



## ارزیابی تاریخیچه انرژی ورودی تجمعی نسبی و مطلق در اثر زلزله حوزه نزدیک دارای پالس مشهود در تاریخیچه شتاب با رویکرد طیف بازتاب انرژی نسبی و مطلق

نوید سیاه‌پلو<sup>۱\*</sup>، سیدعبدالنبی رضوی<sup>۲</sup>، حمید بیرقی<sup>۳</sup>

- ۱- گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، خوزستان، ایران
- ۲- دانشکده مهندسی، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران
- ۳- دانشکده مهندسی، واحد مهدی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مهدی شهر، ایران.

### تاریخیچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

### کلمات کلیدی:

زلزله نزدیک گسل  
اثر پالس گونه  
جهت پذیری پیش‌رونده  
انرژی ورودی  
مودهای بالاتر

**خلاصه:** مطالعات مختلفی برای ارزیابی تأثیر زلزله‌های نزدیک گسل با اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده انجام گرفته است که ویژگی بارز آن وجود یک پالس با دامنه قابل توجه در نگاشت سرعت است. در این مقاله در راستای بررسی اثر زلزله‌های نزدیک گسل پالس گونه بر نیازهای ارتجاعی قاب‌های خمشی فولادی، ابتدا یک مدل ۱۵ طبقه پایه از قاب خمشی فولادی شبیه سازه شده و پس از تأیید صحت فرایند مدل‌سازی، تحت اثر ۲۰ رکورد نزدیک به گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و ۲ رکورد دور از گسل مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته و رابطه بین انرژی چرخه‌ای مؤثر، ECE و پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و منحنی چرخه‌ای سازه SDOF در دو حالت زلزله نزدیک و دور از گسل مورد بررسی قرار گرفت. سپس ضمن بررسی تاریخیچه انرژی ورودی تجمعی نسبی و مطلق به همراه انرژی جنبشی در یک بخش و حداکثر دررفت بین طبقه‌ای برای ۴ تراز مختلف رفتار غیرخطی (R=6.0, 4.0, 2.0, 1.0) در بخش دیگر، اثر تعداد مودهای بالاتر مورد ارزیابی قرار گرفت. مطالعه پروفیل دررفت بین طبقه‌ای برای دو زلزله نزدیک گسل با پالس مشهود در شتاب و بدون پالس مشهود در شتاب، نشان دهنده شکل‌گیری تمرکز دررفت‌های حداکثر، IDRmax، در طبقات فوقانی برای درجات غیرخطی کم (R=2.0 و R=1.0) در رکوردهای با پالس مشهود می‌باشد که خود نیز موید تأثیر آن بر مشارکت مودهای بالاتر می‌باشد. این در حالی است که در رکوردهای فاقد پالس مشهود در شتاب، علاوه بر تشدید IDRmax در طبقات فوقانی، در طبقات تحتانی نیز نیازهای بزرگی بر سازه تحمیل می‌شود.

### ۱- مقدمه

در مجاورت گسل‌های فعال، حرکت زمین به شدت متأثر از مکانیسم گسلش، راستا و جهت پارگی گسل با توجه به سایت (به طور مثال جهت‌پذیری پیش‌رونده) و تغییر شکل استاتیکی ماندگار در محل گسلش است که به عنوان اثرات پرتابی یا حرکت پرتابه‌ای شناخته می‌شود؛ بنابراین پارامترهای زلزله نزدیک گسل باعث می‌شود که مقدار قابل‌توجهی انرژی پارگی گسل به شکل یک تحریک پالس گونه با پیوند بلند نمایان گردد (لازم به ذکر است که اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده فاقد ماهیت پالس گونه است). این ماهیت پالس‌گونگی غالباً در ابتدای شتاب‌نگاشت نمایان شده و تمایل دارد که بخش پیوند بلند طیف پاسخ شتاب را افزایش دهد. در این حالت سازه مقدار قابل‌توجهی انرژی زلزله را با تعداد اندکی اغتشاش با دامنه بزرگ مستهلک نموده و نیازهای قابل‌توجهی بر سازه تحمیل می‌شود. در نتیجه خطر ایجاد شکست ترد در المان‌های سازه با جزئیات اجرایی ضعیف تقویت

می‌گردد. تأثیرات تعیین کننده چنین پدیده‌ای در خلال زلزله ارزکان (۱۹۹۲)، لاندروز (۱۹۹۲)، نورتریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، کوچاپیلی (۱۹۹۹)، دیوز و چی-چی تایوان مشاهده گردید.

