

آیا قسمتهای پالس گونه جدا شده از شتابنگاشت نزدیک گسل قادر به تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها خواهند بود؟

سالار آرین مقدم

دانشجوی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
s.arianmoghaddam@iiees.ac.ir

غلامرضا قدرتی امیری

مرکز پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
ghodrati@iust.ac.ir

کلید واژه‌ها: نزدیک گسل، پالس‌گونگی، پاسخ لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی فزاینده.

چکیده

زلزله‌های نزدیک گسل، به ویژه، در دو دهه‌ی اخیر، از موضوعات مورد توجه مهندسين سازه و زلزله بوده‌اند. شناسایی ماهیت ویرانگر آنها و پاسخ سازه‌های مهندسی تحت این تحریکات لرزه‌ای موضوع تحقیقات متعددی را در ادبیات فنی مهندسی زلزله تشکیل می‌دهد. در این مقاله، به معرفی روشی جدید برای پردازش و مطالعه‌ی رکوردهای پالس‌گونه ثبت شده در حوزه‌ی نزدیک مبتنی بر تحلیل حوزه زمان-فرکانس با کاربرد تبدیل S پرداخته شده است. برای این منظور، ۷ شتابنگاشت پالس‌گونه به صورتی انتخاب شده‌اند که ضمن پوشش حداکثری ویژگیهای حوزه نزدیک، امکان مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های قبلی فراهم گردد. پس از جداسازی بخش پالس‌گونه، سازه‌های قاب خمشی فولادی به صورت دو بعدی و در دو ارتفاع ۳ و ۱۲ طبقه مدل‌سازی شده و تاثیر پالس‌های جدا شده در تخمین منحنی ظرفیت دینامیکی سازه، با استفاده از تحلیل دینامیکی فزاینده ارزیابی شده است. همچنین، مشاهدات حاصل از ارزیابی قابهای دو بعدی با نتایج تحلیل یک سازه بتنی ۹ طبقه به صورت سه بعدی مورد مقایسه واقع شده است.

نتایج مطالعه ضمن قابل‌پذیرش دانستن گزاره‌های مطرح شده درباره‌ی رکوردهای نزدیک گسل در ادبیات فنی برای مجموعه رکوردهای مورد بررسی، امکان معرفی پالس با فرکانس کم به عنوان نماینده شتابنگاشت پالس‌گونه در تخمین پاسخ دینامیکی سازه را، به خصوص، در صورت لحاظ کردن رفتار غیر خطی سازه مورد تردید قرار می‌دهد.

مقدمه

وقوع زلزله‌های نورث‌ریج ۱۹۹۴ و کوبه ۱۹۹۵ را می‌توان سرآغاز تلاشها برای تغییر در آیین‌نامه‌ها و الزامات طراحی سازه‌ها برای لحاظ نمودن ویژگیهای زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک دانست. تلاشهایی که با وقوع زلزله‌های پر آسیب چی چی و ایزمیت، سرعت بیشتری گرفته و طیف گسترده‌ای از محققان مهندسی زلزله و سازه تا لرزه‌شناسی مهندسی و مسائل مربوط به فیزیک زمین و انتشار امواج را به خود مشغول ساخته است (Mavroudis and Papageorgiou, 2003).

سامرویل^۱ مطالعات نسبتاً جامعی جهت کمی‌سازی ویژگی‌های زلزله‌های نزدیک گسل به انجام رسانده‌است. این ویژگی‌ها به اختصار به سه دسته تقسیم می‌گردند: وجود پالس‌های بزرگ در رکورد سرعت حرکت زمین (مربوط به پدیده جهت‌داری^۲)، مشاهده‌ی تغییر شکل‌های ماندگار در نواحی مجاور گسل‌ها (مربوط به پدیده‌ی لگدزدگی^۳) و محتوای فرکانسی غنی (Somerville, 1998).

¹ Somerville

² Directivity

³ Fling Step

در هنگام وقوع زلزله، چنانچه، سرعت انتشار گسلش به سوی یک ساختمان قابل مقایسه با سرعت موج برشی در خاک آن ساختمان باشد، مقدار قابل توجهی از انرژی به صورت تجمعی و در قالب یک مولفه‌ی پالس‌گونه در رکورد سرعت حرکت زمین ظاهر خواهد شد. بدیهی است، آزاد سازی این مقدار انرژی در مدت زمان اندک موجب تحمیل تقاضای لرزه‌ای بزرگی به سازه‌های مهندسی موجود خواهد شد. از سوی دیگر، تغییر-شکل‌های ماندگار نیز در نواحی نزدیک به گسلش، میزان تقاضای تغییر مکان را افزایش می‌دهند. البته، به دلیل این که محدوده‌ی اثر پدیده اخیر کم می‌باشد، در درجه‌ی دوم اهمیت قرار دارد.

