

چکیده

در این مقاله به بررسی اثر نوع پالس سرعت رکوردهای زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل و پارامترهای تأثیرگذار آنها بر پاسخ سازه پرداخته شده است. بدین منظور، سد دو قوسی ماروپوینت در نرم‌افزار سالیدورکس مدل‌سازی گردیده و در نرم‌افزار آباکوس و با در نظر گرفتن اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون و رفتار غیرخطی بتن مورد تحلیل غیرخطی قرار گرفت. در این تحقیق، پالس‌های موجود در رکوردهای حوزه نزدیک به دو نوع B و C تقسیم شده‌اند. جهت بررسی اثرات نوع پالس‌های رکوردهای حوزه نزدیک، رکوردهای مورد بررسی به دو گروه با بیشینه شتاب مقیاس شده یکسان و انرژی نسبتاً یکسان طبقه‌بندی گردیدند. در گروه اول که بیشینه شتاب زمین، شدت آریاس و بیشینه جابه‌جایی یکسان بوده است، نتایج حاصله حاکی از پاسخ بیشتر رکوردهای پالس گونه نوع C می‌باشد. در گروه دوم نیز، بررسی‌ها نشانگر مخرب‌تر بودن رکوردهای پالس گونه از نوع C در حالت کلی است. بررسی‌های بیشتر همچنین نشانگر تأثیر گذاری نسبتاً زیاد دو پارامتر «شدت آریاس» و «مدت اثر پالس» در میزان پاسخ حاصله از رکوردها در حالت یکسان بودن انرژی رکوردهاست. همچنین در حالت یکسان بودن نسبی پارامترهای فوق، سایر پارامترها نظیر بیشینه جابه‌جایی و ... تأثیر گذار نشان داده‌اند.

واژگان کلیدی: سد بتنی قوسی، تکانه‌های حوزه نزدیک گسل، رکوردهای پالس گونه، انرژی زلزله، شدت آریاس، مدت اثر پالس.

اثر نوع پالس سرعت رکوردهای زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل بر پاسخ سدهای بتنی قوسی (مطالعه موردی)

سید یونس جباری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر

رضا تقی‌پور (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، r.tahipour@umz.ac.ir

محسن بزرگ‌نسب

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر

۱- مقدمه

دارای پالس جهت‌داری، پاسخ‌های بسیار بیشتری نسبت به نوع زمین لرزه‌های بدون پالس را نتیجه می‌دهند. همچنین بیشینه شتاب، سرعت^۲ و جابه‌جایی زمین^۳ پارامترهای کلیدی مؤثر بر پاسخ سازه هستند. ماورویدیس و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۴ به بررسی پاسخ سیستم‌های یک درجه آزادی الاستیک و غیر الاستیک تحت زمین لرزه‌های حوزه نزدیک پرداختند. ابتدا با انطباق یک مدل ریاضی با پالس‌های موجود در تاریخچه‌های زمانی زمین لرزه‌ای حوزه نزدیک، پارامترهای مربوطه استخراج شد، سپس اثرات آنها بر پاسخ سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که بریود این پالس‌ها، پارامتری تأثیرگذار بر رفتار سیستم‌ها می‌باشد. شن و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۵] به بررسی عملکرد پل‌ها تحت اثر زمین لرزه‌های حوزه نزدیک به گسل پرداختند. بدین منظور

سدهای قوسی برای عملکردهای گوناگون حیاتی مانند کنترل سیل، آب آشامیدنی، آبیاری و تولید نیروی برق آبی ساخته می‌شوند. در نتیجه، این سازه‌ها نیاز به تدابیر ویژه مهندسی برای طراحی و ساخت، جهت جلوگیری از خطرات ناشی از شکست سد و خسارات متعاقب آن را دارند [۱]. در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از تکانه‌های شدید زمین در حوزه نزدیک گسل ثبت گردیده‌اند. با توجه به اثرات مخرب این تکانه‌ها بر سازه‌های موجود، محققان زیادی به مطالعه اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بر سازه‌های مختلف از جمله سدها پرداخته‌اند [۲]. مالهوترا در سال ۱۹۹۹ [۳]، با مقایسه پاسخ سازه‌ها تحت اثر زمین لرزه‌های حوزه نزدیک گسل با و بدون پالس‌های ناشی از جهت‌داری زلزله، نشان داد که برای یک مقدار بیشینه شتاب و مدت‌زمان یکسان برای تکانه‌های شدید، زمین لرزه‌های

دسته بندی نمودند و پاسخ سازه در برابر این نوع پالس ها را مورد ارزیابی قرار دادند.

در این مطالعه به بررسی اثر نوع پالس سرعت رکوردهای زمین لرزه های حوزه نزدیک گسل و پارامترهای تأثیر گذار رکورد ورودی لرزه بر پاسخ سد بتی دو قوسی پرداخته شده است. بدین منظور سد دو قوسی ماروپوینت^۵ با استفاده از روش اجزای محدود و در نظر گرفتن اندرکنش سد- مخزن- فونداسیون و رفتار غیرخطی بتن مدل سازی گردید. در مطالعات پیشین، بیشینه شتاب زمین رکوردهای مورد بررسی جهت بررسی نتایج حاصله به مقداری خاص مقیاس شده است؛ لیکن با عنایت به تأثیر گذاری هم زمان سایر پارامترها از جمله انرژی زمین لرزه بر پاسخ سازه، در این تحقیق، به منظور ارزیابی بهتر، انرژی لرزه نیز در روند مقایسه مد نظر قرار گرفته است. ساختار این تحقیق به شرح زیر است:

در ابتدا تکانه های حوزه نزدیک گسل و طبقه بندی نوع پالس موجود در آنها مد نظر قرار می گیرد. سپس به معرفی مدل المان محدود سد مورد مطالعه پرداخته می شود. در ادامه معرفی شتاب نگاشت های مورد استفاده در این مطالعه معرفی می گردند. پس از آن به بررسی تأثیر نوع پالس در پاسخ سازه پرداخته می شود. در انتها، نتایج اصلی حاصل از این تحقیق ارائه خواهد گردید.

۲- تکانه های حوزه نزدیک گسل

زلزله های نزدیک گسل به زلزله هایی اطلاق می شود که فاصله آنها از مرکز آزاد شدن انرژی، کمتر از یک حد معینی باشند. در این تحقیق فاصله کمتر از پانزده کیلومتر نسبت به کانون، به عنوان حوزه نزدیک در نظر گرفته شده است [۱۱].

به طور معمول، زمین لرزه های نزدیک به گسل دارای خصوصیتی از قبیل پیرو بلند، مدت زمان^۶ مؤثر کوتاه و دامنه پالس بزرگ در تاریخچه زمانی خود هستند. پالس های بزرگ با پیرو بلند در نزدیک گسل معمولاً به دو علت ایجاد می شوند: اثر جهت داری گسلش و اثر جابه جایی ماندگار زمین؛ هر چند پدیده های دیگر مانند سرعت گسلش فوق برشی و شرایط خاص هندسی می توانند تولید پالس سرعت کنند [۱۰].

