

بررسی اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور بر رفتار لرزه‌ای چند نوع سازه مختلف

محمد داوودی، استادیار، پژوهشکده ژئوتکنیک لرزه‌ای، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
رضا فیضی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
نوید هادیانی، دانشجوی دکترای دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

چکیده

خصوصیات و مشخصات نگاشته‌های حوزه دور می‌باشد. وجود آگاهی از این تفاوت و به علت کمبود اطلاعات تا دهه اخیر، مطالعات اندکی بر روی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک و تأثیر آنها بر روی سازه‌ها انجام شده است. در سالهای اخیر از چندین زلزله مشهور مانند زلزله نورتریج آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه ژاپن (۱۹۹۵)، ازمیت ترکیه (۱۹۹۹) و چی چی تایوان (۱۹۹۹)، اطلاعات بسیار ارزشمندی در مورد شناخت خصوصیات و تأثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌ها به دست آمد که راه را برای مطالعه بیشتر در مورد زلزله‌های حوزه نزدیک و اثرات آنها باز کرد. با وجود مطالعات قابل توجه در مورد اثرات جهت‌پذیری پیشرونده و تغییرمکان ماندگار بر روی انواع سازه‌ها، مطالعات انجام شده در رابطه با اثرات حوزه نزدیک بر روی ابنیه‌های خاکی به خصوص سدهای خاکی بسیار اندک می‌باشد و با توجه به تعداد زیاد این نوع سازه‌ها در مناطق کشور لرزه‌خیز ایران، ارزیابی رفتار آنها در برابر این زلزله‌ها و مقایسه با نتایج حاصل از زلزله‌های حوزه دور می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد.

رکوردهای ثبت شده از زمین‌لرزه‌های اخیر نشان می‌دهد که زلزله‌های حوزه نزدیک دارای ویژگیهای متفاوتی نسبت به زلزله‌های حوزه دور می‌باشند. در مجموع بیشتر این ویژگیها، در اثر پدیده مهم جهت‌پذیری پیشرونده در زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد. این پدیده باعث می‌شود مؤلفه عمود بر گسل نگاشته‌های ثبت شده در نزدیک گسل، دارای پالس‌هایی با پرپود بلند در نگاشت سرعت باشند. همچنین در اکثر این نگاشته‌ها، تقریباً کل انرژی زلزله، در این پالس‌ها جمع می‌شود که ورود یکباره انرژی به سازه، تغییرشکل‌های بزرگی ایجاد می‌نماید. در این مقاله ضمن بررسی موارد مذکور و تمرکز بر خصوصیات مختلف زلزله‌های حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله‌های حوزه دور، به بررسی اثرات آنها در سازه‌های مختلف از جمله سازه‌های یکدرجه آزاد، سازه‌های چند درجه آزاد، پلها، سدهای بتنی و سدهای خاکی پرداخته شده است.

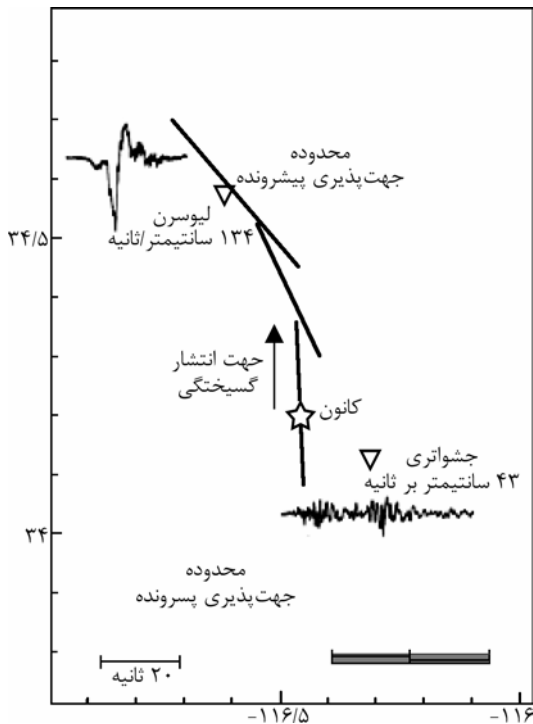
کلیدواژه‌ها: زلزله‌های حوزه نزدیک و دور، جهت‌پذیری پیشرونده، پالس غالب، رفتار دینامیکی سازه‌ها

۱- مقدمه

۲- اثرات و خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک
با شناخته شدن برخی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک در سال ۱۹۵۷، مهمترین مطالعات صورت گرفته در آن زمان را هادسون و هوسنر [۱]، بولت [۲] و برترو و همکاران [۳] انجام دادند. هوسنر و هادسون دریافتند که زلزله‌های حوزه نزدیک شامل پالس‌های بحرانی انرژی هستند. هرچند ممکن است این زلزله‌ها دارای بزرگای کوچکی از نظر ریشتر و یا دامنه کوچکی باشند ولی دارای پتانسیل تخریبی بالایی می‌باشند.

خصوصیات جنبشهای حوزه نزدیک مستقیماً وابسته به مکانیزم چشمه لرزه‌ای، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جهت لغزش گسل می‌باشد. مهمترین خصوصیات متمایزکننده جنبشهای حوزه نزدیک، تولید پالس‌هایی به علت اثر جهت‌پذیری و اثر تغییرمکان ماندگار می‌باشد. این نوع پالس‌های حرکت عموماً شامل یک یا چند پالس مجزا در تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییرمکان و اغلب در تاریخچه زمانی سرعت می‌باشد. این خصوصیات در نگاشته‌های زلزله‌های حوزه نزدیک کاملاً متفاوت با

جبهه گسیختگی قرار دارند که پالس جهت‌پذیری و نیز مدت دوام کوتاه در نگاشت ثبت شده ایستگاه لیوسرن مشاهده می‌گردد.



شکل (۱): منطقه لیوسرن که موقعیت کانون زلزله، ایستگاههای ثبت رکورد و نگاشتهای ثبت شده در سال ۱۹۶۲ را نشان می‌دهد [۶].

به طور کلی از نظر بسیاری از محققین [۵-۷] شرایطی که منجر به اثر جهت‌پذیری پیشرونده می‌شود، می‌تواند در دو نکته زیر خلاصه شود:

۱- گسیختگی گسل به سمت ساختگاه باشد یا زاویه بین امتداد انتشار گسیختگی و ساختگاه کوچک باشد.

۲- سرعت گسیختگی گسل نزدیک سرعت موج برشی ساختگاه باشد.

همچنین اثر جهت‌پذیری می‌تواند توزیع انرژی در زمان یعنی؛ دانسیته ویژه انرژی^۲ را تغییر دهد. بنابراین، این دانسیته می‌تواند یکی از پارامترهای مهم در تشخیص زمین‌لرزه‌های متأثر از اثر جهت‌پذیری باشد [۸].