در دو دهه‌ی اخیر، مطالعات گوناگونی در زمینه‌ی کمی‌سازی رفتار سازه‌های گوناگون تحت تحریکات پالس‌گونه‌ی نزدیک‌گسل به انجام رسیده است. بسیاری از محققان با پذیرش این که وجود پالس سرعت شاخص مناسبی برای تبیین ماهیت رکوردهای نزدیک‌گسل است، سعی در ارائه‌ی مدل‌هایی برای تقریب‌زدن این بخش پالس‌گونه از رکورد و به دنبال آن بررسی پارامترهای مربوط به پاسخ الاستیک و غیر الاستیک سازه‌ها به این رکورد ها داشته‌اند (Mavroidis and Papageorgiou, 2003).

در سال ۲۰۰۷، بیکر از تحلیل تبدیل موجک برای به دست آوردن پالس‌های سرعت و تشخیص رکوردهای پالس‌گونه در بانک داده‌های لرزه‌ای NGA، استفاده نمود (Baker, 2007). قهاری و همکاران از روش میانگین متحرک بر پایه‌ی تبدیل فوریه‌ی کوتاه برای تقسیم ۹۱ رکوردی که توسط بیکر، پالس دار شناخته شده بود، به دو مولفه‌ی "پالس‌گونه" با فرکانس کم و "زمینه" با فرکانس زیاد، استفاده نموده اند. (Ghahari et al., 2010).

اخیراً، روش بیکر پیشنهادی با استفاده از تبدیل S تعمیم داده شده است (Ghodrati and Arian Moghaddam, 2014). گرچه، استفاده از پالسهای ساده با فرم بسته ریاضی در تحقیقات ابتدایی برای کمی‌سازی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تحت تحریکات لرزه‌ای نزدیک‌گسل مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما، مطالعات جدیدتر، صحت این کاربرد را مورد تردید قرار داده‌اند. در ادامه و پس از معرفی روش جداسازی محتوای فرکانسی بر مبنای تبدیل S، به ارزیابی توانایی بخشهای پالس‌گونه جدا شده در نمایندگی شتابنگاشت برای تخمین پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سازه‌ها خواهیم پرداخت.

روش پیشنهادی

ابزار نوینی در زمینه‌ی تحلیل‌های زمان-فرکانس سیگنال‌ها توسط (Stockwell et al., 1996) معرفی و پیشنهاد شده است. این ابزار که به تبدیل S معروف گردیده‌است، به عنوان یک تبدیل فوریه‌ی کوتاه وابسته به فرکانس و یا یک تبدیل موجک اصلاح‌شده برای محاسبه‌ی فاز شناخته می‌شود. معادله‌ی زیر محاسبه‌ی این تبدیل را برای فرکانس f و با استفاده از پنجره‌ی گوسی g به مرکزیت τ در محور زمان، ارائه می‌کند:

$$ST(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

پنجره‌ی گوسی از رابطه‌ی زیر حاصل می‌گردد:

$$g(t, f) = \frac{f}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} \quad (2)$$

برای یک سیگنال گسسته، خروجی محاسبه‌ی تبدیل S به صورت یک ماتریس مختلط ST خواهد بود. برای فیلتر کردن بخش مورد نظر کافی است ماتریس فیلتر کننده‌ی M به گونه‌ای طراحی شود که درایه‌های متناظر با بخش‌های مورد نظر ما حاوی عدد ۱ و سایر درایه‌های آن ۰ باشد. البته، در نواحی مرزی برای رفع اثرات قطع ناگهانی، می‌توان از تغییر اعداد با شیبه‌ی ملایم (مثلاً کسینوسی) بین ۰ و ۱ استفاده کرد. حاصلضرب این دو ماتریس گام جداسازی را عملی می‌کند. با انجام تبدیل معکوس S بخش فیلتر شده، در حوزه زمان حاصل می‌گردد. با کم کردن این بخش از سیگنال اصلی، قسمت باقیمانده به دست می‌آید.

به طور خلاصه، گامهای روش پیشنهادی را به صورت زیر می‌توان برشمرد:

- با استفاده از تبدیل S، خروجی زمان-فرکانس برای شتابنگاشت را به دست می‌آوریم.
- ماتریس فیلتر کننده را با توجه به پنجره زمان-فرکانس انتخابی تنظیم می‌کنیم. در این مقاله، عرض پنجره زمان را برابر با مدت زمان ثبت حرکت زمین در نظر می‌گیریم و مرز جداکننده فرکانس زیاد و کم را به روش سعی و خطا تعیین خواهیم کرد، گرچه در برخی مراجع، فرکانسی در حدود ۱ هرتز به عنوان مرز بین فرکانس کم و زیاد معرفی شده است. در مراجع، از نسبت بحرانی پرپود طبیعی سازه به پرپود پالس (TN/TP) به عنوان شاخصی برای تحلیل میزان شدت پدیده‌ی نزدیک‌گسل یاد شده-

