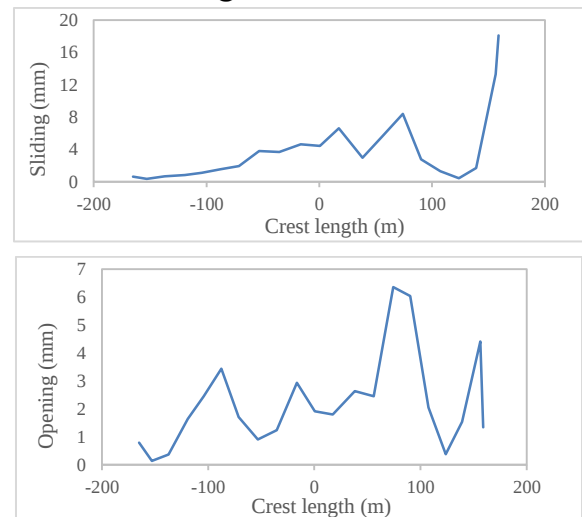


Fig. 11. Extreme values for joint opening/sliding experienced by upstream contact elements along the crest of the dam body

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آثار ورودی زلزله کالیبره شده حاصل از فرایند دیکانولوشن در بستر پی روی پاسخ خطی و غیرخطی سد بتنی قوسی بررسی شد. غیرخطی ناشی از لغزش و باز و بسته شدن درزها در بدنه سد لحاظ شد. سد شهید عباسپور به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. ابتدا یک آنالیز دیکانولوشن پی انجام گرفته که در نتیجه آن دامنه و محتوی فرکانسی رکورد زلزله اعمالی به بستر مدل پی را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که پاسخ شتاب مطلوب در سطح مشترک پی و سد به دست آید و با زلزله میدان آزاد هماهنگی داشته باشد. سپس پاسخ سیستم سد-پی-دریاچه تحت این زلزله کالیبره شده اعمالی در کف پی محاسبه می‌شود.

بطور کلی نتایج را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- نتایج روش دیکانولوشن موجود هماهنگی کاملی را بین پاسخ بازتولید شده در نقاط مختلف دره تحت زلزله کالیبره شده و مولفه‌های افقی زلزله میدان آزاد نشان می‌دهد.
- روش دیکانولوشن موجود برای رکوردهای فرکانس‌های بالا نتایج مطلوبی را ارائه نمی‌دهد بنابراین از یک

- [16] Luk, V.; Spencer, B.; Lann, I.; Dameron, R.; Parametric evaluation of seismic behavior of freestanding spent fuel dry cask storage systems, NUREG/CR-6865, SAND2004-5794P. Washington, DC: Sandia National laboratories, *Office of Nuclear Regulatory Reserach*, U.S. Nuclear Regulatory Commission., 2005.
- [17] Xu, Q.; Chen, J.Y.; Li, J.; Zhao, C.F.; "Influence of seismic input on response of Baihetan arch dam"; *Journal of Central South University*; 21(6), 2014, 2437-2443.
- [18] Noble, C.R.; Solberg, J.; "Nonlinear seismic analysis of morrow point dam": A Study for the United States Bureau of Reclamation. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA; 2004 Feb 20.
- [19] Wang, J.T.; Lv, D.D.; Jin, F.; Zhang, C.H.; "Earthquake damage analysis of arch dams considering dam-water-foundation interaction"; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, 2013, 64-74.
- [20] Hariri-Ardebili, M.A.; Mirzabozorg, H.; "Seismic performance evaluation and analysis of major arch dams considering material and joint nonlinearity effects"; *ISRN Civil Engineering*; 2012, 2012, 1-10.
- [21] ANSYS, 2007. ANSYS version 11.0.1 reference manual. ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
- [22] Ramezani O. Transient thermal analysis in concrete arch dams and comparing the results with Stucky-Derron approach. M.Sc. Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran; 2015. (In Persian)
- [23] Ramezani, O.; Mirzabozorg, H.; Roohezamin, H.; Alimohammadi, M.; "Critical time determination and solar radiation effect investigation of arch dams through mathematical and experimental thermal analysis"; *Dam engineering journal*; Vol. XXVII, No. 4, 2017, pp. 1-38.
- [24] Mirzabozorg H. Final report on structural study of heightening normal level of Shahid Abbaspour arch dam. 2nd edition, Power Ministry, Tehran, Iran, 2014. (In Persian)
- Computer Program for Three-Dimensional Earthquake Analysis of Concrete Dams, Report No. UCB/EERC-86/09. *University of California Berkeley*, CA. 1986.
- [7] Tan, H.; Chopra, A.K.; EACD-3D-96: a Computer Program for Three- Dimensional Earthquake Analysis of Concrete Dams, Report No. UCB/ SEMM-96/06). *University of California*, Berkeley, CA. 1996.
- [8] Mirzabozorg, H.; Varmazyari, M.; Ghaemian, M.; "Dam-reservoir-massed foundation system and travelling wave along reservoir bottom"; *Soil Dyn. Earthq. Eng*; 30(8), 2010, 746-756.
- [9] Mirzabozorg, H; Varmazyari, M; Gharehbaghi, A.S.; "Seismic evaluation of existing arch dams and massed foundation effects"; *Soils and Foundations*, 56(1), 2016, 19-32.
- [10] Alembagheri, M.; Ghaemian, M.; "Seismic performance evaluation of a jointed arch dam"; *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(2), 2016, 256-274.
- [11] Ahmadi M.T.; Izadinia, M.; Bachmann, H.A.; "discrete crack joint model for nonlinear dynamic analysis of concrete arch dam"; *Computers and Structures*; 79, 2001, 403-420.
- [12] Bayraktar, A.; Hancı, E.; Akköse, M.; "Influence of base-rock characteristics on the stochastic dynamic response of dam-reservoir-foundation systems"; *Engineering structures*, 27(10), 2005, 1498-1508.
- [13] Sooch, Gurinderbir Singh.; "Methodologies for Seismic Assessment of Concrete Gravity Dam-Foundation Systems"; *PhD diss*; Concordia University, 2011.
- [14] Ahmadi, T.; "A Study on Cncrete Arch Dam Failure Scenarios under Unexpected Loadings"; M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, 2012.
- [15] Schnabel, P.B.; Lysmer, J.; Seed, H.B.; SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. UCB/EERC-72/12, *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.*, 1972.