در مقایسه با حرکات با جهت داری پیش رونده^۷ که توسط پالس

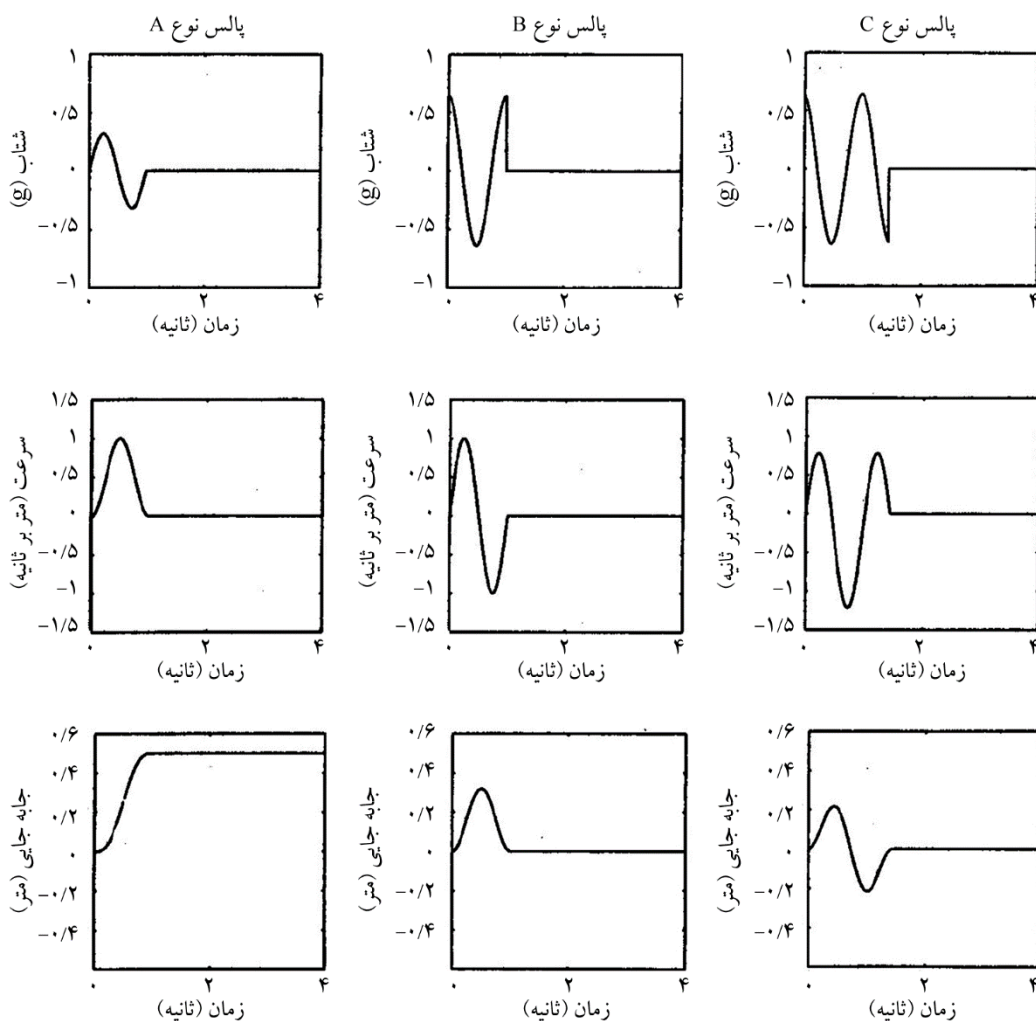
تاریخچه های زمانی حوزه نزدیک با اعمال دو نوع پالس معرفی شده (نوع A و B) در رکورد ثبت شده زلزله جیا-بی^۴ تولید گردید. نتایج حاصل از اعمال زلزله شبیه سازی شده بر پل نشان داد که اثر نزدیکی به گسل، پاسخ لرزه ای پل را زمانی تقویت می کند که دوره همکاران موجود در زلزله نزدیک به دوره مؤثر سیستم باشد. کالکان و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۶]، اثر ویژگی های زلزله های حوزه نزدیک به گسل را بر پاسخ لرزه ای قاب های خمشی فولادی بررسی کردند. آنها اثرات جهت داری و جابه جایی ماندگار تکنیکی را بر چگونگی پاسخ سازه مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین نشان دادند که برای ارزیابی منطقی پتانسیل آسیب رکوردهای نزدیک به گسل دو پارامتر شتاب و سرعت طیفی، در صورت بررسی هم زمان می توانند در این خصوص مناسب باشند. در سال ۲۰۰۹، بایراکتار و همکاران [۷]، به مقایسه اثرات زلزله های حوزه نزدیک و دور از گسل بر رفتار غیرخطی سد با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سد- مخزن- فونداسیون پرداختند و جابه جایی و تنش های اصلی به دست آمده از تحلیل سدها را با یکدیگر مقایسه نمودند. نتایج حاکی از آن است که نیازهای لرزه ای در جابه جایی و تنش ها زمانی که سد تحت اثر زمین لرزه حوزه نزدیک گسل قرار دارد، به وضوح بیشتر می باشند. چمپیون و لیل در سال ۲۰۱۲ [۸]، اثر زمین لرزه های حوزه نزدیک گسل را بر احتمال خرابی ساختمان بررسی کردند. نتایج نشان می دهد که احتمال تخریب، ارتباط زیادی با تغییرات پیرو پالس و شکل پذیری سازه دارد. همچنین پیرو پالس، زمانی که بیشتر از پیرو نظیر مود اول الاستیک ساختمان باشد، بیشترین احتمال آسیب رسانی را خواهد داشت. وفایی و اسکندری در سال ۲۰۱۵ [۹]، پاسخ لرزه ای قاب های مهاربندی شده مقاوم در برابر کمانش تحت اثر زمین لرزه های حوزه نزدیک به گسل دارای جابه جایی ماندگار و جهت داری پیش رونده را بررسی نمودند. بررسی ها نشان داد که نیازهای جابه جایی مربوط به زمین لرزه حوزه نزدیک دارای جهت داری پیش رونده به طور متوسط حدود ۳۵ درصد بیشتر از زمین لرزه های حوزه دور و حدود ۵/۵ درصد بیشتر از رکوردها با جابه جایی ماندگار تکنیکی است [۹]. در تحقیق هانگ در سال ۲۰۱۵ [۱۰] که با استخراج پالس سرعت رکوردهای حوزه نزدیک، این پالس ها را به سه نوع پالس معرفی شده A، B و C

پالس‌های نوع A پالس‌هایی از نوع یک‌طرفه (پالس‌ها با یک نیم سیکل) می‌باشند که منتج به جابه‌جایی ماندگار در تاریخچه زمانی جابه‌جایی می‌گردند. همان‌طور که از نامش پیداست، پالس نوع A برای مدل‌سازی جابه‌جایی ماندگار تکتونیک موجود در رکوردهای حوزه نزدیک به گسل قابل استفاده می‌باشند. پالس‌های نوع B نمایانگر جهت‌داری گسلش پیش‌سوی می‌باشند؛ که در آنها پالسی دوطرفه (پالس با دو نیم سیکل) در تاریخچه زمانی سرعت با دامنه و پریود بزرگ ایجاد می‌گردد؛ لیکن در تاریخچه زمانی جابه‌جایی تنها یک پالس یک‌طرفه مشاهده می‌شود.

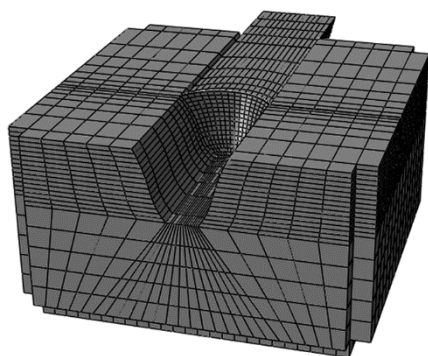
در عین حال، تمامی زمین‌لرزه‌های نزدیک به گسل دقیقاً از الگوی جهت‌داری پیش‌رونده و یا الگوی جابه‌جایی ماندگار

سرعت دو طرفه مشخص می‌شوند، حرکات با جابه‌جایی ماندگار تکتونیک^۱ قرار دارند که به‌طور معمول توسط پالس سرعت یک‌طرفه و جابه‌جایی ماندگار در انتهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی تشخیص داده می‌شوند. اثر جهت‌داری گسلش معمولاً با پالسی با دامنه و دوره تناوب بزرگ در مؤلفه سرعت مربوط به جهت عمود بر صفحه گسلش نمایان می‌گردد؛ درحالی‌که جابه‌جایی ماندگار تکتونیک با یک جابه‌جایی ماندگار در انتهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی مؤلفه موازی با صفحه گسلش مشاهده می‌گردد.