تا میانه سال ۱۹۵۰ که هاسنر<sup>۱</sup> (۱۹۵۶) برای نخستین بار روش طراحی حدی را به منظور تأمین ظرفیت استهلاک انرژی المان‌های سازه‌ای معرفی و پیشنهاد نمود [۱]، روش‌های طراحی بر اساس انرژی چند وقتی است که دوباره مدنظر محققین قرار گرفته شده است. در این راستا تعداد قابل‌توجهی مقاله تحقیقاتی با رویکرد طراحی بر اساس مفاهیم انرژی تولید و ارائه شده‌اند [۲-۵]. شایان ذکر است شاخص‌ترین مطالعه‌ای که باعث شد مفهوم انرژی ورودی و خروجی بتواند دوباره به عنوان یک معیار اندازه‌گیری خسارت سازه در نظر گرفته شود، مقاله‌ای است که توسط یانگ و برترو<sup>۲</sup> (۱۹۹۰) نوشته شد [۶]. مطالعه ایشان بار دیگر اهمیت انرژی ورودی مطلق را اثبات نموده و نشان داد که در تاریخیچه زمانی انرژی ورودی همواره یک جهش قابل

1 Housner  
2 Uang and Bertero

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: siahpolo@acecr.ac.ir



ورودی را نداشته و غالباً شکست ترد (رفتار غیر شکل‌پذیری) شکل می‌گیرد. به علاوه برای پریدهای کوتاه و بلند اختلاف بین تعریف انرژی ورودی به صورت نسبی و مطلق افزایش می‌یابد به نحوی که در پریدهای بلند انرژی نسبی عموماً بزرگ‌تر از انرژی مطلق است. به کارگیری مفهوم انرژی ورودی زلزله در تحقیق وهدانی و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای ۴ نسبت میرایی و ۴ مقدار شکل‌پذیری، طیف‌های انرژی ورودی نسبی بر واحد جرم را برای ۴ زلزله ایران تولید نمودند. پس از بحث و بررسی دریافتند که اثر تغییرات شکل‌پذیری بر طیف انرژی ورودی نسبی محسوس‌تر از اثر تغییرات نسبت میرایی بر طیف مذکور است [۱۵].

به طور کلی هدف اصلی این مقاله بررسی تعریف انرژی ورودی به کمک آخرین یافته‌های مرتبط با زلزله‌های نزدیک گسل است. با توجه به اینکه در حال حاضر دسترسی به تعداد قابل توجهی زلزله نزدیک گسل فراهم شده است، این مقاله به طور خاص تأثیر جهت‌پذیری پیش‌رونده بر انرژی ورودی به سازه بر سازه را بررسی می‌نماید. رویکرد ارزیابی در اینجا، مفهوم ضریب رفتار سازه یک درجه آزادی معادل می‌باشد. لازم به یادآوری است که در زلزله‌های نزدیک گسل غالباً دو فرم اثرات حرکت پرتابه‌ای (حرکت پرتابه‌ای) و جهت‌پذیری پیش‌رونده طبقه‌بندی می‌شوند [۱۷]. ویژگی بارز این رکوردها وجود پالس قابل توجه در رکورد سرعت و بعضاً شتاب زلزله است. مطالعات اخیر بر زلزله‌های نزدیک گسل نشان می‌دهد که در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها می‌بایست علاوه بر اعمال اثرات محتوای فرکانسی مشهود در تاریخچه شتاب زلزله، به موضوع پالس غالب نگاهت سرعت نیز توجه ویژه‌ای صورت پذیرد [۱۸]. برای نمونه، چنگ فانگ و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) در تحقیقی شتاب ماکزیمم طبقات و دریافت پسماند بین طبقه‌های قاب‌های مهاربندی و خمشی فولادی را تحت اثر زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک در حالت پرتابه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ثابت کردند پاسخ‌های سازه به شدت به شتاب طیفی، نسبت PGV/PGA، و پرید پالس شتاب‌نگاشت وابسته است [۱۹]. همچنین در مطالعه‌ای که زین و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) به روی پل‌های دارای دهانه‌های بلند CFST<sup>۷</sup> انجام دادند، نشان دادند که حرکات پرتابه‌ای دربرگیرنده‌ی پالس‌های استاتیکی و دینامیکی بوده که هر دوی آن‌ها بر پاسخ‌های لرزه‌ای اثر قابل ملاحظه دارند [۲۰]. اگر چه اثر