در نهایت مهمترین ویژگیهای ناشی از اثر جهت‌پذیری که در مطالعات بسیاری از محققین به عنوان پارامترهای

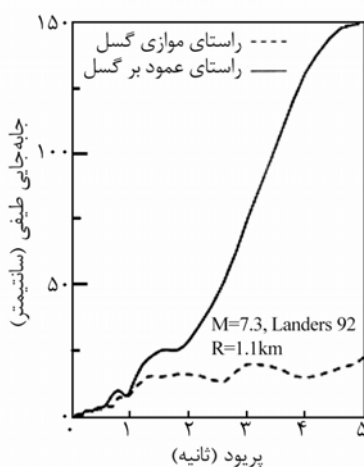
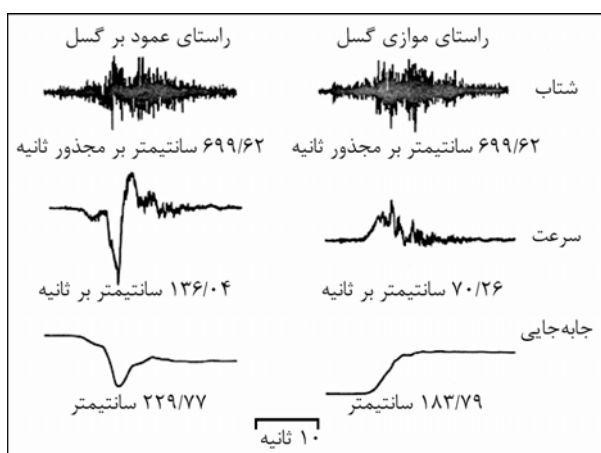
همچنین پالس‌های سرعت که ناشی از لغزش سریع گسل می‌باشند، برای اولین بار توسط بولت با مطالعه حرکات ثبت شده زلزله سان‌فرناندو شناخته شد.

در مجموع این زلزله‌ها دارای ویژگیهایی چون تاریخچه زمانی پالس مانند با پالس‌های پررود بلند، نسبت بزرگ سرعت حداکثر به شتاب حداکثر زمین (v_{PG}/a_{PG}) و گاهی تغییرشکل‌های دائمی بزرگ در زمین می‌باشند [۴]. این ویژگیها در نتیجه تأثیر پدیده‌های زیادی در نزدیکی چشمه لرزه‌ای به وجود می‌آیند که در ادامه، تشریح می‌شوند.

۱-۲- اثر جهت‌پذیری^۱

هنگامی که گسیختگی گسل به سمت ساختگاه گسترش یافته و جهت لغزش گسل نیز به سمت آن باشد پدیده جهت‌پذیری پیشرونده اتفاق می‌افتد. هنگامی که جبهه گسیختگی از کانون به سمت ساختگاه انتشار یابد در این صورت به دلیل نزدیک بودن سرعت گسیختگی گسل به سرعت امواج برشی زلزله، امواج آزاد شده در اثر لغزشهای متوالی نواحی مختلف گسل در نزدیکی جبهه گسلش (قسمت جلوی مسیر گسیختگی در گسل) به صورت سیلی از امواج در حال حرکت، جمع می‌شوند. این امواج دفعتاً و به صورت یک شوک قوی به ساختگاه می‌رسد، که این شوک به شکل یک پالس قوی حرکت در جهت عمود بر لغزش و در ابتدای نگاشت زلزله قابل تشخیص است، بنابراین، مدت دوام کم و پالس‌هایی با دامنه بزرگ و پررودهای متوسط تا بلند می‌تواند از مشخصه‌های شرایط جهت‌پذیری پیشرونده باشد. این خصوصیات در پشت جبهه گسیختگی دیده نمی‌شود. پدیده جهت‌پذیری هم در گسلهای امتدادلغز و هم در گسلهای شیب‌لغز اتفاق می‌افتد. در مکانیزم گسلش امتدادلغز به علت پراکنش شعاعی تغییرمکان برشی روی آن، پالس حرکت عمود بر جهت لغزش می‌باشد و در گسلش شیب‌لغز نیز شرایط جهت‌پذیری پیشرونده برای ایستگاههایی که در قسمت فوقانی صفحه گسلش قرار دارند، مهیا می‌گردد [۵]. به طور مثال، شکل (۱) موقعیت دو ایستگاه در زلزله لندرز را نشان می‌دهد که ایستگاه لیوسرن در جلوی جبهه گسیختگی و ایستگاه جشواتری در پشت

بوده و مقادیر بیشینه سرعت در مؤلفه‌های عمود بر گسل به طور قابل توجه بزرگتر از مؤلفه‌های موازی گسل می‌باشد [۱۱-۱۲]. همچنین طیف پاسخ برای حرکات عمود بر گسل بسیار بزرگتر از حرکات موازی گسل در پریودهای متوسط و بالا می‌باشد [۶] و [۱۲]. در شکل (۳)، پالس جهت‌پذیری در مؤلفه عمود بر گسل نگاشت لیوسرن دیده می‌شود. همین‌طور طیف پاسخ تغییرمکان مؤلفه عمود بر گسل این نگاشت در پریودهای بلند بسیار بزرگتر می‌باشد.



شکل (۳): تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییرمکان مؤلفه‌های عمود بر گسل و موازی گسل (بالا) و طیف پاسخ تغییرمکان نگاشت لیوسرن [۶].

۲-۲- اثر تغییرمکان ماندگار

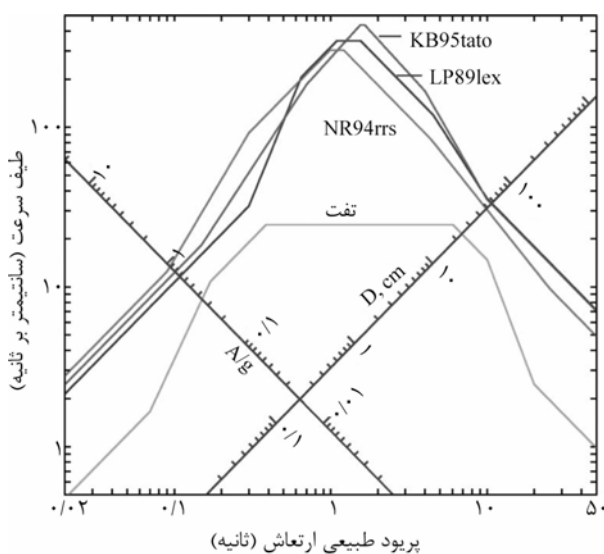
خصوصیات دیگر نگاشتهای حوزه نزدیک ثبت شده در زلزله‌های جدید مانند زلزله‌های سال ۱۹۹۹ ترکیه و تایوان، تغییرمکان ماندگار حاصل از گسلش زمین در مناطق نزدیک گسل می‌باشد که در بازه زمانی چند ثانیه‌ای لغزش و در

مؤثر در پاسخ و رفتار سازه‌ها شناخته شده است، به شرح ذیل می‌باشند:

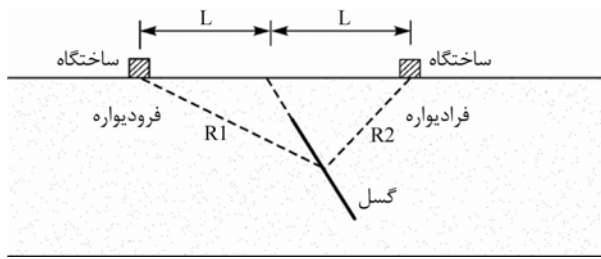
۱- تجمع انرژی در یک بازه زمانی کوتاه که باعث حرکت ضربه مانند خواهد شد که آن هم دامنه بلند، شکل پالس مانند و مدت دوام کوتاه در تاریخچه زمانی نگاشت زلزله را ناشی می‌شود [۷] و [۹].