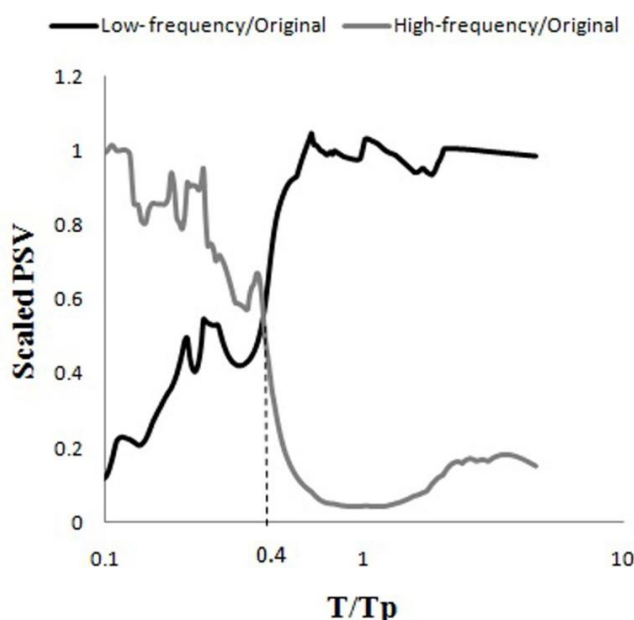


است. برای مقادیر بزرگتر از این نسبت بحرانی، رفتار سازه‌ها توسط پالس کنترل می‌گردد و برای مقادیر کمتر به وسیله‌ی مولفه‌ی با فرکانس زیاد (Ghahari et al., 2010).

- برای شتابنگاشت، پریود پالس TP، را تخمین می‌زنیم. در این مطالعه، از مقادیر پیشنهاد شده بر اساس روش تحلیل موجک بهره می‌گیریم (Baker 2007).
- یک مقدار اولیه برای نسبت بحرانی پریود طبیعی سازه به پریود پالس فرض می‌کنیم؛ با دانستن پریود پالس از گام قبل، عملاً، پریود طبیعی جداکننده رفتار TN را خواهیم داشت.
- مرز جداکننده فرکانس زیاد و کم را برابر با معکوس TN در نظر می‌گیریم:

$$(f_{cutoff})_{filtering} = f_N \quad (3)$$

- فرایند فیلتر کردن را انجام داده و پس از یافتن مولفه‌های پالس گونه و زمینه، با رسم نمودارهایی مانند شکل (۱)، مقدار جدیدی برای نسبت بحرانی پریود حاصل می‌شود.
- گامهای قبلی در قالب یک فرایند تکراری تا رسیدن به نقطه همگرایی با دقت مورد نظر ادامه می‌یابد.



شکل ۱: شبه سرعت طیفی مقیاس شده برای تعیین نسبت بحرانی پریود در شتابنگاشت بم.

مثالهای عددی

برای انجام روش پیشنهادی ۷ رکورد که توسط تحقیقات قبلی به عنوان رکوردهای پالس‌دار شناخته شده‌اند، برگزیده شده‌اند. ۵ رکورد از مجموعه‌ی ۹۱ رکورد پالس‌دار موجود در بانک داده‌های NGA با شاخص پالس‌گونگی نزدیک به ۱ انتخاب شده‌اند، تا امکان در برگیرنده عموم مشخصات رخدادهای نزدیک‌گسل باشند. همچنین، دو رکورد متعلق به داده‌های کشور عزیزمان ایران که ثبت شده در زلزله‌های طیس و بم هستند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جدول (۱) مشخصات رکوردهای مورد استفاده در این مقاله را ارائه می‌دهد. با انجام الگوریتم پیشنهادی بر روی رکوردهای ذکر شده در قسمت قبلی، نتایج نهایی پس از همگرا شدن روش تکراری در تعیین نسبت پریود بحرانی، در اشکال (۲) و (۳) برای ۲ رکورد از جدول ۱، ارائه گردیده‌است. با بررسی اجمالی این اشکال، واضح است که اثر رکورد زمینه با فرکانس زیاد در تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین قابل توجه‌تر است. همین امر برای مولفه‌ی پالس‌گونه در مورد تاریخچه زمانی سرعت صادق می‌باشد.