توجه در انرژی وجود دارد. از آن پس تعداد قابل توجهی مطالعه انجام گرفت تا به کمک آن بتوان تخمین مناسبی از نیازهای انرژی و مکانیسم اتلاف آن در سازه به دست آورد. یکی از دستاوردهای حاصل معرفی طیف بر پایه انرژی است [۱۰-۱۷]. به علاوه در مطالعات دیگری، نظام‌مندسازی فرایند انرژی ورودی کنترل شده در طراحی لرزه‌ای و روش‌های کنترل آن نیز بسط و توسعه یافته است [۱۲ و ۱۱]. همچنین در مطالعه‌ای، کالکان و کونات<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) به مطالعه رفتار لرزه‌ای غیرارتجاعی سازه‌های فولادی مورد استفاده در پروژه SAC<sup>۲</sup> پرداختند [۱۳]. بدین منظور سه ساختمان فولادی به صورت قاب‌های دو بعدی با تعداد طبقات ۳، ۹ و ۱۲ به وسیله نرم‌افزار OpenSEES [۱۴] مدل‌سازی و تحلیل شدند. از طرفی اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده نسبت به حرکت پرتابه‌ای نیازهای بیشتری را به دنبال دارد. این موضوع به دلیل وجود گشتاور رو به جلو و عقب زلزله با جهت‌پذیری در فاز اولیه و انتهای پالس توجه می‌گردد. در اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده، نیاز طبقات فوقانی تقریباً دو برابر اثر حرکت پرتابه‌ای است. اثر موده‌ای بالاتر در حالت حرکت پرتابه‌ای دیده نمی‌شود با این حال برای  $T_p/T$  کمتر از ۰/۸ ثانیه این اثر برای پالس با جهت‌پذیری پیش‌رونده کاملاً مشهود است. در تحقیق دیگری استفاده از روش انرژی در راستای تخمین نیاز تغییر مکان قاب‌های خمشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. محققین با معرفی روشی بر مبنای مفهوم سرعت راهکاری جهت تخمین دقیق‌تر انرژی انتقالی رکورد پیشنهاد داده‌اند. در پژوهشی که توسط سیاه‌پلو<sup>۳</sup> (۲۰۱۵) صورت پذیرفت اثر زلزله‌های نزدیک گسل بر تخمین نیازهای لرزه‌ای قاب خمشی فولادی مورد بررسی قرار گرفت [۱۶]. او با مطالعه تاریخچه زمانی انرژی ورودی در زلزله‌های دور از گسل نشان داد مجموع انرژی ورودی به صورت تدریجی به سازه وارد و در نتیجه سازه انرژی را در چندین چرخه تغییر شکل پلاستیک تلف می‌کند. بدین ترتیب فرصت کافی برای اتلاف انرژی وجود داشته و خستگی با سیکل کم پراهمیت می‌شود. این نتیجه برای زلزله‌های نزدیک گسل که در رکورد شتاب آن‌ها پالس مشهود دیده نمی‌شود نیز قابل تعمیم است. این در حالی است که اگر در رکورد شتاب زلزله نزدیک گسل پالس مشهود دیده شود، کل انرژی ورودی در لحظات ابتدایی با یک رشد قابل توجه و در مدت زمان کوتاه به سازه تحمیل می‌گردد. در این حالت سازه فرصت کافی برای پاسخگویی به تقاضای قابل توجه انرژی

- 1 Kalkan and Kunnath
- 2 SAC Joint Venture. FEMA 355C: State of the Art Report on System Performance of Steel Moment Frames Subject to Earthquake Ground Shaking.
- 3 Siahpolo

- 4 Vahdani et al.
- 5 Cheng Fang et al.
- 6 Lifeng Xin et al.
- 7 Concrete Filled Steel Tube