۲- پدیده جهت‌پذیری باعث می‌شود در زلزله‌های حوزه نزدیک، نسبت (v_{PG}/a_{PG}) بزرگتر و نسبت d_{PG}/v_{PG} کوچکتر از زلزله‌های حوزه دور باشد. نسبتهای فوق، به ترتیب پریودهای T_c (پریودی که نواحی حساس به شتاب و حساس به سرعت را در طیف پاسخ از هم تفکیک می‌کند) و T_d (پریودی که نواحی حساس به سرعت و حساس به تغییرمکان را در طیف پاسخ از هم تفکیک می‌کند) را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد و باعث باریکتر شدن ناحیه حساس به سرعت و پهن‌تر شدن ناحیه حساس به شتاب و حساس به تغییرمکان می‌گردد [۱۰]. در شکل (۲)، طیف پاسخ چند نگاشت حوزه نزدیک به همراه نگاشت حوزه دور تفت رسم شده است که به وضوح صحت مطلب فوق در آن دیده می‌شود.

۳- اثر جهت‌پذیری در جهت عمود بر گسل به دلیل پراکنش شعاعی جابه‌جایی برشی گسل مشخص‌تر



شکل (۲): طیف پاسخ هموار شده مؤلفه عمود بر گسل سه نگاشت حوزه نزدیک به همراه نگاشت حوزه دور تفت [۱۰].



شکل (۵): نمودار اثر فرا دیواره / [۴].

شدید زمین در فرادیواره نسبت به فرودیواره در یک فاصله یکسان مشاهده می‌شود [۱۴].

ب- این اثر بیشترین تأثیرها را در طیف پاسخ شتاب در پریودهای کوتاه دارد [۱۵].

پ- عدم در نظر گرفته شدن اثر فرادیواره در مدل‌های تجربی پارامترهای جنبش زمین استفاده شده در مدل‌ها، ممکن است در بسیاری حالات، خطاهای بزرگ در پیش‌بینی زلزله‌های حوزه نزدیک و ارزیابی خطر لرزه‌ای احتمالی به وجود آورد [۱۶].

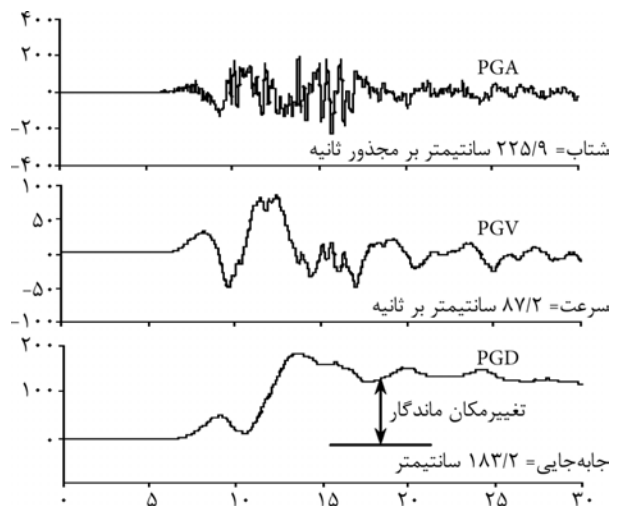
۲-۴- اثر مؤلفه قائم

از دیدگاه بسیاری از محققین، مهمترین ویژگیهایی که در نتیجه اثر مؤلفه قائم در زلزله‌های حوزه نزدیک متفاوت با زلزله‌های حوزه دور مطرح شده است، به شرح زیر می‌باشد:

الف- نسبت بیشینه شتاب قائم به بیشینه شتاب افقی (a_{PV}/a_{PH}) در زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به زلزله‌های حوزه دور بیشتر می‌باشد. در تعدادی حالات، این نسبت بیشتر از مقدار $\frac{2}{3}$ است که به طور معمول در آیین‌نامه‌ها در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که افزایش نسبت مذکور در خاکهای نرم نسبت به سایر ساختگاهها بیشتر می‌باشد [۱۷-۱۸].

ب- نسبت طیف پاسخ قائم به افقی (S_V/S_H) به پریود سازه و فاصله سازه از صفحه گسلش بستگی دارد. برای پریودهای کوتاه نسبت طیف پاسخ قائم به افقی برای ساختگاههای نزدیک گسل از مقداری که معمولاً $\frac{2}{3}$ فرض می‌شود، تجاوز می‌کند، در حالی که برای پریودهای بلند، نسبت $\frac{2}{3}$ بسیار محافظه کارانه می‌باشد [۱۹].

جهت لغزش گسل اتفاق افتاده و مستقل از تغییرمکان دینامیکی ناشی از پالس جهت‌پذیری گسیختگی زمین می‌باشد. در نتیجه، این اثر مؤلفه‌هایی که در جهت لغزش گسل هستند را تحت تأثیر قرار خواهد داد (موازی لغزش گسل در زلزله‌های امتدادلغز و در جهت شیب در زلزله‌های شیب‌لغز). برای زلزله‌های شیب‌لغز، اثر تغییرمکان ماندگار و اثر جهت‌پذیری در یک جهت صورت می‌گیرد و تغییرمکان ماندگار زمین تقریباً همزمان با تغییرمکان دینامیکی حداکثر رخ می‌دهد، که نیاز است به عنوان بارهای منطبق بر هم در نظر گرفته شود. این تلاقی بارها در یک زمان، پتانسیل آسیب بسیار گسترده‌ای را دارا می‌باشد [۵]. به طور نمونه، تغییرمکان ماندگاری در حدود ۲ متر در ایستگاه یاریمکا طی زلزله کجایی به وجود آمد، شکل (۴).



شکل (۴): مؤلفه شرقی-غربی نگاشت یاریمکا در زلزله کجایی [۱۳].

۲-۳- اثر فرا دیواره

اثر فرادیواره در یک زلزله شیب‌لغز می‌تواند به وجود آید. همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، یکی از دلایل ابتدایی به وجود آمدن این اثر می‌تواند نزدیکی بیشتر ساختگاههای قرار گرفته در قسمت فرادیواره به سطح گسل از ساختگاههای قرار گرفته در قسمت فرودیواره^۵ در یک فاصله یکسان از گسل باشد $(R_2 \leq R_1)$ [۴].

اثر فرادیواره می‌تواند ویژگیها و مسائل ذیل را در زلزله‌های حوزه نزدیک به همراه داشته باشد:

الف- دامنه بیشتر و کاهندگی کمتر در پارامترهای جنبش

۳- اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی سازه‌های مختلف و ابنیه‌های خاکی

مطالعات بسیاری جهت ارزیابی رفتار سازه‌های مختلف در زلزله‌های حوزه نزدیک انجام گرفته است که اغلب نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که آیین‌نامه‌های کنونی که بر مبنای زلزله‌های حوزه دور معمولی توسعه داده شده‌اند در بسیاری موارد نیاز به تدقیق دارند. در ادامه، رفتار سازه‌های مختلف در معرض این‌گونه زلزله‌ها بررسی می‌گردد.

۳-۱- رفتار سازه‌های یکدرجه آزاد و قابهای ساختمانی

بعد از زلزله سال ۱۹۷۱ سان‌فرانسیسکو، رفتار ساختمان مرکز پزشکی الیویو در برابر پالس بزرگ حرکت در نزدیکی چشمه لرزه‌ای توسط تعدادی از محققین مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این ساختمان به سبب یک پالس شدید متحمل آسیب گسترده‌ای گردیده است که آنها این پالس شدید را به عنوان یکی از ویژگیهای زلزله‌های حوزه نزدیک شناسایی کردند [۳].