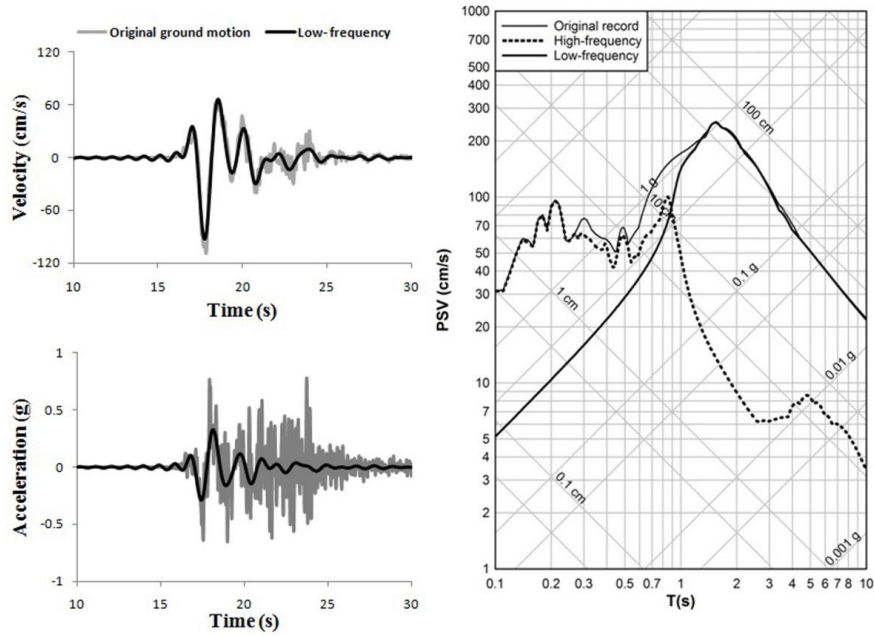
جدول ۱: مشخصات شتابنگاشت‌های مورد استفاده

رویداد	سال	ایستگاه	نزدیک ترین فاصله (Km)	نام اختصاری	پریود پالس (s)
San Fernando	۱۹۷۱	Pacoima Dam	۱/۸	San	۱/۶
N. Palm Springs	۱۹۸۶	North Palm Springs	۴	Nsp	۱/۴
Northridge	۱۹۹۴	Rinaldi	۶/۵	Nor	۰/۹۵
Kobe	۱۹۹۵	Takarazuka	۰/۳	Kob	۱/۱۱
Chi-Chi	۱۹۹۹	TCU075	۰/۹	Chi	۳/۶
Tabas	۱۹۷۸	Tabas	۱/۲	Tab	۵/۹۱
Bam	۲۰۰۳	Bam	۱	Bam	۲/۱۸

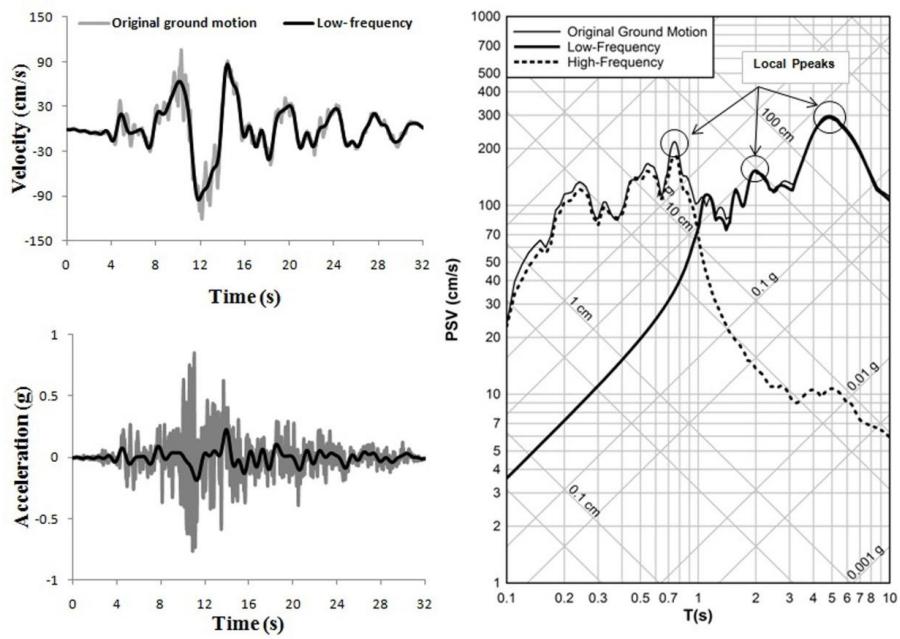
برای بررسی ویژگی‌های پاسخ سازه‌ها در قبال این مولفه‌ها، نمودارهای طیف پاسخ سه جانبه‌ی لگاریتمی با میرائی ۵ درصد، در اشکال (۲) و (۳) رسم شده‌اند. برای تعیین نسبت بحرانی پریود سازه به پریود پالس، مطابق شکل (۱)، از مقادیر مقیاس شده‌ی شبه سرعت طیفی PSV استفاده می‌گردد.