شده فنر در سیستم خطی،  $u_t$ ، تغییر مکان مطلق (کلی)،  $u_g$ ، تغییر مکان زمین و  $u$ ، تغییر مکان نسبی سیستم نسبت به زمین است. می‌توان رابطه‌ی (۱) را به شکل رابطه‌ی (۲) بازنویسی نمود:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) = -m\ddot{u}_g \quad (2)$$

اگر از روابط (۱) و (۲) نسبت به تغییر مکان نسبی،  $u$ ، انتگرال‌گیری شود، دو تعریف برای انرژی ورودی به دست می‌آید. اگر از رابطه‌ی (۱) نسبت به  $u$  انتگرال گرفته شود، فرمول‌بندی انرژی مطلق سیستم SDOF با میرایی ویسکوز در اثر زلزله افقی نتیجه می‌گردد:

$$m \frac{(\dot{u} + \dot{u}_g)^2}{2} + \int (c\dot{u}) du + \int f(u) du = \int m(\ddot{u}_g + \ddot{u}) du_g = \int m(\ddot{u}_g + \ddot{u}) \ddot{u}_g dt \quad (3)$$

رابطه‌ی (۳) را می‌توان به شکل عمومی رابطه‌ی (۴) نوشت. در این حالت انواع مؤلفه‌های انرژی قابل تعریف می‌باشند:

$$E_K + E_\xi + E_s + E_H = E_{AI} \quad (4)$$

جایی که،  $E_{AI}$ ، انرژی ورودی مطلق،  $E_K$ ، انرژی جنبشی مطلق،  $E_\xi$ ، انرژی میرایی،  $E_s$ ، انرژی کرنشی ارتجاعی و  $E_H$ ، انرژی کرنشی پلاستیک (انرژی چرخه‌ای غیرقابل برگشت (تجدید ناپذیر)). از طرفی اگر از رابطه‌ی (۲) نسبت به  $u$  انتگرال گرفته شود، رابطه‌ی (۵) برای معرفی انرژی نسبی سیستم SDOF به دست می‌آید:

$$m \frac{\dot{u}^2}{2} + \int (c\dot{u}) du + \int f(u) du = - \int m(\ddot{u}_g) du = - \int m\ddot{u}_g \dot{u} dt \quad (5)$$

فرم بسته مؤلفه‌های انرژی را در رابطه‌ی (۵) می‌توان به شکل رابطه‌ی (۶) نوشت:

پالس شتاب‌نگاشت در مطالعات مختلفی در نظر گرفته شده است، با این حال اهمیت پالس‌های موضعی موجود در شتاب زلزله‌های نزدیک و تأثیر آن بر شدت خرابی‌های وارده برای اولین بار توسط برترو<sup>۱</sup> (۱۹۷۶) مطرح گردید [۲۱].

بر این اساس در این پژوهش در ابتدا مباحث برای سازه یک درجه آزاد محاسبه شده، سپس یک مدل پایه‌ی ۱۵ طبقه تحت اثر ۲۰ شتاب‌نگاشت نزدیک گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و همچنین ۲ رکورد معمولی (دور از گسل) جهت بررسی و مقایسه‌ی نتایج مورد استفاده قرار گرفته است. کلیه تحلیل‌ها به گواه شکل ۶ مقاله که در ادامه معرفی می‌شود، برای تمامی شتاب‌نگاشت‌های فوق‌الذکر انجام شده، منتهی جهت اختصار و پرهیز از طولانی شدن مقاله و البته امکان بحث دقیق‌تر، صرفاً نتایج تعدادی از شتاب‌نگاشت‌ها ارائه شده‌اند. همچنین پاسخ سازه‌های ۱۵ طبقه، برای مقادیر مختلفی از  $R$  بررسی شده است. این موضوع با ارزیابی پارامترهای متنوعی مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

آنچه این مطالعه را از مطالعات قبل متمایز می‌سازد این است که در هیچ یک از مطالعات قبل مفهوم اثر مشخصات زلزله در تعریف انرژی ورودی مطلق و نسبی به شکل صریح در نظر گرفته نشده است. همچنین علاوه بر ارزیابی ویژگی زلزله‌های نزدیک گسل مانند پالس شتاب و مجاورت پرپود پالس با پرپود ارتعاشی سازه، تأثیر درجه غیرخطی شدن بر توزیع خسارت و توزیع انرژی ورودی نسبی و مطلق در نظر گرفته شده‌اند. به علاوه، آنچه برای سازه SDOF<sup>۲</sup> محاسبه شده است طیف بازتاب انرژی ورودی در حوزه ارتجاعی است که در واقع این موضوع برای زلزله‌های نزدیک گسل کمتر مورد توجه تحقیقات پیشین واقع شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- فرمول‌نویسی پایه در انرژی ورودی سیستم SDOF