هال و همکاران [۲۰] تئوری انتشار موج را برای مطالعه پاسخ یک ساختمان برشی یکپارچه به کار بردند. آنها عقیده داشتند که پتانسیل خرابی زلزله‌های حوزه نزدیک بستگی به این موضوع دارد که چه مقدار تغییرمکان در زمین به علت پالس‌های سرعت ایجاد خواهد شد. ایوان [۲۱] از ساختمان برشی الاستیک مشابهی برای به دست آوردن "طیف تغییرمکان نسبی"^۶، به عنوان معیار اندازه‌گیری نیاز لرزه‌ای سازه‌های چند درجه آزاد در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک پالس مانند، استفاده نمود. او نشان داد که حتی برای سازه‌های الاستیک، اثرات حوزه نزدیک نمی‌تواند با ضرب کردن ضریب برش پایه آیین‌نامه‌ای در یک ضریبی به عنوان فاکتور اثر حوزه نزدیک، محاسبه گردد.

مطالعات متعددی با هدف کاهش اثر مسأله نزدیک گسل با اصلاح عملکرد سازه‌های در معرض زلزله‌های حوزه نزدیک، انجام گرفته است. هال و همکاران [۲۰] و ماکریس و چانگ [۲۲]، کارایی جداگرهای لرزه‌ای با مکانیزم‌های مختلف اتلاف انرژی را برای نگهداری و حفاظت سازه‌ها در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک مطالعه کردند. هر چند، نتایج

جالب توجهی به دست آمد ولی نیازهای تغییرشکلی بزرگ تحمیل شده با پالس‌های شدید زلزله‌های حوزه نزدیک دشواریهای بسیاری را ایجاد می‌نمود. اندرسون و برترو [۲۳] عملکرد چندین قاب فولادی و بتنی بلند را که با سیستم‌های مهاربندی و یا دیوارهای برشی مقاوم شده بودند را ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند هنگامی که سازه‌های پرپوند بلند در معرض زلزله‌های پالس‌مانند شدید قرار می‌گیرند، روشهای مقاوم‌سازی مرسوم مانند افزایش سختی و یا مقاومت سیستم با اضافه کردن دیوارهای برشی، مؤثر نمی‌باشد. علت آن است که افزایش سختی پیوند سیستم را کاهش داده و آن را به داخل ناحیه شتابهای طیفی بالاتری جابه‌جا می‌کند.

در مجموع، مهمترین زلزله‌های حوزه نزدیک اثرات زیر را بر روی رفتار سازه‌ها دارند:

الف- زلزله‌های حوزه نزدیک دارای نسبت بزرگتر v_{PG}/a_{PG} نسبت به زلزله‌های حوزه دور می‌باشد که باعث پهن‌تر شدن ناحیه حساس به شتاب طیف پاسخ می‌شود و باعث افزایش سختی ظاهری در اکثر سازه‌ها و افزایش برش پایه در سازه‌های با پیوند کوتاه می‌گردد [۲۴].

ب- دامنه بزرگ در پیوندهای بلند طیف پاسخ تغییر-مکان، باعث بزرگ شدن پاسخ تغییرمکان در سازه‌های با پیوند بلند می‌شود [۳] و [۲۵].

پ- برای سازه‌های چند درجه آزاد، هنگامی که پیوند سازه بسیار بزرگتر از پیوند غالب پالس‌های سرعت باشد، استفاده از فرکانس اصلی سازه به تنهایی برای تعیین پاسخ سازه کفایت نمی‌کند [۲۶-۲۷].

ت- نیازهای پاسخ غیرخطی زلزله‌های حوزه نزدیک از زلزله‌های حوزه دور بزرگتر می‌باشد. در بعضی موارد، استفاده از روشهایی نظیر جذر مجموع مربعات (SRSS) و مجموع قدر مطلق مقادیر (SAV) برای پیش‌بینی پاسخ غیرخطی سازه‌ها ممکن است باعث نتایج غیرمحافظه‌کارانه شود [۲۸]. بنابراین، تنها، اصلاح طیف پاسخ طراحی در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها برای در نظر گرفتن اثرات زلزله‌های

در زلزله حوزه نزدیک، به طور قابل ملاحظه کوچکتر می باشد. شکل (۶-الف) نشان می دهد که زلزله های حوزه نزدیک، نیازهای مقاومتی بزرگتری به سازه تحمیل می نمایند. دلیل آن اختلاف در T_c در دو نوع زلزله است. با رسم این ضریب در برابر T_c در دو نوع زلزله تقریباً از بین می رود، شکل (۶-ب).

ج- در سازه های دارای سیستم های اتلاف انرژی، کارایی میرایی اضافی به واسطه نسبت بزرگ v_{PG}/a_{PG} کاهش می یابد [۲۴، ۳۰].

۳-۲- رفتار پلها در زلزله های حوزه نزدیک

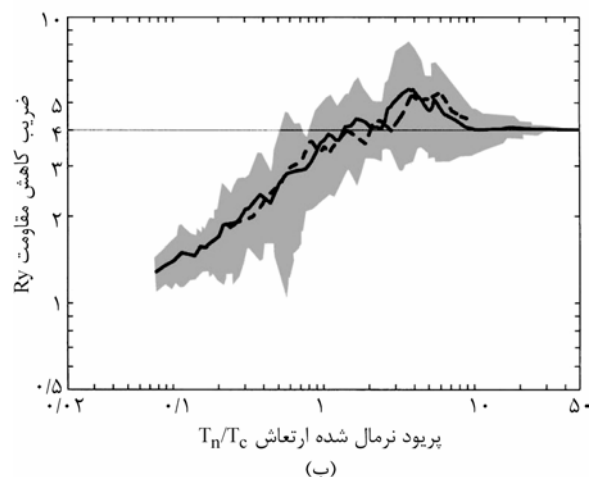
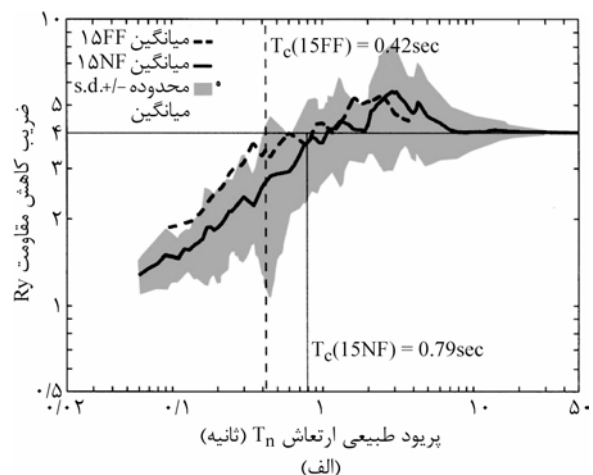
به طور کلی تغییر مکان ماندگار زمین در زلزله های حوزه نزدیک به جهت حرکت نسبی دو لبه گسل روی می دهد. این تغییر مکانها در عرض یک گسل دارای سطح گسیختگی، ناپیوسته بوده و می تواند پله های واقع در عرض گسل را در معرض تغییر شکل های ناهمگون و بزرگ قرار دهد. همچنین، تغییر مکان ماندگار همزمان با جنبش شدید دینامیکی روی می دهد که در این حالت می بایست تغییر مکان ماندگار و تغییر مکان دینامیکی به صورت بارگذاری ترکیبی در نظر گرفته شود [۵].

فان و همکاران [۳۱] عملکرد ستونهای بتن مسلح یک پل را به صورت آزمایشگاهی در برابر زلزله های حوزه نزدیک ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند پالس های دامنه بلند سرعت ناشی از پدیده جهت پذیری، سبب رفتار شلاقی در این ستونها شده و باعث ایجاد تغییر مکان پسماند قابل ملاحظه ای می گردد. در شکل (۷)، تغییر مکان نسبی پسماند در برابر PGA وارده در سه ستون مورد آزمایش $NF-1$ ، $NF-2$ و $9F1$ نشان داده شده است. دو ستون اول تحت نگاهت حوزه نزدیک و ستون سوم تحت زلزله حوزه دور قرار گرفته است. تغییر مکان نسبی پسماند در اثر نگاهت حوزه نزدیک در دو ستون اول به ترتیب در حدود ۷ و ۵ برابر ستون سوم می باشد.