در تحقیقات انجام شده توسط ماکریس و چانگک در سال ۲۰۰۰ و ماکریس و بلک در سال ۲۰۰۴ [۱۲-۱۳]، سه نوع پالس کلی برای نمایش پالس‌های موجود در مؤلفه سرعت رکوردهای حوزه نزدیک معرفی گردید؛ شکل (۱) انواع پالس‌های معرفی شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): معرفی انواع پالس‌های مورد استفاده در مطالعات ماکریس و چانگک [۱۲] و ماکریس و بلک [۱۳].



شکل (۲): مدل المان محدود سد بتنی قوسی ماروپوینت.

مدل خرابی پلاستیک بتن^۹ ارائه شده توسط لی و فنوس [۱۵]، جهت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن استفاده شده است.

در این مدل، خرابی مصالح بتن با زوال سختی^{۱۰} آن مرتبط می باشد که با متغیر اسکالر d نشان داده می شود که در محدوده‌های بین صفر (حالت بدون خسارت) تا یک (حالت خسارت کامل) تغییر می کند. بدین ترتیب عبارت $(1-d)$ ضریبی است که در سطح مقطع کل ضرب شده و سطح مقطع مؤثر که بار وارده را تحمل می کند، به دست می دهد. اگر تنش وارد بر سطح مقطع مؤثر را $\bar{\sigma}$ و تنش وارد بر سطح مقطع کل را با σ نشان دهیم رابطه زیر بین این دو پارامتر قابل استخراج می باشد:

$$\sigma = (1-d) \cdot \bar{\sigma} = (1-d) E_0 (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (1)$$

که در آن E_0 مدول الاستیک اولیه (تخریب نشده)، ε کرنش کل و ε_p کرنش پلاستیک است. برای مدل خرابی پلاستیک بتن، همان طور که در شکل (۳) نشان داده می شود، دو مکانیسم شکست مصالح بتن فرض می شود که شامل ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری است. برای بار یکنواخت تک محوره، متغیر زوال سختی d توسط متغیرهای زوال سختی کشش و فشار تک محوره که به ترتیب به وسیله d_c و d_f نشان داده شده ارائه می شود.

شکل (۳)، مدل های رفتاری غیرخطی کششی و فشاری بتن مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد.

تکنونیک پیروی نمی کنند، از این رو برای این یک نوع سوم، یعنی پالس نوع C، معرفی گردیده است. این پالس ها دارای حداقل سه نیم سیکل در تاریخچه زمانی سرعت بوده و نسبت به پالس های نوع A و B دارای نیم سیکل های بیشتری می باشند. این پالس ها منتج به حداقل دو نیم سیکل در تاریخچه زمانی جابه جایی خواهند شد [۱۲-۱۳].

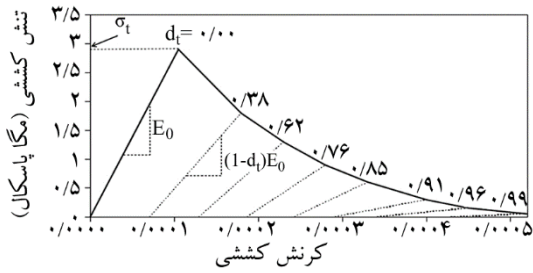
۳- مدل سازی عددی

۳-۱- معرفی مشخصات سد ماروپوینت

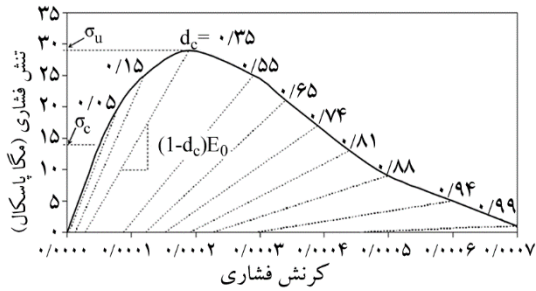
سد قوسی ماروپوینت واقع بر رودخانه گانیسن در ایالت کلرادو آمریکا می باشد. این سد قوسی با ارتفاع ۱۴۲ متر و عرض دره در تراز تاج سد برابر ۱۸۴ متر، زاویه مرکزی در تراز تاج ۱۳۳ درجه، ضخامت ۳/۷ متر در تاج و ۱۶ متر در کف می باشد. مشخصات بتن به کار رفته در سد به قرار زیر است: مدول الاستیسیته ۲۷/۵۷۹ گیگا پاسکال، جرم واحد حجم ۲۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب پواسون ۰/۲، مقاومت کششی تک محوری ۳ مگا پاسکال و نسبت میرایی ۵ درصد. همچنین خاک لحاظ شده در روند مدل سازی دارای ضریب پواسون ۰/۲، چگالی ۲۶۴۳ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته برابر ۲۶/۲ گیگا پاسکال می باشد. به دلیل پیچیدگی هندسه سد، مدل هندسی آن در نرم افزار سالدورکس تولید شد و در نرم افزار آباکوس مورد تحلیل قرار گرفت. شکل (۲) مدل المان محدود سد- مخزن و فونداسیون را نشان داده شده است. در مدل سازی انجام شده، سد به صورت یکپارچه و بدون درزهای انقباضی مدل شده است. در مدل اندرکنش سد- مخزن و فونداسیون، در صفحه‌ی مشترک بین هر کدام از آنها رابطه‌ی اندرکنشی به گونه‌ای تعریف شده که دو صفحه‌ی مقابل در درجات آزادی انتقالی نسبت به هم حرکتی نداشته باشند. همچنین شرط نفوذناپذیری سیال مخزن در بدنه‌ی سد رعایت شده است. سیال مخزن دارای مدول بالک ۲/۱ گیگا پاسکال و چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد [۱۴].

۳-۲- مدل رفتار غیرخطی بتن

در تحلیل غیرخطی لرزه‌ای سیستم های سد- مخزن- فونداسیون توسعه ترک و شکست سد با توجه به مقاومت اندک بتن در کشش، لازم است مد نظر قرار گیرد. بدین منظور در این تحقیق از



شکل (۳-الف): مدل رفتار غیرخطی بتن تحت بار تک‌محوری کششی [۱۶].



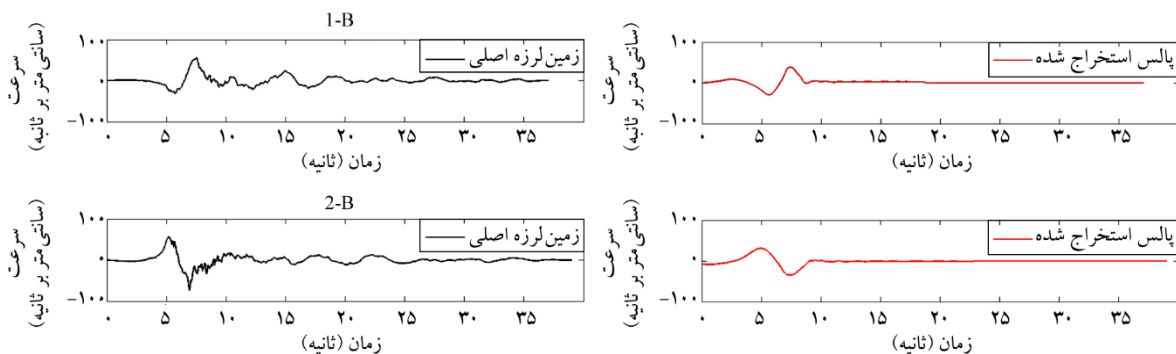
شکل (۳-ب): مدل رفتار غیرخطی بتن تحت بار تک‌محوری فشاری [۱۶].