با توجه به این که قسمت پالس گونه‌ی سیگنال‌های زلزله در حوزه‌ی نزدیک از نظر محتوای فرکانسی به صورت نوار باریک در نظر گرفته می‌شود، استفاده از پالسهای ساده مثلثی، مربعی و یا سینوسی با یک پریود معین برای مطالعه‌ی پاسخ سازه‌ها تحت این زلزله‌ها و یا تولید شتابنگاشت‌های مصنوعی توصیه شده‌است.

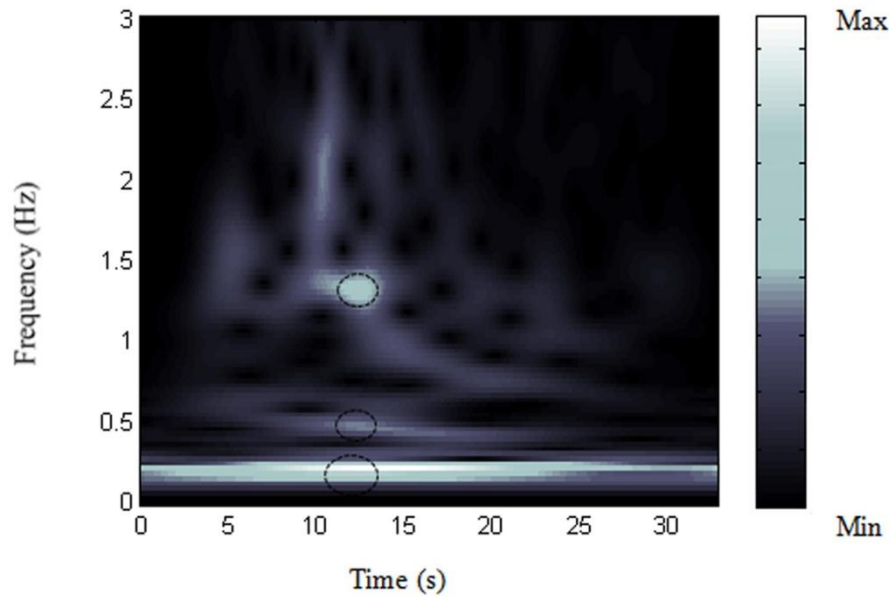
بررسی دقیق خروجی‌های زمان-فرکانس مانند شکل (۴)، صحت این مدعا را مورد تردید واقع می‌سازد. با مراجعه به شکل مذکور، حضور سه ناحیه‌ی فرکانسی در زمان وقوع پالس به خوبی قابل ملاحظه است. با دقت در شکل (۳) در می‌یابیم نقاط سه گانه‌ی پیک در نمودار طیف پاسخ الاستیک دقیقاً متناظر با این سه ناحیه فرکانسی در رکورد زلزله هستند. بنابراین، پالس‌های تک پریود، احتمالاً، تصویر کاملی از پالس حقیقی ارائه نخواهند کرد.



شکل ۲: خروجی فرایند جداسازی قسمت پالس گونه برای شتابنگاشت بم.



شکل ۳: خروجی فرایند جداسازی قسمت پالس گونه برای شتابنگاشت طیس.



شکل ۴: محتوای زمان-فرکانس شتابنگاشت طبس.