همچنین لیو و همکاران [۳۲] عملکرد تیرهای سرتاسری چندین پل با جداگرهای لرزه ای و بدون جداگر لرزه ای و دارای پیروید کوتاه و متوسط را در برابر نگاهتهای مختلف

حوزه نزدیک کافی نمی باشد، زیرا آنها قادر به در نظر گرفتن افزایش پاسخ غیرالاستیک نمی باشند.

ث- در سازه های با شکل پذیری یکسان، زلزله های حوزه نزدیک نسبت به زلزله های حوزه دور ضریب کاهش مقاومت کوچکتری در ناحیه حساس به شتاب دارند. هرچند، شکل طیف ضریب کاهش مقاومت برای هر دو نوع زلزله در نواحی طیفی متناظر، شبیه یکدیگر می باشد. این موضوع ناشی از تفاوت موجود در T_c (پیرویدی که ناحیه حساس به شتاب را از ناحیه حساس به سرعت جدا می کند) در زلزله های حوزه نزدیک نسبت به زلزله های حوزه دور می باشد [۱۰، ۲۹]. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود، ضریب کاهش مقاومت در پیرودهای کوچکتر از T_c

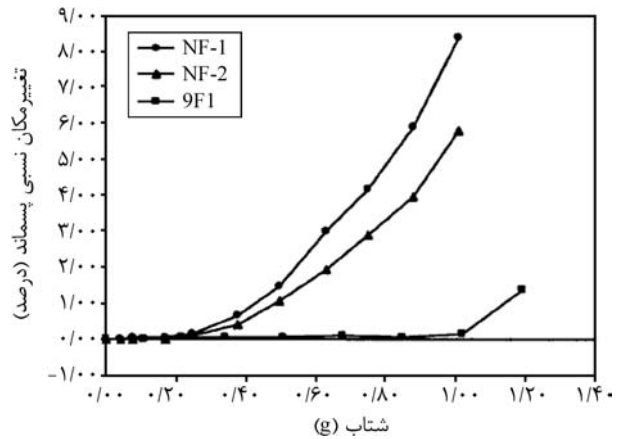


شکل (۶): تغییرات ضریب کاهش مقاومت در برابر (الف) T_n و (ب) T_n/T_c برای میانگین ۱۵ زلزله حوزه نزدیک و میانگین ۱۵ زلزله حوزه دور [۱۰].

نمونه زلزله تاتوری غربی در سال ۲۰۰۰ در ژاپن که در نزدیکی سد بتنی کشور داد، باعث ایجاد تغییرمکان ماندگار ۲۸ سانتیمتر در جهت شمالی، ۷ سانتیمتر در جهت غربی و ۵ سانتیمتر در جهت قائم گردید. همچنین ثبت شتابی در حدود ۲۰ متر بر مجذور ثانیه در بالای سد قابل ملاحظه بود [۳۳]. مطالعات انجام شده توسط اهمچی و جلیلی [۳۴] بر روی سدهای قوسی بتنی نیز نشان می‌دهد که به دلیل جهت‌پذیری، تغییرات تنش در قوس و پایه سد بسیار زیاد می‌باشد. محدوده تغییرات بزرگ در قوس بالغ بر ۳ و حتی ۴ برابر در سطح بالادست و در نزدیکی تاج به وجود می‌آید، در صورتی که در پایه با تغییرات مشابه قوس، حداکثر مقدار در پایین دست و در پایین‌ترین بخش ایجاد می‌گردد.

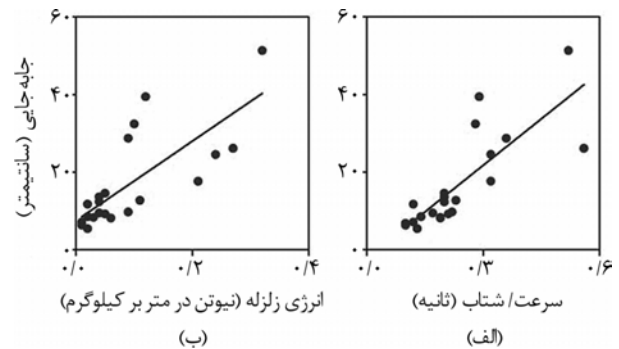
۳-۴- اثر ساختگاه در مشخصات پالس‌های جهت‌پذیری زلزله‌های حوزه نزدیک

به طور کلی، ویژگی‌های جنبش‌های ثبت شده در خاک تابعی از ویژگی‌های مقطع خاک (مشخصات دینامیکی خاک، وضعیت هندسی لایه‌ها و عمق سنگ بستر) و محرک ورودی (شدت و پریود پالس) می‌باشد. دامنه پالس در خاک به غیر از پالس‌های ورودی با شدت‌های بالا و پریود کوتاه، بلندتر از دامنه پالس در سنگ می‌باشد. پریود پالس نیز در خاک بزرگتر و یا حداقل برابر با پریود پالس ورودی می‌شود. همچنین، سختی خاک دامنه و پریود پالس ورودی را تغییر می‌دهد. به طور مثال، نگاشتهای ثبت شده در فواصل ۱۱ و ۱۲ کیلومتری (ساختگاه سنگی) و ۱۳ و ۱۶ کیلومتری (ساختگاه خاکی) از صفحه گسلش در ناحیه گیلروی در زلزله لوماپریتا نشان می‌دهد که در فواصل نسبتاً یکسانی از صفحه گسلش، ویژگی‌های ساختگاه هم دامنه و هم پریود پالس موجود در نگاشت را به ترتیب تا حدود ۶۰ و ۲۵ درصد تغییر داده است، شکل (۹). همچنین تحلیل‌های پاسخ ساختگاه در ساختگاه خاک نرم نشان می‌دهد که مقاومت خاک نرم حداکثر پاسخ ساختگاه را کنترل می‌کند [۳۵].



شکل (۷): تغییرمکان نسبی پسماند در برابر PGA [۳۱].

حوزه نزدیک و دور مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه‌گیری نمودند که پاسخ پل در همه حالات در برابر زلزله‌های حوزه نزدیک بحرانی‌تر است و به طور کل مقدار کاهش پاسخ در حالت استفاده از جداگرهای لرزه‌ای، در اثر نگاشتهای حوزه نزدیک نسبت به نگاشتهای حوزه دور کمتر است. همچنین آنها حساسیت پاسخ در برابر نسبت PGV/PGA و مقدار انرژی زمین‌لرزه را بررسی کردند که مشخص گردید با افزایش این نسبت و نیز انرژی زلزله پاسخ نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۸)، حداکثر تغییرمکان طولی تیر در پل دارای جداگر لرزه‌ای با پریود کوتاه در برابر نسبت PGV/PGA و انرژی نگاشت حوزه نزدیک رسم شده است.