۳-۳- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در روند تحلیل و تقسیم‌بندی آنها

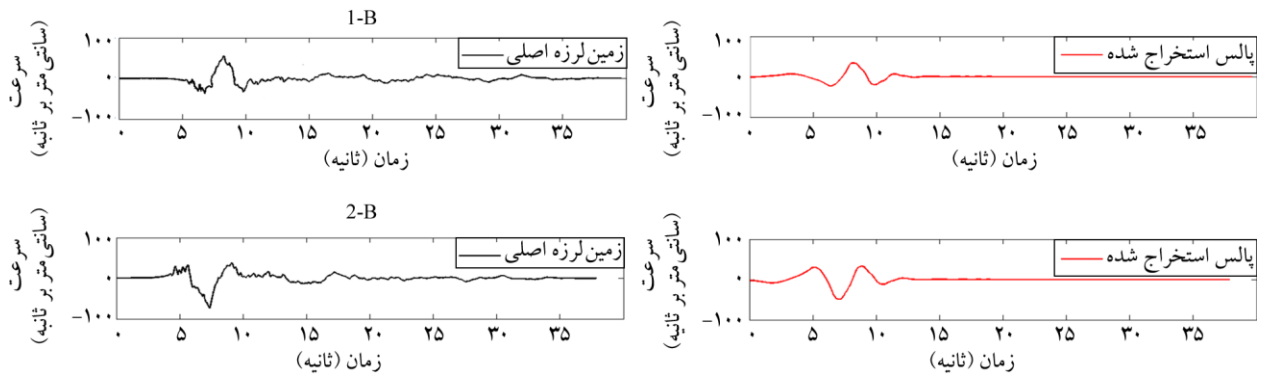
جهت بررسی اثرات زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک گسل بر پاسخ سد، مجموعه‌ای از هشت رکورد زمین‌لرزه با پالس‌های نوع B و C در تاریخچه زمانی سرعت آنها، بر اساس مطالعات انجام شده در مراجع [۱۲-۱۳، ۱۷] انتخاب شده و از پایگاه داده زمین‌لرزه PEER [۱۸] تهیه و استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به مخرب‌تر بودن پالس نوع B نسبت به نوع A [۵-۶]، تنها به مقایسه رکورد پالس‌های نوع B و C پرداخته شده است. جدول (۱) مشخصات رکوردهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. شکل (۴) نیز تاریخچه زمانی سرعت زلزله‌های مورد استفاده در روند تحلیل و نیز پالس‌های هموار شده‌ی آنها را نشان می‌دهد. در بخش‌های بعدی، نتایج بررسی رکوردهای دارای انواع پالس در میزان پاسخ سازه بررسی شده و مقایسه خواهد گردید.

جدول (۱): مشخصات رکوردهای مورد استفاده در تحلیل [۱۸].

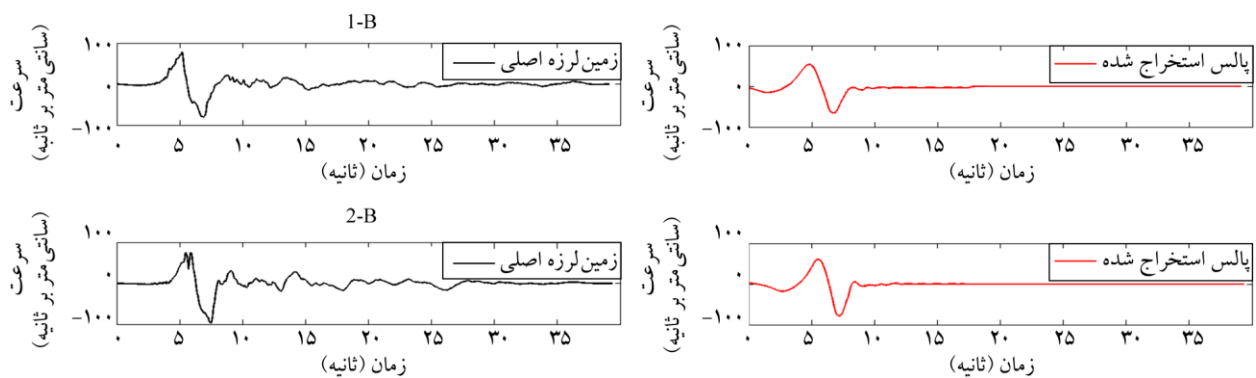
گروه	نوع پالس	شماره	رویداد	سال	ایستگاه	بزرگا	نام اختصاری	فاصله (کیلومتر)	دسته‌بندی نوع خاک بر اساس USGS ^{۱۱}
۱	B	۱	امپریال ولی	۱۹۷۹	El Centro Array #10	۶/۵۳	1-B	۸/۶۰	D
		۲	امپریال ولی	۱۹۷۹	El Centro Differential Array	۶/۵۳	2-B	۵/۰۹	D
	C	۳	امپریال ولی	۱۹۷۹	El Centro Array #3	۶/۵۳	3-C	۹/۸۵	D
		۴	امپریال ولی	۱۹۷۹	Holtville post Office	۶/۵۳	4-C	۵/۳۵	D
۲	B	۵	امپریال ولی	۱۹۷۹	El Centro Array #4	۶/۵۳	5-B	۷/۰۵	D
		۶	امپریال ولی	۱۹۷۹	El Centro Array #5	۶/۵۳	6-B	۳/۹۵	E
	C	۷	ال مایور	۲۰۱۰	El Centro Array #12	۷/۲	7-C	۹/۲۶	D
		۸	لندرز	۱۹۸۷	Yermo Fire Station	۷/۲۸	8-C	۲/۱۹	D
		۹	سویر استیشن هیلز	۱۹۹۲	Parachute Test Site	۶/۵۴	9-C	۰/۹۵	D
		۱۰	امپریال ولی	۱۹۷۹	El Centro Meloland Geot. Array	۶/۵۳	10-C	۰/۰۷	D



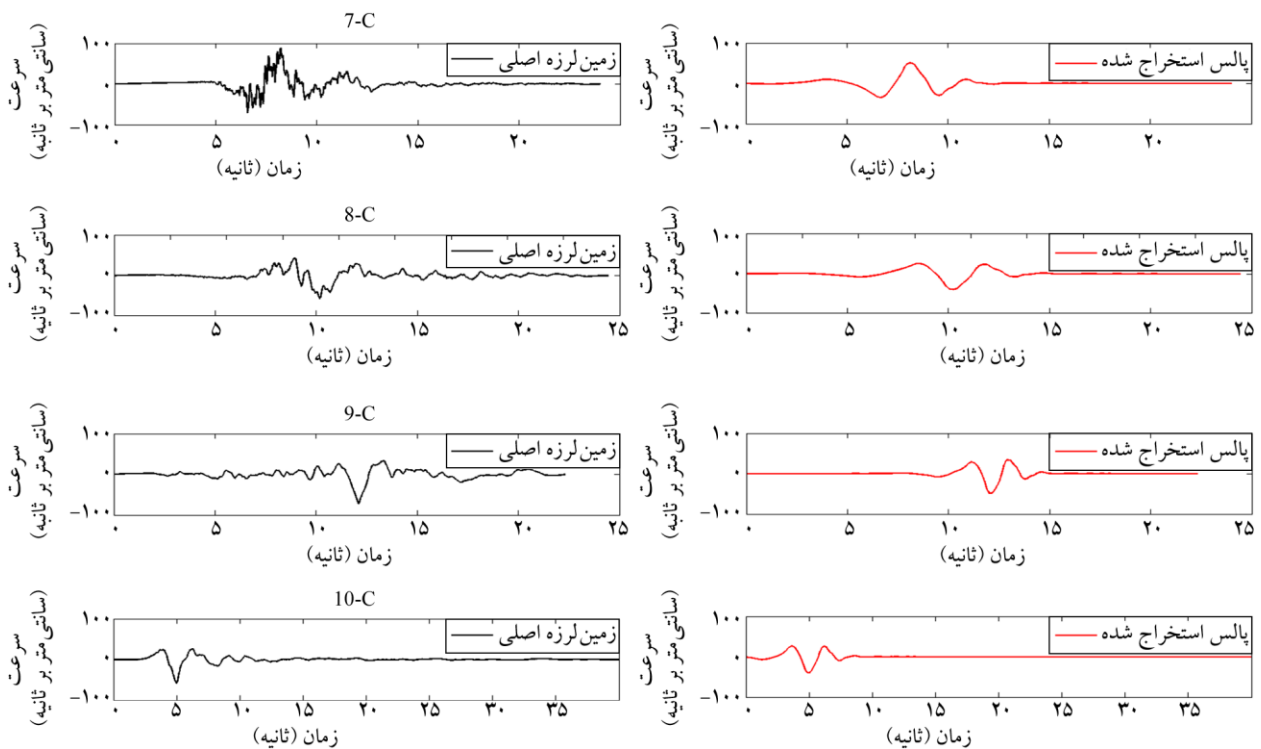
شکل (۴-الف): تاریخچه زمانی سرعت و پالس‌های هموار شده‌ی زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل (گروه ۱- نوع پالس B) [۱۹].