توانایی پالس‌های جدا شده در تخمین رفتار لرزه‌ای سازه‌ها

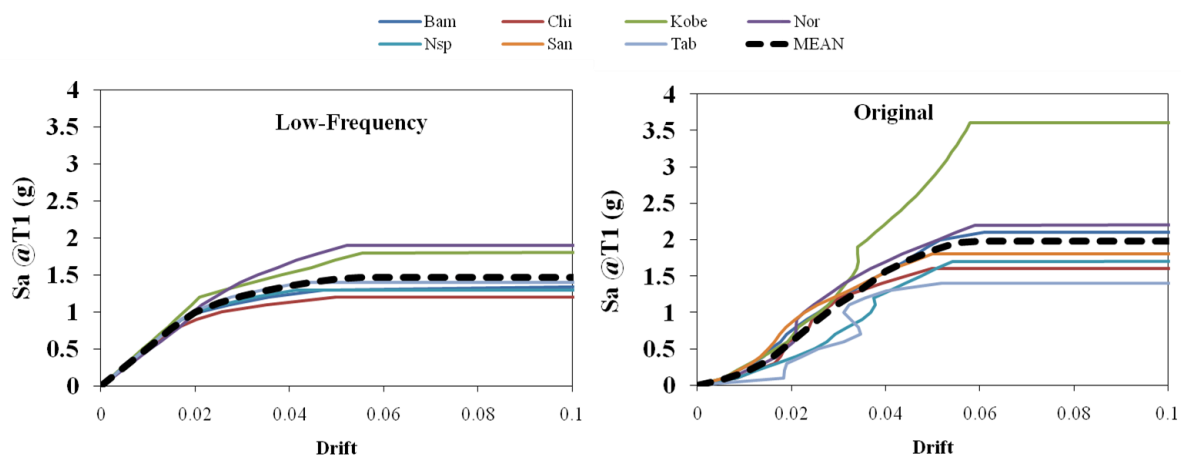
در این بخش، به بررسی عمیق‌تر نتیجه حاصل در قسمت قبل در مورد ایده کاربرد قسمت‌های پالس‌گونه شتابنگاشت به جای شتابنگاشت اصلی در تحلیل‌های دینامیکی می‌پردازیم. به منظور ارزیابی توانایی پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه‌ها توسط مولفه‌های تولید شده از یک شتابنگاشت پالس‌گونه به روش پیشنهادی در این مقاله؛ در این بخش، به مدلسازی دو بعدی دو سازه قاب خمشی فولادی ۳ و ۱۲ طبقه می‌پردازیم. جدول (۲) مشخصات عمومی این دو سازه را ارائه می‌کند، این سازه‌ها به عنوان نماینده شکل پذیری متوسط و به عنوان جزیی از سازه‌های استاندارد معرفی شده توسط (Dimopoulos et al., 2012) انتخاب شده‌اند. جزییات مشخصات دینامیکی سازه‌ها در جدول (۲) ارائه گردیده است. برای تخمین ظرفیت سازه، اقدام به تحلیل دینامیکی فزاینده برای هر دو سازه و تحت دو مجموعه ۷ تایی از شتابنگاشت‌های تولید شده توسط روش پیشنهادی مقاله می‌کنیم: شتابنگاشت‌های اصلی و شتابنگاشت‌های پالس مربوط به مولفه دارای فرکانس کم.

جدول ۱: مشخصات سازه‌های مورد استفاده.

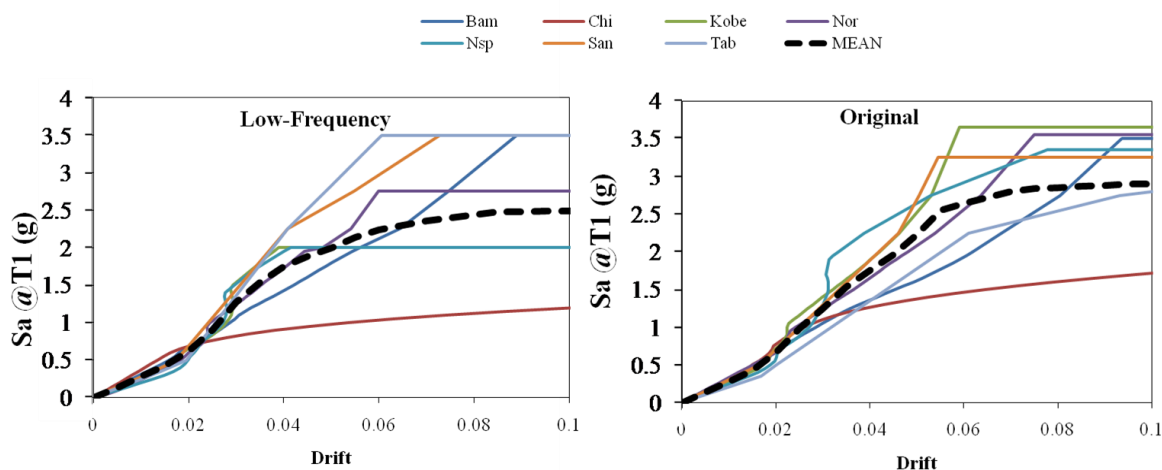
تعداد طبقه	تعداد دهانه ۵ متری	ستون - (IPB) : تیر (IPE) :	پریود طبیعی ارتعاش (s)		
			مد اول	مد دوم	مد سوم
۳	۳	260-330(1-3)	۰/۷۱	۰/۱۹	۰/۱۱
۱۲	۳	450-360(1)+450-400(2-3)+450-450(4-5)+400-450(6-7)+360-400(8-9)+360-360(10)+ 360-330(11-12)	۱/۱۲	۰/۴۳	۰/۲۶

در تحلیل‌ها از پاسخ طیفی شتابنگاشت در پریود مد اول سازه Sa(T1)، به عنوان سنج شدت ۵ استفاده نموده و تقاضای لرزه‌ای در قالب پارامتر حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقه IDRMAX، اندازه‌گیری می‌گردد. نتایج حاصل در اشکال (۵) و (۶) ارائه شده است. این نتایج محصول بیش از ۱۴۰۰ تحلیل دینامیکی غیرخطی برای گام‌های افزایش مقیاس شدت برابر ۰/۰۵g تا دستیابی به جابه‌جایی نسبی هدف ۰/۲ و یا رخداد ناپایداری بوده است. در شکل (۷)، به مقایسه مقادیر میانگین منحنی ظرفیت حاصل شده برای سه مجموعه شتابنگاشت پرداخته شده است. مدل‌های سازه‌ای و مراحل تحلیل در نرم‌افزار اجزا محدود SeismoStruct به انجام رسیده است.