از مبانی دینامیک سازه معادله ارتعاش آزاد حرکت سیستم SDOF میرا عبارت است از [۲۰]:

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + f(u) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه  $m$ ، جرم سازه و  $c$ ، ضریب میرایی،  $f(u)$ ، نیروی ذخیره

- 1 Bertero
- 2 Single Degree of Freedom

با استفاده از نرم افزار (MATLAB(R2016) و به کمک کدهایی که توسط مولفین مقاله نگارش شده است، خروجی‌های OpenSEES به انواع فرم‌های انرژی مورد نیاز تبدیل شده است. سایر نیازهای برآورد شده نیز به کمک همین نرم افزار به شکل گرافیکی تبدیل شده‌اند.

## ۲-۲- روند مدل‌سازی و معرفی مدل‌ها

مدل پایه‌ی تحقیق که از این پس FRN15B3 نامیده می‌شود، دارای تعداد طبقات ۱۵ و تعداد دهانه‌های ۳ می‌باشد. در مدل‌های مورد مطالعه، ارتفاع کلیه طبقات ثابت و برابر ۴ متر و طول دهانه‌ها ثابت و برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل (۱) را ملاحظه نمایید) کلیه تیرها و ستون‌ها در هر طبقه دارای تیبی مشابه شناسه نمایش داده شده در قاب می‌باشند. شکل‌پذیری برای قاب‌های خمشی فولادی دو بعدی مورد استفاده در این مطالعه، از نوع ویژه انتخاب گردید.

تمامی قاب‌های فوق‌الذکر، مطابق مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان ایران بارگذاری ثقلی و لرزه‌ای شده‌اند. در بارگذاری ثقلی، بار مرده‌ی طبقات، بار معادل تیغه‌بندی و بار متوسط زنده‌ی طبقات به ترتیب مقادیر ۵۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع با عرض بارگیر ۵ متر در نظر گرفته شده است. در بارگذاری لرزه‌ای در محاسبه جرم طبقات از بار مرده به علاوه ۲۰ درصد بار زنده استفاده شده است. خاک محل احداث، خاک نوع III، منطقه با خطرپذیری بسیار زیاد و نوع کاربری مسکونی با درجه اهمیت متوسط در نظر گرفته شده است.

کلیه مدل‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار ایتبس<sup>۱</sup> ۲۰۱۶ [۲۲] تحلیل استاتیکی معادل (در برخی مدل‌ها تحلیل شبه دینامیکی و همسان‌سازی برش پایه طراحی) و به روش ضرایب بار و مقاومت طراحی شده‌اند [۲۳]. علاوه بر طراحی بر اساس معیار مقاومت، توزیع سختی قاب‌ها در ارتفاع به گونه‌ای تنظیم شده است تا بیشینه زاویه دررفت بین طبقه‌ای به مقادیر مجاز مندرج در استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم محدود گردد. برای تیرها از مقطع تیرورق و برای ستون‌ها از مقطع جعبه‌ای استفاده گردید. در کلیه مقاطع، ضابطه مقطع فشرده لرزه‌ای رعایت گردید. مشخصات هندسی قاب FRN15B3 در جداول ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