شکل (۴-ب): تاریخچه زمانی سرعت و پالس‌های هموار شدهی زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل (گروه ۱- نوع پالس C) [۱۹].



شکل (۴-ج): تاریخچه زمانی سرعت و پالس‌های هموار شدهی زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل (گروه ۲- نوع پالس B) [۱۹].



شکل (۴-د): تاریخچه زمانی سرعت و پالس‌های هموار شدهی زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل (گروه ۲- نوع پالس C) [۱۹].

مخصوص رکوردها نزدیک به هم شوند. خصوصیات زلزله‌های بخش اول پس از مقیاس کردن در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مشخصات رکوردهای مقیاس شده - گروه اول.

پالس نوع C		پالس نوع B		پارامترهای مشخصه رکوردهای مقیاس شده
4-C	3-C	2-B	1-B	
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	بیشینه شتاب رکورد (g)
۷۲/۸۹	۵۵/۸	۷۳/۵	۵۶/۴	بیشینه سرعت رکورد (سانتی متر بر ثانیه)
۳۷/۶۷	۳۷/۶۵	۳۸/۱۶	۳۷/۷۳	بیشینه جابه‌جایی رکورد (سانتی متر)
۱/۳۴۲	۱/۳۴	۱/۳۴۳	۱/۳۴۱	شدت آریاس (متر بر ثانیه)
۴۰/۱۷	۴۰/۳۶	۴۰/۱۰	۴۲/۷۵	چگالی انرژی مخصوص (سانتی متر مربع بر ثانیه)
۶/۱۸	۴/۳۵	۶/۲۶	۴/۲۵	مدت اثر پالس (ثانیه)

همان‌طور که در جدول (۳) ملاحظه می‌شود، با انتخاب بیشینه شتاب یکسان برای رکوردهای مختلف، چگالی انرژی آنها در حدود ۴۰۰۰ سانتی متر مربع بر ثانیه خواهد بود. همچنین پارامتر شدت آریاس این رکوردهای مقیاس شده، در حدود ۱/۳۴ متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به جدول، همچنین ملاحظه می‌شود که بیشینه جابه‌جایی رکوردها نیز در حدود هم می‌باشد. یکسان بودن پارامترهای فوق در دو رکورد، منجر به مقایسه بهتر تأثیر انواع پالس در رفتار سازه خواهد شد.

جدول (۴) مقادیر جابه‌جایی تاج سد را برای رکوردهای نوع B و C نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول نشان داده می‌شود مقادیر مربوطه در رکوردهای نوع C بیشتر از مقادیر نظیر آن در رکوردهای نوع B می‌باشد. همچنین بررسی تعداد المان‌های ترک‌خورده در این جدول نیز مؤید نتیجه فوق می‌باشد. این پاسخ بیشتر برای رکوردهای نوع پالس C با وجود شرایط تقریباً یکسان از نظر حداکثر شتاب و شدت آریاس، حداکثر جابه‌جایی و همچنین انرژی ورودی است.

شکل (۵) پروفیل ترک‌خوردگی در انتهای زمان تحلیل را نشان می‌دهد.

۴- بررسی تأثیر نوع پالس در پاسخ سازه

برای بررسی زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک، پارامترهای مختلف آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از جمله پارامترهایی که در این تحقیق مد نظر قرار گرفته، پارامتر شدت آریاس است. شدت آریاس توسط آرتور آریاس در سال ۱۹۷۰ ارائه و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad (2)$$

که در آن، I_a شدت آریاس، g شتاب زمین و $a(t)$ شتاب تاریخیچه زمانی زلزله است.

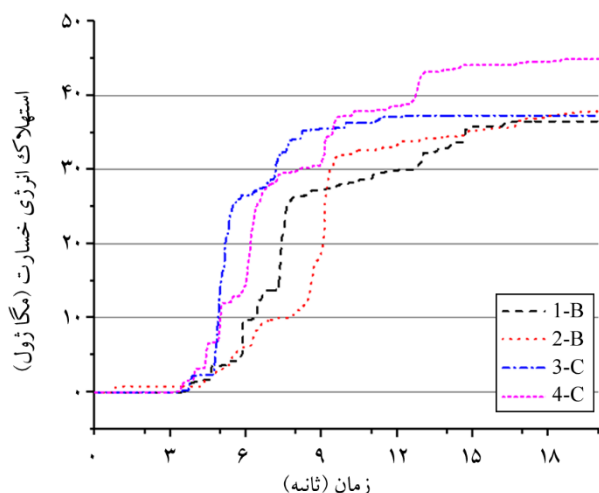
لازم به ذکر است که بر طبق تحقیقات اخیر پارامترهای بیشینه شتاب زمین و بزرگای زلزله تأثیرگذار بر میزان شدت آریاس است، یعنی با افزایش آنها، شدت آریاس افزایش می‌یابد؛ بنابراین شدت آریاس تابعی از بیشینه شتاب زمین و بزرگای زمین‌لرزه می‌باشد [۲۱].

دیگر پارامتر مورد بررسی در این تحقیق، چگالی انرژی مخصوص^{۱۲} می‌باشد که مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$SED = \int_0^{t_r} [V(t)]^2 dt \quad (3)$$

که در آن $V(t)$ تاریخیچه زمانی سرعت زمین و t_r مدت زمان رکورد زلزله می‌باشد.

در روند مقایسه رکوردهای پالس‌گونه حوزه نزدیک و بررسی اثرات نوع پالس این رکوردها در چگونگی پاسخ سازه، لازم است حتی‌الامکان برخی از پارامترهای تأثیرگذار در روند تحلیل ثابت در نظر گرفته شود تا اثر سایر پارامترها مورد بررسی قرار گیرد. بر خلاف مطالعات پیشین [۵-۱۰] که در آنها تنها یکسان بودن بیشینه شتاب زمین مد نظر قرار گرفته است، با توجه به تأثیر میزان انرژی رکورد زلزله بر پاسخ سازه [۲۳]، در این تحقیق یکسان بودن تقریبی انرژی رکوردهای مورد بررسی نیز مد نظر قرار گرفته است. بدین منظور، رکوردهای مورد استفاده به دو بخش تقسیم می‌شوند؛ به گونه‌ای که پس از مقیاس کردن آنها (مقیاس کردن بیشینه شتاب رکوردها به ۰/۳g) چگالی انرژی



شکل (۴): میزان استهلاک انرژی خسارت سد بر حسب زمان تحت اثر رکوردهای گروه اول.