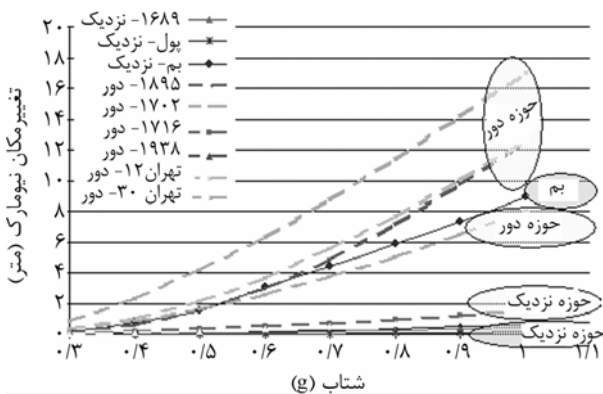
شکل (۸): تغییرمکان طولی تیر پل دارای جداگر لرزه‌ای در برابر نسبت PGV/PGA و انرژی زلزله [۳۲].

۳-۳- رفتار سدهای بتنی در زلزله‌های حوزه نزدیک

گسیختگی سطحی گسله‌های نهفته در ساختگاه سدها، نه تنها باعث بروز تغییرمکانهای دینامیکی می‌شود، بلکه باعث ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار نیز می‌گردد. به طور

نگاشت‌های حوزه دور بیشتر از نگاشت‌های حوزه نزدیک می‌باشد و با افزایش تراز آب در مخزن، تغییر مکان نیومارک نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌نماید. با توجه به طیف نگاشت‌های ورودی و اندازه‌های جابه‌جایی ماندگار به دست آمده از روش نیومارک چنین نتیجه‌گیری شده است که عامل تعیین‌کننده در اندازه جابه‌جایی، محتوای فرکانسی زمین‌لرزه در محل برخورد موج زمین‌لرزه با توده لغزنده است [۳۶-۳۷].

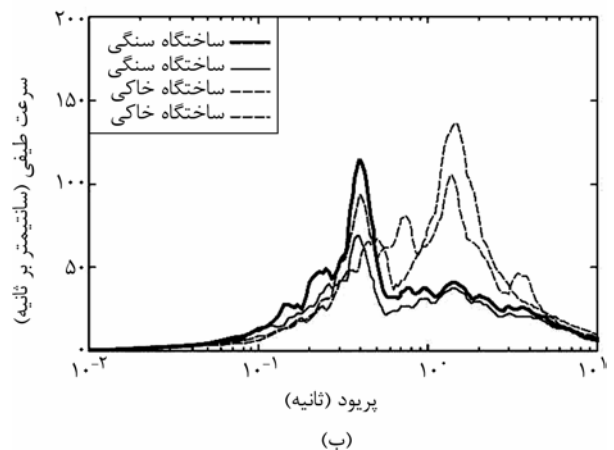
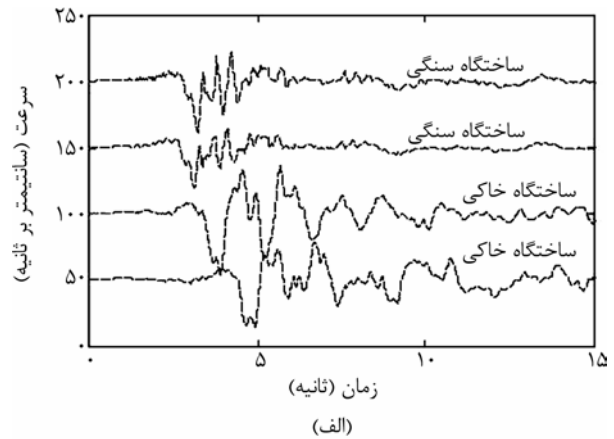
در شکل (۱۰)، مقدار تغییر مکان نیومارک توده مستعد لغزش سد شفارود در برابر شتاب ترسیم شده است که نشان می‌دهد در زلزله‌های حوزه دور مقدار پاسخ بسیار بزرگتر می‌باشد.



شکل (۱۰): تغییر مکان نیومارک توده مستعد لغزش سد شفارود در برابر PGA [۳۶].

۳-۶- رفتار سدهای خاکی در زلزله‌های حوزه نزدیک

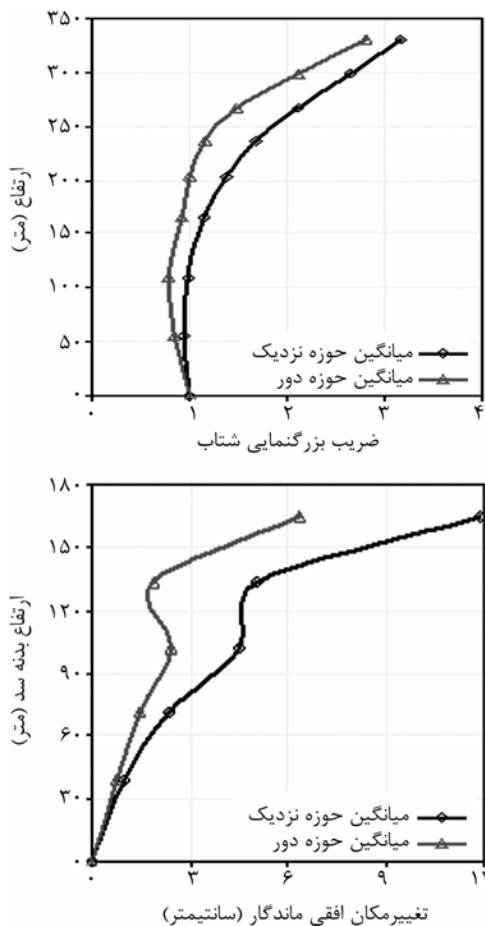
یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی پایداری سدها، شرایط بارگذاریهای مختلف می‌باشد. زلزله‌های دارای مشخصات متفاوت اثرات متفاوتی بر روی پایداری سدها دارند. با درک این مطلب می‌توان گفت زلزله‌های حوزه نزدیک اثرات متفاوتی در رفتار سدهای خاکی دارند، ولی مطالعات انجام شده در این رابطه بسیار اندک می‌باشد. در این زمینه می‌توان به مطالعاتی اشاره نمود که بر روی دو نوع سد خاکی همگن فرضی انجام شده است. در این مطالعه، شاه‌نظری و همکاران به بررسی رفتار سدهای مذکور با بدنه رسی با شاخص خمیری پایین و ماسه‌ای و با ارتفاعهای مختلف، در برابر اعمال تعداد محدودی نگاشت حوزه دور و نزدیک پرداخته و نتیجه‌گیری



شکل (۹): الف) تاریخچه زمانی سرعت و ب) طیف پاسخ شبه سرعت مؤلفه عمود بر گسل نگاشت شده در منطقه گیلروی، فاصله از صفحه گسلش به ترتیب از بالا به پایین ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۶ کیلومتر می‌باشد [۳۵].

۳-۵- بررسی رفتار سطوح مستعد لغزش در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

در زمینه مطالعه رفتار دامنه‌های طبیعی مستعد لغزش در زمین‌لرزه‌های نزدیک و دور از گسل می‌توان به بررسی رفتار دینامیکی توده مستعد لغزش مخزن سد شفارود در اثر نگاشت‌های مختلف حوزه نزدیک و دور اشاره نمود که در حالت اعمال شتاب‌نگاشت‌های با PGA مختلف و با تراز متفاوت آب مخزن انجام شده است. این تحقیق در واقع شروع پروژه‌ای در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بوده است که با هدف بررسی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ای ابنیه‌های ژئوتکنیکی در سال ۱۳۸۴ در دستور کار قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که به طور کلی در حالت همپایه نمودن نگاشت‌های زلزله به PGA ، تغییر مکان نیومارک توده مستعد لغزش در اثر



شکل (۱۱): بزرگنمایی شتاب در ارتفاع و نیز تغییر مکان افقی ماندگار در ارتفاع سد مارون در اثر میانگین نداشت‌های حوزه نزدیک و میانگین نداشت‌های حوزه دور [۳۹].