## ۲-۳- مشخصات رکوردهای مورد استفاده در تحقیق

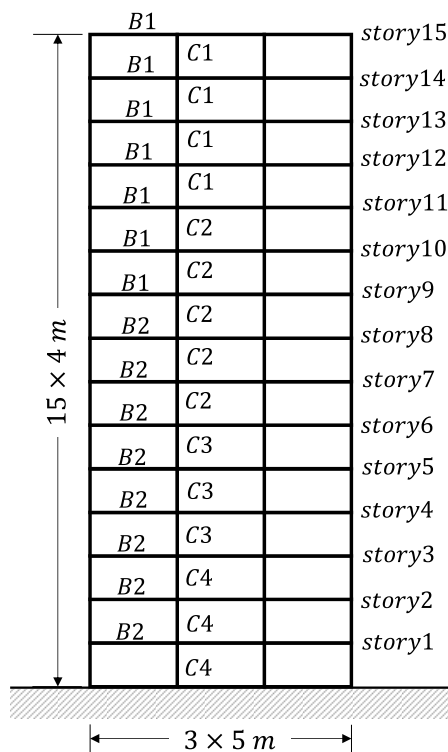
در یک دسته‌بندی، نگاشت‌های نزدیک گسل را می‌توان بر اساس قضاوت مهندسی از زلزله‌های دور از گسل تمیز داد. به خصوص چنانچه

$$E_{KR} + E_{\xi} + E_s + E_H = E_{RI} \quad (۶)$$

جایی که،  $E_{RI}$ ، انرژی ورودی نسبی،  $E_{KR}$ ، انرژی جنبشی نسبی است.  $E_I$ ، نماینده کاری است که به وسیله نیروی اینرسی ( $mu_t$ ) بر سازه اثر می‌کند که معادل کار انجام شده توسط کل نیروی برش پایه در اثر حرکت زمین است. از سوی دیگر،  $E_{RI}$ ، نماینده کار انجام شده توسط سازه با پای ثابت در اثر نیروی جانبی معادل است. در نتیجه این انرژی فاقد اثر حرکت جسم صلب است. تمایز بین این دو انرژی در حقیقت اختلاف بین انرژی جنبشی مطلق و نسبی است؛ زیرا هر دو رابطه‌ی (۴) و (۶) مقادیر انرژی میرایی، کرنشی ارتجاعی و پلاستیک یکسان است. اختلاف بین دو تعریف انرژی را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۷) نوشت:

$$E_{AI} - E_{RI} = E_K - E_{KR} = \frac{1}{2} mu_g^2 + mu_g u \quad (۷)$$

سمت راست معادله‌ی (۷) دو عبارت دارد. اولی انرژی جنبشی در اثر سرعت زمین و دومی کار انجام شده توسط شتاب زمین از نظر افزایش تدریجی تغییر مکان سازه. در یک نتیجه‌گیری اولیه می‌توان این‌گونه استدلال نمود که اندازه انرژی ورودی نسبی و مطلق برای سازه‌های بسیار سخت و بسیار نرم تفاوت خواهد داشت. در سازه‌های انعطاف‌پذیر (نرم) که پیوند ارتعاشی آن‌ها به مراتب بزرگ‌تر از پیوند غالب حرکت زمین است، جرم سازه در موقعیت اولیه خود ثابت مانده در حالی که پایه سازه همزمان و به اندازه حرکت زمین جابجا می‌شود. در این حالت، انرژی مطلق ورودی به سازه صفر است در حالی که انرژی نسبی قابل‌توجهی به سازه منتقل می‌گردد. در مقابل برای سازه سخت، تغییر مکان نسبی جرم با توجه به حرکت زمین بسیار ناچیز بوده و در نتیجه انرژی نسبی ورودی زلزله نزدیک صفر و مقدار قابل‌توجهی انرژی مطلق به سازه وارد می‌شود. در این مقاله به منظور برآورد انواع فرم‌های انرژی متناسب با خواسته‌های تعریف شده در هر بخش از خروجی‌های نرم افزار OpenSEES که به صورت متنی ذخیره‌سازی شده‌اند استفاده شده است. از آنجایی که حجم و تنوع خروجی‌های متنی این نرم افزار بسیار قابل توجه است لاجرم برای دسته‌بندی و تبدیل خروجی‌های متنی به نمودارها و جداول کمی لازم است از نرم افزارهای واسط استفاده شود. در این مقاله



شکل ۱. نمای جانبی قاب دو بعدی FRN15B3 به همراه تیپ بندی تیرها و ستون‌ها

Fig. 1. Elevation of the frame FRN15B3 with beams and column sections

جدول ۱. مشخصات تیپ بندی مورد استفاده در ستون‌ها

Table 1. Specification used in columns

نام‌گذاری	شناسه تیپ‌بندی مقطع	عرض بال $b_f$	ضخامت بال $t_f$	ارتفاع جان $h_w$	ضخامت جان $t_w$
BOX 300X25	C1	300	25	300	25
BOX 350X30	C2	350	25	350	25
BOX 400X30	C3	400	30	400	30
BOX 450X30	C4	450	30	450	30