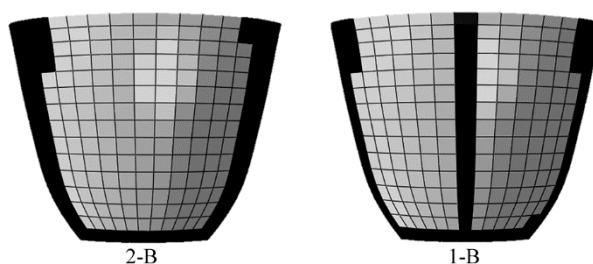
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار استهلاک انرژی برای رکوردهای از نوع پالس C، از مقادیر نظیر آن برای رکوردهای از نوع پالس B بیشتر است. این تفاوت، نشان‌دهنده‌ی قدرت تخریب بیشتر رکوردهای زمین‌لرزه نزدیک گسل حاوی پالس نوع C نسبت به رکوردهای نزدیک گسل حاوی پالس نوع B می‌باشد [۲۴].

بر طبق نتایج حاصله، رکوردها با پالس سرعت نوع C وضعیت بحرانی‌تری را نسبت به نوع B در المان‌های سد پدید می‌آورند که این اختلاف با وجود برابر بودن بیشینه شتاب زمین و یکسان بودن تقریبی شدت آریاس رکوردها و نیز اختلاف ناچیز در میزان انرژی و بیشینه جابه‌جایی رکورد زمین‌لرزه می‌باشد. به نظر می‌رسد این اختلاف ناشی از ماهیت شکلی (تعداد نیم‌سیکل بیشتر) موجود در زمین‌لرزه‌های از نوع پالس سرعت C است [۱۰]. همچنین اختلاف موجود در پاسخ پالس‌های هم‌نوع نیز به جهت تفاوت در مدت‌زمان پالس آنها و نیز میزان بیشینه سرعت آنهاست.

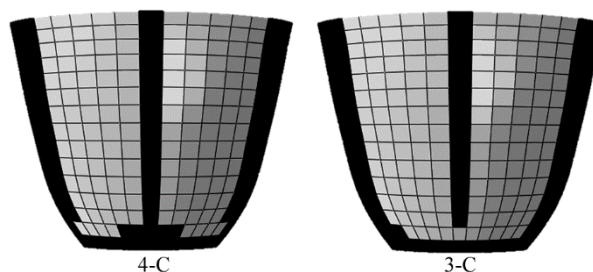
بخش دوم رکوردها در محدوده انرژی ۷۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر تائیه قرار دارند، زلزله‌های این بخش پس از مقیاس کردن در جدول (۵) آمده است. به غیر از بیشینه شتاب زمین و انرژی، سایر پارامترهای رکوردهای انتخاب شده ممکن است متفاوت باشند. همانند قبل، رکوردهای فوق بر سد مورد بررسی اثر داده شده و نتایج حاصله در جدول (۶) آمده است.

جدول (۴): مقادیر جابه‌جایی تاج سد و درصد المان‌های ترک‌خورده تحت رکوردهای گروه اول.

پالس نوع C		پالس نوع B		وجه بالادست سد
4-C	3-C	2-B	1-B	
۱۸/۲۵	۱۶/۸۰	۱۵/۲۰	۱۵/۰۱	جابه‌جایی تاج سد (سانتی‌متر)
۴۰/۴	۳۷/۸	۳۴/۷	۳۰/۷	درصد المان‌های ترک‌خورده



شکل (۵-الف): پروفیل ترک‌خوردگی در بدنه سد تحت اثر زلزله‌های گروه ۱- پالس نوع B (وجه بالادست).



شکل (۵-ب): پروفیل ترک‌خوردگی در بدنه سد تحت اثر زلزله‌های گروه ۱- پالس نوع C (وجه بالادست).

همان‌طور که در شکل‌های فوق نیز مشاهده می‌شود، وضعیت ترک‌خوردگی در المان‌های سد تحت اثر رکوردهای نوع C بحرانی‌تر است.

به‌منظور بررسی بیشتر شدت خسارت ناشی از انواع مختلف پالس‌ها، پارامتر استهلاک انرژی در المان‌های آسیب‌دیده سد برای رکوردهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۶) نمودار استهلاک انرژی خسارت سد بر حسب زمان تحت اثر رکوردهای گروه اول را نشان می‌دهد.

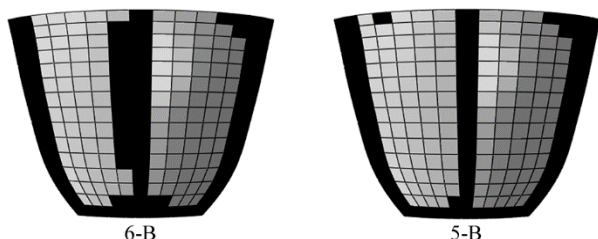
جدول (۵): مشخصات رکوردهای مقیاس شده - گروه دوم.

پالس نوع C				پالس نوع B		پارامترهای مشخصه رکوردهای مقیاس شده
10-C	9-C	8-C	7-C	6-B	5-B	
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	بیشینه شتاب رکورد (g)
۱۱۶/۴۰	۷۳/۷۸	۶۹/۹۱	۷۲/۷۰	۹۶/۵۰	۸۰/۸۱	بیشینه سرعت رکورد (ساتی متر بر ثانیه)
۳۷	۵۷/۶۱	۶۳/۰۴	۵۶/۸۴	۶۷/۶۶	۶۵/۴۶	بیشینه جابه‌جایی رکورد (ساتی متر)
۰/۹۲۰	۱/۸۹۸	۰/۹۹۸	۱/۹۱۴	۰/۹۱۲	۰/۸۹۳	شدت آریاس (متر بر ثانیه)
۷۴۲۴	۷۲۶۷	۷۲۰۸	۷۰۴۱	۷۷۰۲	۷۰۵۶	چگالی انرژی مخصوص (ساتی متر مربع بر ثانیه)
۳/۹۵	۳/۸۷	۷/۵	۸/۷۲	۴/۱۳	۴/۲۹	مدت اثر پالس (ثانیه)

جدول (۶): مقادیر جابه‌جایی تاج سد و درصد المان‌های ترک‌خورده تحت رکوردهای گروه دوم.

پالس نوع C				پالس نوع B		وجه بالادست سد
10-C	9-C	8-C	7-C	6-B	5-B	
۱۶/۴۵	۲۱/۱۵	۲۲/۱۸	۳۱/۱۶	۲۲	۱۸/۶۱	جابه‌جایی تاج سد (ساتی متر)
۳۷/۸	۴۵/۷	۴۶/۶	۴۹/۵	۴۵/۴	۴۱/۱۴	درصد المان‌های ترک‌خورده

جابه‌جایی، شدت آریاس و چگالی انرژی دو رکورد تقریباً یکسان می‌باشند. حتی با مقایسه رکوردهای 8-C و 9-C ملاحظه می‌شود که علی‌رغم بیشتر بودن شدت آریاس رکورد 9-C نسبت به رکورد 8-C (در حدود دو برابر)، با توجه به بیشتر بودن پارامتر «مدت اثر پالس» در رکورد 8-C (در حدود دو برابر)، پاسخ‌های سد تحت اثر این رکورد اندکی بیشتر از رکورد 9-C است که این موضوع اهمیت پارامتر «مدت اثر پالس» را نشان می‌دهد. در نهایت مشاهده می‌شود که در صورت یکسان بودن تقریبی پارامترهای شدت آریاس و مدت اثر پالس در رکورد پالس‌های نوع B و C، دیگر پارامترها از قبیل بیشینه جابه‌جایی رکورد می‌تواند در پاسخ سد اثرگذار باشد. این موضوع در مقایسه‌ی رکورد 10-C با رکوردهای 5-B و 6-B قابل استنتاج می‌باشد.



شکل (۷-الف): پروفیل ترک‌خوردگی در بدنه سد تحت اثر زلزله‌های گروه ۲- پالس نوع B (وجه بالادست).