در شکل (۱۲)، تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد به همراه تغییر مکان نسبی افقی و قائم برای یک نداشت حوزه نزدیک و یک نداشت حوزه دور آمده است. نکته پراهمیت در این شکل این است که تغییر مکان به وجود آمده در اثر نداشت حوزه نزدیک در زمان پالس جهت‌پذیری و در بازه زمانی بسیار کوتاهی روی داده است که بیشتر انرژی زلزله هم در این پالس می‌باشد و ورودی یکباره آن به سد باعث ایجاد تغییر شکل‌های بسیار بزرگتری شده است. انرژی در نداشت‌های حوزه دور در زمان دوام زلزله توزیع شده است و تغییر مکان ناشی از آن نیز در زمان دوام نداشت توزیع شده و مقدار آن نیز بسیار کمتر می‌باشد.

از دلایل دیگری که باعث بزرگتر شدن پاسخ در سد مارون در اثر نداشت‌های حوزه نزدیک می‌شود، نسبت بالای PGV/PGA در این گونه نداشت‌ها می‌باشد. در واقع هر چه این نسبت بزرگتر باشد، نداشت زلزله شباهت بیشتری به پالس خواهد داشت.

شده است که به طور کلی قدر مطلق حداکثر شتاب تاج سد در هر دو نوع سد با افزایش ارتفاع سدها در نداشت‌های حوزه نزدیک بزرگتر می‌باشند [۳۸]. در مطالعه فوق ملاک ارزیابی پاسخ، تنها شتاب تاج سد بوده است و علت تغییر در شتاب تاج سد نیز مشخص نشده است که به کدام یک از ویژگی‌های نداشت‌های حوزه نزدیک ارتباط پیدا می‌کند.

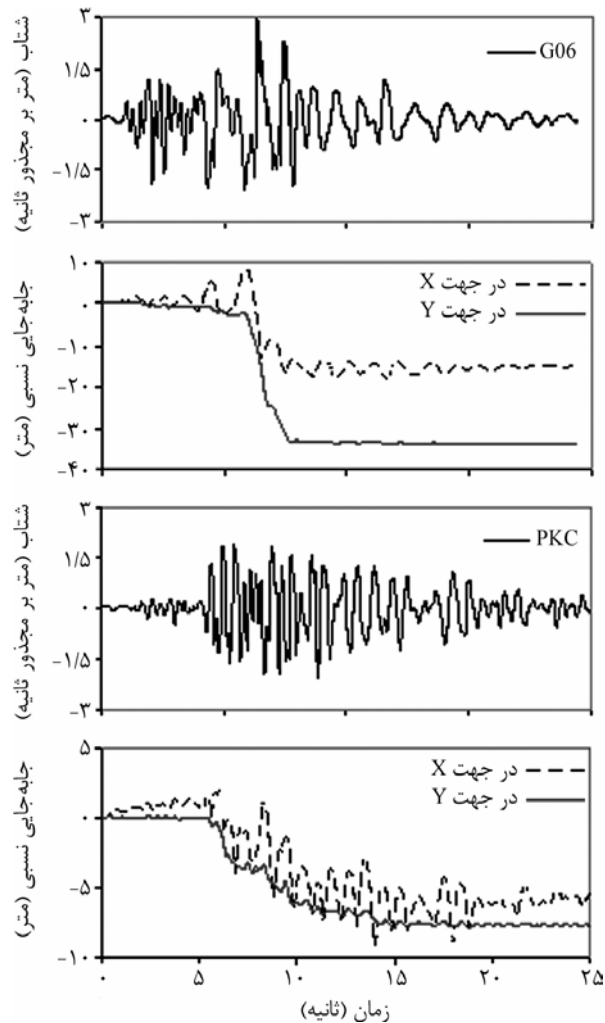
همچنین در مطالعه‌ای که در قالب پایان‌نامه و در ادامه مطالعات تعریف شده توسط فیضی [۳۹] در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله صورت گرفته است، رفتار سد خاکی مارون با ارتفاع ۱۶۵ متر در برابر دوازده نداشت حوزه نزدیک و دوازده نداشت حوزه دور مختلف ارزیابی شده و برای ارزیابی رفتار سد در حالت ایجاد رفتار پلاستیک، آنالیزهایی با اعمال محرکه‌هایی با شدت بالاتر انجام گردیده است. همچنین برای ارزیابی دقیقتر رفتار سد در برابر خصوصیات مختلف نداشت‌های حوزه نزدیک، آنالیزهای مختلفی با اعمال شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی ساده انجام گرفته است. جهت همپایه نمودن شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی سد، سه روش همپایه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت یک روش برای انجام تحلیل‌های حجیم استفاده گردید. به طور کلی، نتایج حاصله نشان می‌دهد که پاسخ سد از جمله: بزرگنمایی شتاب در ارتفاع سد، تغییر مکان افقی ماندگار و نشست تاج سد در زلزله‌های حوزه نزدیک بحرانی‌تر می‌باشد. در واقع، ویژگی‌های مختلف زلزله‌های حوزه نزدیک باعث بزرگتر شدن پاسخ در این گونه زلزله‌ها می‌گردد. پالس‌های پرپود بلند جهت‌پذیری یکی از این ویژگی‌هاست که نزدیک بودن پرپود آنها به پرپود طبیعی سد باعث بروز حالت تشدید می‌شود. همچنین طیف پاسخ نداشت‌های حوزه نزدیک در محدوده پرپودهای بلند دارای دامنه بلندتری می‌باشند و با توجه به این که پرپود طبیعی سد نیز بلند است، به این دلیل نیز پاسخ سد می‌تواند بزرگتر شود.

برای مثال، نمونه‌ای از نتایج در شکل (۱۱) مانند بزرگنمایی شتاب در ارتفاع و تغییر مکان افقی ماندگار در ارتفاع سد برای میانگین دوازده نداشت حوزه نزدیک و میانگین دوازده نداشت حوزه دور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، پاسخ در اثر نداشت‌های حوزه نزدیک بسیار بزرگتر می‌باشد.

در سدهای خاکی نیز که به صورت موردی سد خاکی مارون مورد ارزیابی قرار گرفت، مشاهده گردید که بزرگنمایی شتاب و تغییرمکان ماندگار افقی در ارتفاع و نشست تاج سد در اثر نگاشت حوزه نزدیک نسبت به نگاشت حوزه دور بزرگتر می‌باشد که دلیل آن می‌تواند مربوط به خصوصیات پالسی این نگاشتها باشد. در واقع، نگاشتهای حوزه نزدیک به دلیل اثرات جهت‌پذیری دارای پالس‌هایی با پیوند بلند می‌باشند که نزدیک بودن پیوند طبیعی سد به پیوند پالس غالب و همین‌طور وجود حداکثر دامنه شتاب و سرعت در لحظه پالس غالب نگاشت از عوامل بزرگتر شدن پاسخ سازه می‌باشد. همچنین در زلزله‌های حوزه نزدیک تجمع انرژی در یک پالس و در بازه زمانی کوتاه و ورود یکباره به سد باعث می‌گردد بدنه سد در لحظه پالس دچار تغییرشکل‌های بزرگ و ماندگارتر شود. در نهایت ملاحظه گردید که نسبت PGV/PGA می‌تواند یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی و مقایسه رفتار سدهای خاکی در زلزله‌های حوزه نزدیک و دور باشد.