⁵ Intensity Measure



شکل ۵: خروجی تحلیل دینامیکی فزاینده برای قاب خمشی ۳ طبقه

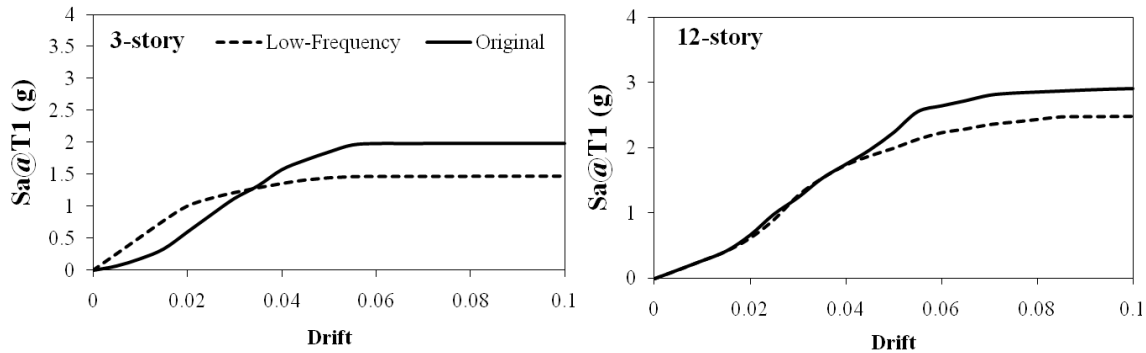


شکل ۶: خروجی تحلیل دینامیکی فزاینده برای قاب خمشی ۱۲ طبقه.

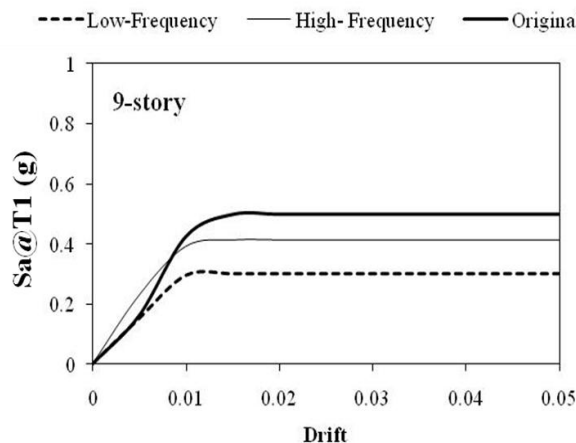
با بررسی خروجی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده، می‌توان گفت:

- در جابه جایی‌های نسبی اندک که احتمال ورود به ناحیه غیرخطی کم است، منحنی مربوط به پالسهای جدا شده پراکندگی بسیار کمتری را نسبت به شتابنگاشت‌های اصلی نشان می‌دهند. در مورد سازه‌های چند درجه آزادی، تغییر در شیب آغازین منحنی خروجی تحلیل دینامیکی فزاینده را می‌توان منسوب به فعال شدن چندین مد سازه و سهم شدن آنها در رفتار دینامیکی دانست. در حقیقت، مشاهدات ما تایید کننده این واقعیت است که محتوای غنی فرکانسی در شتابنگاشت اصلی به منزله زمینه مساعدی برای مشارکت چندین مد و به تبع آن مکانیسم خرابی در رفتار سازه است. حال آنکه، بخشهای پالس گونه فاقد چنین خاصیتی خواهند بود.
- در مورد سازه ۱۲ طبقه، پیرو مد اول ارتعاش بر خلاف سازه ۳ طبقه در ناحیه‌ای قرار دارد که منطبق با فرکانس پایین در پالسها خواهد بود. به عبارت دیگر، اولویت ذاتی سازه برای ارتعاش در ناحیه خطی، متناظر با محتوای فرکانسی پالسها است. بنابراین، پراکندگی در شیب اولیه منحنی‌ها به حداقل می‌رسد.
- براساس خروجی‌های تحلیل، تخمین ظرفیت سازه در ناحیه آستانه فروریزش توسط پالسها محافظه کارانه خواهد بود، گرچه، چنین برداشتی برای سطوح عملکرد متناظر با ناحیه خطی صحیح نیست.