همان‌طور که در جدول (۶)، ملاحظه می‌شود، میزان جابه‌جایی تاج سد و نیز درصد المان‌های ترک‌خورده در بدنه سد برای رکوردهای مختلف متفاوت است و بیشترین مقدار این پارامترها در خصوص رکورد مربوط به زلزله 7-C مشاهده شده است. با دقت در جدول (۵)، ملاحظه می‌شود که رکورد مورد نظر دارای بیشترین شدت آریاس و نیز بیشترین مقدار برای پارامتر «مدت اثر پالس» می‌باشد. برای بررسی بیشتر این موضوع و در عین حال بررسی اثر نوع پالس در پاسخ سازه، مقایسه‌هایی بین نتایج حاصل از رکوردهای مختلف انجام شده است. در خصوص رکوردهای 9-C و 6-B ملاحظه می‌شود که پاسخ حاصل از رکورد 9-C بیشتر از مقدار نظیر در رکورد 6-B می‌باشد. مقایسه خصوصیات این دو رکورد نشان می‌دهد که رکورد 9-C دارای شدت آریاس بیشتری (در حدود دو برابر) نسبت به رکورد 6-B است؛ این در حالی است که بیشینه سرعت و جابه‌جایی و چگالی انرژی مخصوص رکورد 6-B از رکورد 9-C بیشتر می‌باشد. در خصوص رکوردهای 7-C و 9-C مشاهده می‌شود که پاسخ حاصل از رکورد 7-C بیشتر از رکورد 9-C می‌باشد. مقایسه خصوصیات این دو رکورد بیانگر آن است که رکورد 7-C دارای مدت اثر پالس بیشتری (بیشتر از دو برابر) نسبت به رکورد 9-C می‌باشد. این در حالی است که بیشینه سرعت و

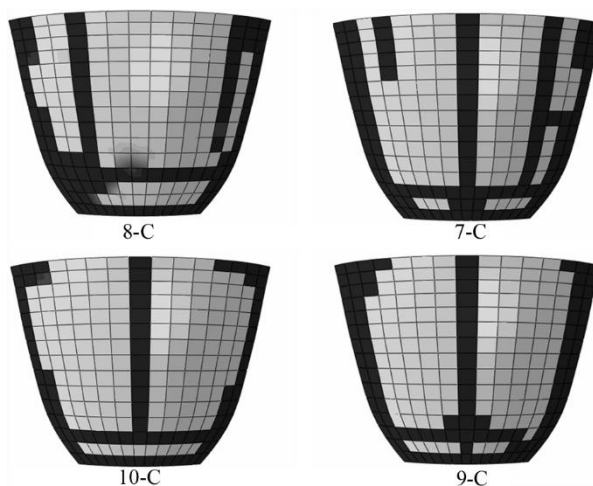
با «مدت اثر پالس» بیشتر در زمان بیشتری به حداکثر اتلاف انرژی خود می‌رسند. ضمن آنکه رکوردهای مخرب‌تر همانند ۷ و ۸ دارای استهلاک انرژی بیشتری نسبت به سایر رکوردها هستند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر نوع پالس سرعت رکوردهای زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل و پارامترهای تأثیرگذار رکوردهای ورودی حوزه نزدیک بر پاسخ سازه پرداخته شده است. بدین منظور مدل سد دو قوسی مارپوینت با استفاده از روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن اندرکنش سد-مخزن-فونداسیون مد نظر قرار گرفت. رکوردهای مورد بررسی به دو گروه با بیشینه شتاب مقیاس شده یکسان و انرژی نسبتاً یکسان تقسیم شدند. در گروه اول بیشینه شتاب زمین، شدت آریاس و بیشینه جابه‌جایی یکسان بوده است. نتایج حاصله حاکی از پاسخ بیشتر رکوردهای پالس‌گونه نوع C بوده است. این اختلاف ناشی از ماهیت شکلی (تعداد نیم‌سیکل بیشتر) موجود در زمین‌لرزه‌های از نوع پالس سرعت C بوده است. همچنین اختلاف موجود در پاسخ پالس‌های هم‌نوع نیز به جهت تفاوت در مدت‌زمان پالس آنها و نیز میزان بیشینه سرعت آنها می‌باشد.

در گروه دوم نیز بررسی‌ها نشانگر مخرب‌تر بودن رکوردهای پالس‌گونه از نوع C در حالت کلی است؛ بررسی‌های بیشتر همچنین نشانگر تأثیرگذاری نسبتاً زیاد دو پارامتر «شدت آریاس» و «مدت اثر پالس» در میزان پاسخ حاصله از رکوردها در حالت یکسان بودن انرژی رکوردها است. بدین معنا که رکورد ۷ که در آن هر دو پارامتر مذکور مقادیر نسبتاً زیادی داشتند، بیشینه پاسخ را نتیجه داده است. در حالت یکسان بودن نسبی پارامترهای فوق، سایر پارامترها نظیر بیشینه جابه‌جایی و ... تأثیرگذار نشان داده‌اند.

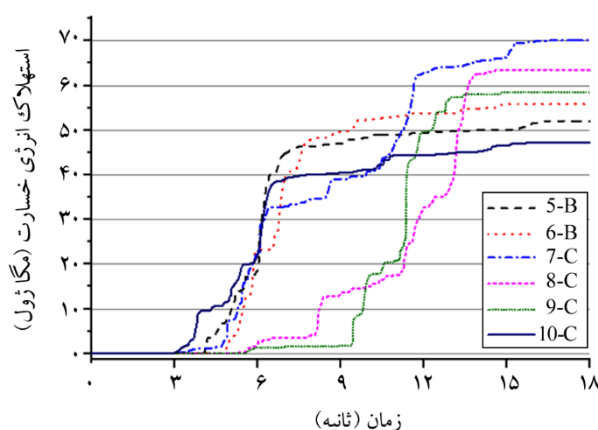
این تحقیق قابل گسترش برای انواع دیگر سازه‌ها بوده و بررسی تأثیر سایر پارامترهای تأثیرگذار رکوردهای حوزه نزدیک و ... امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل (۷-ب): پروفیل ترک خوردگی در بدنه سد تحت اثر زلزله‌های گروه ۲- پالس نوع C (وجه بالادست).

همان‌طور که در شکل‌های فوق ملاحظه می‌شود، گسترش ترک در سد تحت رکوردها با پالس‌های نوع C عموماً شامل ترک خوردگی‌های افقی می‌باشد که به ترک‌های قائم منتهی شده‌اند. این موضوع، در حالت کلی، مخرب بودن این رکوردها را نسبت به رکوردها با پالس نوع B نشان می‌دهد. برای بررسی کمی میزان خسارت در بدنه سد، از پارامتر استهلاک انرژی استفاده می‌شود.

شکل (۸) نمودار استهلاک انرژی خسارت سد بر حسب زمان تحت اثر رکوردهای گروه دوم را نشان می‌دهد.



شکل (۸): میزان استهلاک انرژی خسارت سد بر حسب زمان تحت اثر رکوردهای گروه دوم.