۵- مراجع

- Hudson, D.E. and Housner, G.W. (1958). An analysis of strong motion accelerometer data from the San Francisco earthquake of March 22, 1957, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **48**, 253-268.
- Bolt, B.A. (1971). The San Fernando valley earthquake of February 9, 1971-data on seismic hazards, *Bull Seism Soc Amer*, **61**(2), 501-510.
- Bertero, V.V., Mahin, S.A., and Herrera, R.A. (1978). Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **6**(1), 31-42.
- Li, Sh. and Xie, L-L. (2007). Progress and trend on near-field problems in civil engineering, *CTA Seismologica Sinica*, **20**(1) (105~114).
- Stewart, J.P., Chiou, Sh.-J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., and Abrahamson, N.A. (2001). Ground motion evaluation procedures for performance-based design PEER, Center College of Engineering University of California,



شکل (۱۲): تاریخچه زمانی شتاب در تاج سد مارون به همراه تغییرمکان نسبی افقی و قائم در اثر نگاشت حوزه نزدیک G06 زلزله مورگن هیل و نگاشت حوزه دور PKC زلزله ویتیر ناروز [۳۹].

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به صورت اجمالی در رابطه با اثرات و ویژگیهای مختلف زلزله‌های حوزه نزدیک بحث شد و سپس، بر اثر این ویژگیها بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها پرداخته شد. در مجموع به جهت این ویژگیها علی‌الخصوص پالس‌های پیوند بلند سرعت و نیز تجمع انرژی در بازه زمانی کوتاه، سازه‌های مختلف در معرض تغییرشکل‌های بزرگتری قرار می‌گیرد. همچنین نشان داده شد که حتی برای سازه‌های با رفتار الاستیک، اثرات حوزه نزدیک نمی‌تواند با ضرب کردن ضریب برش پایه آیین‌نامه‌ای در یک ضریبی به عنوان فاکتور اثر حوزه نزدیک، محاسبه گردد.

- earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**(1B), 93-99.
15. Somerville, P.G. (2000). Seismic hazard evaluation, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, Paper No. 2833.
 16. Yu, Y.-X. and Gao, M.-T. (2001). Effect of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the Chi-Chi earthquake Taiwan, *Acta Seismologica Sinica*, **14**(6), 654-659, (in Chinese).
 17. Wang, G.Q., Zhou, X.Y., Zhang, P.Z., et al (2002). Characteristics of amplitude and duration for near fault strong ground motion from the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(1), 73-96.
 18. Ni, Y.-J. and Zhu, X. (2004). Analysis of acceleration peak ratios and response spectra for near-fault earthquakes, *Journal of Northern Jiaotong University*, **28**(4), 1-5 (in Chinese).
 19. Bozorgnia, Y., Niazi, M., and Campbell, K.W. (1995). Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake, *Earthquake Spectra*, **11**(4), 515-525.
 20. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., et al. (1995). Near-source ground motion and its effects on flexible buildings, *Earthquake Spectra*, **11**(4), 569-604.
 21. Iwan, W.D. (1997). Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions, *Journal of Structural Engineering*, **123**(4), 397-404.
 22. Makris, N. and Chang, S.P. (2000). Effect of viscoplastic and friction damping on the response on seismic isolated structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(1), 85-107.
 23. Anderson, J. and Bertero, R. (1999). Performance improvement of long period building structures subjected to severe pulse-type ground motions, PEER Center, University of California, Berkeley, Report No. 1999/09.
 - Berkeley.
 6. Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., and Abrahamson, N.A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismological Research Letters*, **68**, 199-222.
 7. Bray, J.D. and Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(11), 815-828.
 8. Li, Sh. (2005). Effect of near-fault pulse-like ground motions on RC frame structures, MSc. Dissertation, Harbin, Harbin Institute of Technology, 31-33 (in Chinese).
 9. Li, X.L. and Zhu, X. (2004). Study on near-fault design spectra of seismic design code, Liu W.Q., Yuan F.G., Chang P.C., *3rd International Conf. on Earthquake Engineering*, New Frontier and Research Transformation, Beijing: Intellectual Property Publishing House, 147-152.
 10. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C. (2001). Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(12), 1769-1789.
 11. Archuleta, R.J. and Hartzell, S.H. (1981). Effects of fault finiteness on near-source ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **71**(4), 939-957.
 12. Somerville, P.G. and Graves, R. (1993). Conditions that give rise to unusually large long period ground motions, *The Structural Design of Tall Buildings*, **2**, 211-232.
 13. Kalkan, E., Adalier, K., and Pamuk, A. (2004). Near source effects and engineering implications of recent earthquake in Turkey, *Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, NY.
 14. Abrahamson, N.A. and Somerville, P.G. (1996). Effects of the hanging wall and foot wall on ground motions recorded during the Northridge

34. Ohmachi, T. and Jalali, A. (1999). Fundamental study on near-field effects on earthquake response of arch dams, *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, **1**(1), 1-11.
35. Rodriguez-Marek, A. and Bray, J.D. (2006). Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1611-1620.
۳۶. اکبری، عباس (۱۳۸۵). *ارزیابی تأثیر جنبش نیرومند زمین در میدان نزدیک زمین‌لرزه‌ها در ناپایداری دامنه‌های دریاچه سدهای خاکی*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.
۳۷. جوادی، رضا (۱۳۸۷). *مطالعه رفتار دینامیکی سطوح مستعد لغزش مخزن سد در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.
۳۸. شاه‌نظری، حبیب، بازاریار، محمدحسن، و نگهدار، حسن (۱۳۸۷). *بررسی رفتار سدهای خاکی همگن رسی و ماسه‌ای با پیوندهای مختلف در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران*.
۳۹. فیضی، رضا (۱۳۸۸). *مقایسه رفتار لرزه‌ای سدهای خاکی در زلزله‌های حوزه نزدیک و حوزه دور (مطالعه موردی سد خاکی مارون)*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
24. Malhotra, P.K. (1999). Response of buildings to near-field pulse-like ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**(11), 1309-1326.
25. Anderson, J.C. and Bertero, V.V. (1987). Uncertainties in establishing design earthquakes, *Journal of Structural Engineering*, **113**(8), 1709-1724.
26. Huang, C.T. (2003). Considerations of multi-mode structural response for near-field earthquakes, *Journal of Engineering Mechanics*, **129**(4), 458-467.
27. Roberts, M.W. and Lutes, L.D. (2003). Potential for structural failure in the seismic near-field, *Journal of Engineering Mechanics*, **29**(8), 927-934.
28. Huang, J.-W. and Zhu, X. (2003). Inelastic response analysis for the SDOF structures under near-fault earthquakes, *China Safety Science Journal*, **13**(11), 59-65 (in Chinese).
29. Mavroeidis, G.P. (2004). Modeling and simulation of near-fault strong ground motions for earthquake engineering applications, Ph.D Dissertation, New York, State University of New York at Buffalo, 44-46.
30. Makris, N. and Chang, S.P. (1998). Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures, California, PEER Center, University of California, Berkeley, Report No. 98-06, 56-57.
31. Phan, V., Saiidi, M.S., Anderson, J., and Ghasemi, H. (2007). Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 982-989.
32. Liao, W.I., Loh, C.H., and Lee, B.H. (2004). Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions, *Engineering Structures*, **26**, 2173-2183.
33. Ohmachi, T., Kojima, N., Murakami, A., and Komaba, N. (2003). Near-field effects of hidden seismic faulting on a concrete dam, *Journal of Natural Disaster Science*, **25**(1), 7-15.

۶- پانویس

۱- Directivity Effect

۲- Specific Energy Density

۳- Fling-Step Effect

۴- Hanging wall

۵- Footwall

۶- Drift Spectrum