با توجه به نتایج مذکور و بحث امکان مشارکت مدها و مکانیسم‌های پیچیده‌تر شکست، برای دستیابی به مقایسه جامع در زمینه توانایی نمایندگی شتابنگاشت اصلی از سوی بخش پالس‌گونه، لازم است سازه‌ها به صورت سه‌بعدی مدلسازی شده و تحت تمام بخشهای شتابنگاشت از جمله بخشهای دارای فرکانس زیاد (زمینه یا غیر پالس‌گونه) قرار گیرند. شکل (۸) نمونه‌ای از خروجی منحنی میانگین تحلیل دینامیکی فزاینده برای سازه بتنی قاب خمشی با شکل پذیری متوسط، سطح خطر لرزه‌ای متوسط و نوع خاک شماره ۳ بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم را که در انطباق با آیین نامه طراحی سازه‌های بتنی ACI05 طراحی شده است، به تصویر می‌کشد. امکان تغییر در شیب اولیه و محافظه‌کاری در تخمین ظرفیت فروریزش برای این سازه بسیار شبیه مشاهدات مربوط به قابهای دو بعدی فولادی است.



شکل ۷: مقایسه منحنی میانگین تحلیل دینامیکی فزاینده حاصل از کاربرد شتابنگاشت‌های اصلی و پالسهای جداشده.



شکل ۸: مقایسه منحنی میانگین تحلیل دینامیکی فزاینده سازه بتنی ۹ طبقه حاصل از کاربرد شتابنگاشت‌های اصلی، بخش با فرکانس زیاد و پالسهای جداشده (Ghodrati and Arian Moghaddam, 2015).

نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش نوینی بر مبنای استفاده از تبدیل S جهت بررسی محتوای فرکانسی تاریخچه‌های زمانی پالس‌گونه حرکت زمین که در حوزه نزدیک گسل ثبت می‌گردند، معرفی شده است. سپس، با مدلسازی دو بعدی دو سازه قاب خمشی فولادی امکان توانایی بخشهای پالس‌گونه در تخمین پاسخ دینامیکی سازه‌ها به روش تحلیل دینامیکی فزاینده مورد ارزیابی کمی واقع شده است. با استفاده از روش پیشنهادی ۷ رکورد پالس‌گونه مورد مطالعه قرار گرفته است که مهمترین نتایج آن به شرح زیر است:

- با مقایسه پاسخ‌های طیفی الاستیک، می‌توان گفت که شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک دارای غنای محتوای فرکانسی به صورتی هستند که قسمتهای پالس‌گونه، تنها، توانایی نمایندگی شتابنگاشت در بخشهای پررود بلند را خواهند داشت و برای سازه‌های سخت و حساس به شتاب، عملاً چنین نمایندگی غیرمنطقی است.
- کارایی کاربرد پالس‌های جدا شده برای تخمین ظرفیت سازه نیز به سطوح عملکرد مورد نظر وابسته است. به عبارت دیگر، چنانچه، سازه در آستانه فروریزش بوده و سطوح بالای غیرخطی شدن را تجربه کرده باشد، پالسها منجر به تخمین محافظه‌کارانه‌ای از ظرفیت

خواهند شد. اما، در جابه‌جایی‌های اندک که رفتار سازه خطی است، ممکن است کاربرد پالسها منجر به تخمین دست پایین ظرفیت سازه گردد.

- پراکندگی در شیب اولیه منحنی‌های تحلیل دینامیکی فزاینده، با کاربرد شتابنگاشتهای اصلی در قیاس با پالسها افزایش می‌یابد. این امر، گرچه، می‌تواند منسوب به امکان مشارکت مدهای بالاتر سازه در مواجهه با محتوای غنی فرکانسی شتابنگاشتها باشد، لزوم انجام مطالعات جامع‌تر با مدلسازی ۳ بعدی سازه را یادآور می‌شود.

فهرست مراجع

Baker JW (2007) Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5): 1486-1501

Dimopoulos AI, Bazeos N and Beskos DE (2012) Seismic yield displacements of plane moment resisting and x-braced steel frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41:128-140

Ghahari SF, Jahankhah H and Ghannad MA (2010) Study on Elastic Response of Structures to Near-Fault Ground Motions through Record Decomposition, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(7): 536–546

Ghodrati Amiri G and Arian Moghaddam S (2014) Extraction of forward-directivity velocity pulses using S-Transform-based signal decomposition technique. *Bulletin of Earthquake Engineering*: DOI: 10.1007/s10518-013-9581-x

Ghodrati Amiri G and Arian Moghaddam S (2015) Evaluation of the Pulse-Like Nature of Near-Fault Ground Motions Using S-Transform. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*: Submitted (Farsi)

Mavroeidis GP and Papageorgiou AS (2003) a Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3): 1099–1131

Somerville PG (1998) Development of an Improved Ground Motion Representation for Near-Fault Ground Motions”, *Proceeding of the SMIP 98 Seminar on Utilization of Strong Motion Data*, Oakland, CA

Stockwell RG, Mansinha L and Lowe RP (1996) Localization of the complex spectrum: the S-Transform. *IEEE Trans Signal Process* 44(4):998–100