همان‌طور که در شکل فوق ملاحظه می‌شود، رکوردها

مراجع

10. Huang, J. (2015) Earthquake damage analysis of concrete gravity dams: modeling and behavior under near-fault seismic excitations. *Journal of Earthquake Engineering*, **19**(7), 1037-1085.
11. *Uniform Building Code (1997) International Conference of Building Officials*. Whittier, CA.
12. Makris, N. and Chang, S.-P. (2000) Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **29**(1), 85-107.
13. Makris, N. and Black, C.J. (2004) Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under pulse-type excitations. *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(9), 1006-1018.
14. Alembagheri, M. and Ghaemian, M. (2013) Damage assessment of a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **44**, 127-137.
15. Lee, J. and Fenves, G.L. (1998) A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**(9), 937-956.
16. Alembagheri, M. and Ghaemian, M. (2016) Seismic performance evaluation of a jointed arch dam. *Structure and Infrastructure Engineering*, **12**(2), 256-274.
17. Tang, Y. and Zhang, J. (2011) Response spectrum-oriented pulse identification and magnitude scaling of forward directivity pulses in near-fault ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(1), 59-76.
18. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. [Online]. Available: <http://peer.berkeley.edu> [2016, December].
19. Shahi, S. and Baker, J. (2016) *Pulse Classifications from NGA West2 database (2012, November 1-last update)*. [Online]. Available: <http://web.stanford.edu> [2016, September].
20. Arias, A. (1970) *A measure of earthquake intensity, in Seismic Design for Nuclear Power Plants*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 438-483.
1. Karabulut, M., Kartal, M.E., Capar, O.F., and Cavusli, M. (2016) Earthquake analysis of concrete arch dams considering elastic foundation effects. *Disaster Science and Engineering*, **2**(2), 46-52.
2. Qiumei, H., Yaqi, L., Aiwen, L., Xiaojun, L. (2008) Seismic analysis of gravity dam subjected to near-field pulse-like ground motions. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.
3. Malhotra, P.K. (1999) Response of buildings to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**(11), 1309-1326.
4. Mavroeidis, G.P., Dong, G., Papageorgiou, A.S. (2004) Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **33**(9), 1023-1049.
5. Shen, J., Tsai, M.-H., Chang, K.-Ch., and Lee, G.C. (2004) Performance of a seismically isolated bridge under near-fault earthquake ground motions. *Journal of Structural Engineering*, **130**(6), 861-868.
6. Kalkan, E. and Kunath, S.K. (2006) Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, **22**(2), 367-390.
7. Bayraktar, A., Altunişik, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E., Türker, T., and Bilici, Y. (2009) Comparison of near-and far-fault ground motion effect on the nonlinear response of dam-reservoir-foundation systems. *Nonlinear Dynamics*, **58**(4), 655-673.
8. Champion, C. and Liel, A. (2012) The effect of near-fault directivity on building seismic collapse risk. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**(10), 1391-1409.
9. Vafaei, D. and Eskandari, R. (2015) Seismic response of mega buckling-restrained braces subjected to fling-step and forward-directivity near-fault ground motions. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **24**(9), 672-686.

متغیر زوال سختی فشاری تک‌محوره بتن	d_t
متغیر زوال سختی کششی تک‌محوره بتن	d_c
تنش وارد بر سطح مقطع مؤثر	$\bar{\sigma}$
تنش وارد بر سطح مقطع کل	σ
مدول الاستیک اولیه (تخریب نشده) بتن	E_0
کرنش کل بتن	ε
کرنش پلاستیک بتن	ε_p
تنش کل کششی	σ_t
تنش کل فشاری	σ_c
تنش کل نهایی	σ_u
شدت آریاس	I_a
شتاب تاریخچه زمانی زلزله	$a(t)$
شتاب زمین	g
چگالی انرژی مخصوص	SED
تاریخچه زمانی سرعت زمین	$V(t)$
مدت زمان رکورد زلزله	t_r

21. Liu, J.M., Wang, T., Wu, S.R., Gao, M.T. (2016) New Empirical Relationships between Arias Intensity and Peak Ground Acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **106**(5), 2168-2176.
22. Kwon, O.-S. and Kim, E. (2010) Case study: Analytical investigation on the failure of a two-story RC building damaged during the 2007 Pisco-Chincha earthquake. *Engineering Structures*, **32**(7), 1876-1887.
23. Liao, W.-I., Loh, Ch.-H., and Wan, Sh. (2001) Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions. *The Structural Design of Tall Buildings*, **10**(3), 219-229.
24. Zhang, S. and Wang, G. (2013) Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **53**, 217-229.

واژه‌نامه

Peak Ground Acceleration (PGA)	۱- بیشینه شتاب زمین
Peak Ground Velocity (PGV)	۲- بیشینه سرعت زمین
Peak Ground Displacement (PGD)	۳- بیشینه جابه‌جایی زمین
Gia-Yi earthquake	۴- زلزله جیا-یی
Morrow Point Double Concret Arch Dam	۵- سد دو قوسی ماروپوینت
Duration	۶- مدت زمان
Forward-Directivity	۷- جهت‌داری پیش‌رونده
Fling-Step	۸- جابه‌جایی ماندگار تکتونیکی
Concrete Damaged Plasticity (CDP) Model	۹- مدل خرابی پلاستیک بتن
Stiffness Degradation	۱۰- زوال سختی
United States Geological Survey (USGS)	۱۱- سازمان زمین‌شناسی آمریکا
Specific Energy Density (SED)	۱۲- چگالی انرژی مخصوص

نشانه‌گذاری

d متغیر زوال سختی بتن

The Effect of the Near-Fault Velocity Pulse Type Ground Motions on the Response of Concrete Arch Dams (Case Study)

Seyed Younes Jabbari¹, Reza Taghipour^{2,*}, Mohsen Bozorgnasab³

1. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran,
* Corresponding Author, email: r.taghipour@umz.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Because of the importance of the dam safety and to overcome the damages caused by the failure of the concrete dams under the earthquake, the seismic performance assessment of concrete dams needs more attention. This study deals with the investigation of the effect of the near-fault velocity pulse type ground motions and their effective parameters on the structural response. For this purpose, the Morrow Point arch dam has been considered as the case study. The dam is modeled in the SOLIDWORKS software and analyzed in the finite element ABAQUS software, considering the dynamic interaction of dam-reservoir-foundation and nonlinear behavior of concrete. In a nonlinear seismic analysis of dam-reservoir-foundation system, the crack propagation and the dam failure due to the low tension strength of concrete is necessary to be considered. Therefore, this study uses the concrete damage plasticity (CDP) model to consider the nonlinear behavior of concrete in tension and compression. Generally, near-fault ground motions have short effective duration and contain long period pulses with big pulse amplitude. Three types of pulses have been introduced in the literature to show the velocity pulse type ground motions. Pulse A is a one-sided type (one half cycle pulse) that results in fling step in its displacement time history. Pulse type B represents for the forward directivity effects and contains a two-sided pulse (a pulse with two half cycles), which has a long period and amplitude in its velocity time history and its displacement time history includes just a one-sided pulse. Nevertheless, all the near-fault ground motions do not follow the forward directivity or fling step patterns; hence, another pulse type named C has been introduced. These pulses have at least three half cycles in their velocity time histories, more than those of pulse types A and B. These pulses result in at least two half cycles in the displacement time history. In order to consider the effects of near-fault ground motions on the dam response, a collection of ground motions with B and C pulses in their velocity time histories have been selected and used in this study. For comparison purpose of the near-fault pulse like records, one should keep some of the effective parameters constant in the analysis process in order to study the effects of the other parameters. Unlike previous studies that only consider the peak ground acceleration (PGA) as the constant and common parameter of the records, the similar energy of the records is also taken into account in this study. The records are divided into two categories according to their specific energy density; so that, after scaling their PGA to 0.3 g, the specific energy densities of each category of the records are relatively similar. In the first group in which the maximum velocity, the Arias intensity and maximum displacement are relatively similar, the results indicate that the records which contain pulse type C, show more destructive responses. The difference is due to the shape nature (more half cycles) of this pulse type. In the second group, generally, the surveys also show more destructive responses of the records with pulse type C. Further investigations also present relatively much more effects of the "Arias Intensity" and "Pulse Duration" on the response for the records with relatively the same specific energy density. Besides, in the case of the relatively the

same values for the above-mentioned parameters, other parameters such as the maximum displacement are effective. The results of this study could be useful for the structures designed and constructed for the near-fault regions.

Keywords: Concrete Arch Dam, Near-Fault Earthquake, Pulse-Like Records, Earthquake Energy, Arias Intensity, Duration of Pulse.