Nonlinear Seismic Response of an Existing Concrete Arch Dam Subjected to deconvolved Earthquake Input

M. Varmazyari¹, S. R. Sabbagh-yazdi^{2*}, H. Mirzabozorg³

1- PhD Candidate, Structural Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., K. N. Toosi University of Technology

2- Professor., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., K. N. Toosi University of Technology

3- Associate Prof., Structural Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., K. N. Toosi University of Technology

*syazdi@kntu.ac.ir

Abstract:

In the present paper, the effects of deconvolved earthquake input on the linear and nonlinear seismic response of an existing arch dam in a 3D space are investigated. nonlinearities originate from the opening/slipping of the vertical contraction joints within the dam body. The reservoir–structure interaction is taken into account by the finite element method with the appropriate boundary conditions. The reservoir was assumed to be compressible. The Shahid Abbaspour arch dam was selected for the case study. Finally, the viscous condition at the far-end boundary of the foundation is used to model the radiation effect. A quasi elastic damping model is utilized. The stiffness and mass proportional damping, equivalent to 10% of the critical damping based on the 2Hz and 6Hz frequencies of the dam foundation system, is applied to the structure. Three components of the 1994 Northridge earthquake as maximum credible earthquake are selected as the free field ground motions. The analysis is carried out in two steps. First a deconvolution analysis is performed to adjust the amplitude and frequency contents of an earthquake ground motion applied at the base of the foundation to achieve the desired output ground acceleration at the dam-foundation interface at the different points. Then the calibrated base acceleration history is applied to the foundation base of the dam-reservoir-foundation-system to perform the seismic analysis. Based on the results, spectra of the response at the dam-foundation interface at different points match very closely with the spectra of the horizontal free field ground motions. However, the existing deconvolution procedure does not produce appropriate results for high frequency ground motion records. To overcome such limitation, a modified procedure has been used for vertical earthquake which has led to better convergence. In existing procedure, a correction factor for each frequency is computed using the ratio of the Fourier amplitudes of the reproduced ground acceleration at the dam-foundation interface and free-field ground acceleration signals in a given iteration. The acceleration signal applied at the base of the foundation model is modified using the correction factor for each frequency. In modified procedure, Instead of adjusting the Fourier amplitudes, the response spectra at different frequency are adjusted. It is worth mentioning that the main novelty of the present investigation, is that it takes into account the effects of deconvolved earthquake input in addition to both the joints nonlinearity. According to the analyses, modeling vertical contraction joints leads to a decrease in the maximum value of tensile stress levels through the dam body by 6%. The extreme values of joints opening/sliding experienced by the contact elements located on the upstream face along the crest are 6.3mm and 18.1mm, respectively. The maximum values for joints sliding occurred in vicinity of the abutments. Also, maximum values of joint opening/sliding along the height of the dam body experienced by the contact elements located between the central cantilever and the adjacent ones on the upstream face occurred in crest of the dam body. However, to achieve more realistic results, other factors such as the spatial variation in ground motion, should be considered.

Keywords: concrete arch dams; deconvolution procedure; vertical contraction joints; seismic analysis; massed foundation.