جدول ۲. مشخصات تیپ بندی مورد استفاده در تیرها

Table 2. Specification used in beams

نام‌گذاری	شناسه تیپ‌بندی مقطع	عرض بال $b_f$	ضخامت بال $t_f$	ارتفاع جان $h_w$	ضخامت جان $t_w$
TW500F250TH15	B1	250	20	500	20
TW550F250TH20	B2	250	20	550	20

جدول ۳. ویژگی‌های دینامیکی FRN15B3

Table 2. Dynamic properties of FRN15B3

مُد ۵	مُد ۴	مُد ۳	مُد ۲	مُد ۱	خصوصیت
۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۵۱	۰/۸۹	۲/۴۵	زمان تناوب $T_i$ (ثانیه)
۱/۴۱	۲/۳۶	۴/۴۴	۱۳/۳۲	۷۴/۰۸	درصد مشارکت جرم مودی $W_i/W$

۳- صحت سنجی

در مطالعات عددی و به خصوص زمانی که می‌بایست یک بانک اطلاعات قابل توجه برای استخراج روابط تجربی تهیه دیده شود، عدم اطمینان از صحت مدل ساخته شده می‌تواند به نتایج غیردقیق بیانجامد. برای پرهیز از چنین پیشامدی در این مقاله، تمامی مدل‌ها بر اساس مدل ۹ طبقه نشان داده شده در شکل ۲ صحت‌سنجی شده‌اند. این ساختمان توسط شرکت مهندسی مشاور براندو و جانسون<sup>۲</sup> برای فاز ۲ پروژه SAC طراحی شده است. ابعاد این ساختمان در پلان ۴۵/۷۳ در ۴۵/۷۳ متر و ارتفاع آن ۳۷/۱۹ متر است. کف تا کف هر طبقه ۳/۹۶ ارتفاع داشته و از ۵ دهانه ۹/۱۵ متری تشکیل شده است. قاب‌های پیرامون سازه از نوع مقاوم خمشی می‌باشند که نقش سیستم باربر جانبی را بر عهده دارند. کلیه اتصالات دهانه‌های میانی از نوع ساده و دهانه‌های کناری از نوع صلب می‌باشند. برای ستون از مقطع I شکل با مقاومت تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال استفاده شده که در فاصله ۱/۸۳ متر از تراز طبقه اول، سوم، پنجم و هفتم وصله شده‌اند. این وصله برای انتقال همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی طراحی شده است. در طبقه همکف اتصالات ستون به صورت مفصل مدل‌سازی شده است. تیرهای طبقه نیز از مقطع I بوده که با دال بتنی کف طبقه به صورت مرکب در اندرکنش می‌باشند. برای پرهیز از تغییر مکان افقی سیستم (به دلیل اتصالات مفصل در پایه) در پیرامون طبقه همکف از دیوار برشی بتن مسلح استفاده شده است. بدین ترتیب تراز پایه به کف طبقه اول منتقل شده است. جرم لرزه‌ای طبقه همکف ۹۶۵ تن و جرم لرزه‌ای طبقه اول، دوم تا هشتم و نهم به ترتیب ۱۰۱۰، ۹۸۹ و ۱۰۷۰ تن انتخاب شده است؛ بنابراین جرم کل سازه ۹۰۰۰ تن است. از آنجا که ساختمان ۹ طبقه پروژه SAC<sup>۹</sup> در پلان منظم است، در مقاله حاضر، تنها قاب دو بعدی نماینده قاب پیرامونی شمالی-جنوبی مدل‌سازی شده است. نیمی از جرم لرزه‌ای به این قاب اختصاص داده شده است. برای

نگاشت سرعت زلزله در دسترس باشد، تشخیص آن به مراتب ساده‌تر است. یکی دیگر از معیارهای تشخیص زلزله نزدیک گسل، فاصله سایت تا کانون لرزه‌ای است. معمولاً در زلزله‌های نزدیک گسل فواصل بین ۱۵ تا ۳۰ کیلومتر به عنوان نزدیک گسل تعریف می‌گردد [۲۴]. بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط بیکر تعریف کلی برای تشخیص زلزله نزدیک گسل ارائه شده است. بر اساس این تعریف سه ویژگی می‌بایست به طور همزمان در نظر گرفته شوند تا به یک زلزله لفظ نزدیک گسل اختصاص یابد [۲۴]. این معیارها عبارت‌اند از:

- شاخص پالس از ۰/۸۵ بیشتر باشد.
  - پالس در لحظات اولیه سرعت نگاشت شکل گیرد.
  - PGV<sup>۱</sup> رکورد زلزله بیشتر از ۳۰ متر بر ثانیه باشد.
- برای تفسیر بهتر نتایج، ویژگی‌های ارتعاشی اصلی این سیستم ساختمانی در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

با توجه به توضیحات ارائه شده، در این مقاله ۲۰ رکورد عمود بر گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده انتخاب گردید. برای شناسایی و به جهت اختصار به این دسته از زلزله‌ها عنوان NF-SN<sup>۲</sup> اختصاص داده شده است. خصوصیات این رکوردها در جدول ۴ ارائه شده است. از طرفی برای مقایسه نتایج زلزله‌های نزدیک گسل پالس گونه با زلزله‌های دور از گسل، ۲ رکورد زلزله دور از گسل نیز انتخاب شده است. برای آشنایی با زلزله‌های انتخابی دور از گسل و تاریخچه شتاب‌نگاشت آن‌ها جدول ۵ ارائه شده است. در این مقاله زلزله‌های دور از گسل با FF یا OR نام‌گذاری شده‌اند. مدل تحقیقی به ازای کلیه رکوردهای اشاره شده، مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته است، با این حال جهت اختصار و بحث و بررسی دقیق‌تر صرفاً نتایج تعدادی از آن‌ها در ادامه آورده شده است.

1 . Peak Ground Velocity

2 زلزله نزدیک گسل - مولفه عمود



جدول ۴. مشخصات ۲۰ زلزله نزدیک گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده مؤلفه عمود بر گسل (NF-SN)

Table 4. Characteristics of 20 near-fault earthquakes with the effects

Record No.	Earthquake Name	Year	Station Name	PGA <sup>a</sup> (g)	Mw <sup>b</sup>	R <sup>c</sup> (km)	TP <sup>d</sup> (S)
SN1	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #4	0.61	6.53	7.05	4.61
SN2	Northridge-01	1994	Newhall - Fire Sta	0.18	6.69	5.92	1.03
SN3	Northridge-01	1994	Newhall - W Pico Canyon Rd.	0.33	6.69	5.48	2.40
SN4	Northridge-01	1994	Rinaldi Receiving Sta	0.08	6.69	6.50	1.23
SN5	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta East	0.58	6.69	5.19	3.52
SN6	Kobe, Japan	1995	KJMA	1.05	6.90	0.96	0.95
SN7	Kobe, Japan	1995	Takarazuka	0.94	6.90	0.27	1.42
SN8	Landers	1992	Yermo Fire Station	0.10	7.28	23.62	7.50
SN9	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #6	0.65	6.53	1.35	3.83
SN10	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant	0.12	6.69	5.43	3.52
SN11	Imperial Valley-06	1979	EC County Center FF	0.32	6.53	7.31	4.51
SN12	Imperial Valley-06	1979	EC Meloland Overpass FF	0.44	6.53	0.07	3.34
SN13	Morgan Hill	1984	Coyote Lake Dam (SW Abut)	0.23	6.19	0.53	0.95
SN14	Loma Prieta	1989	Gilroy - Gavilan Coll.	0.25	6.93	9.96	1.79
SN15	Loma Prieta	1989	LGPC	0.84	6.93	3.88	4.39
SN16	Northridge	1994	Westmoreland	0.40	6.70	29.00	0.30
SN17	Northridge-01	1994	Jensen Filter Plant Generator	0.12	6.69	5.43	3.52
SN18	Northridge-01	1994	Sylmar - Converter Sta	0.65	6.69	5.35	3.47
SN19	Northridge-01	1994	Sylmar - Olive View Med FF	0.45	6.69	5.30	3.10
SN20	Kocaeli, Turkey	1999	Gebze	0.30	7.51	10.92	5.78

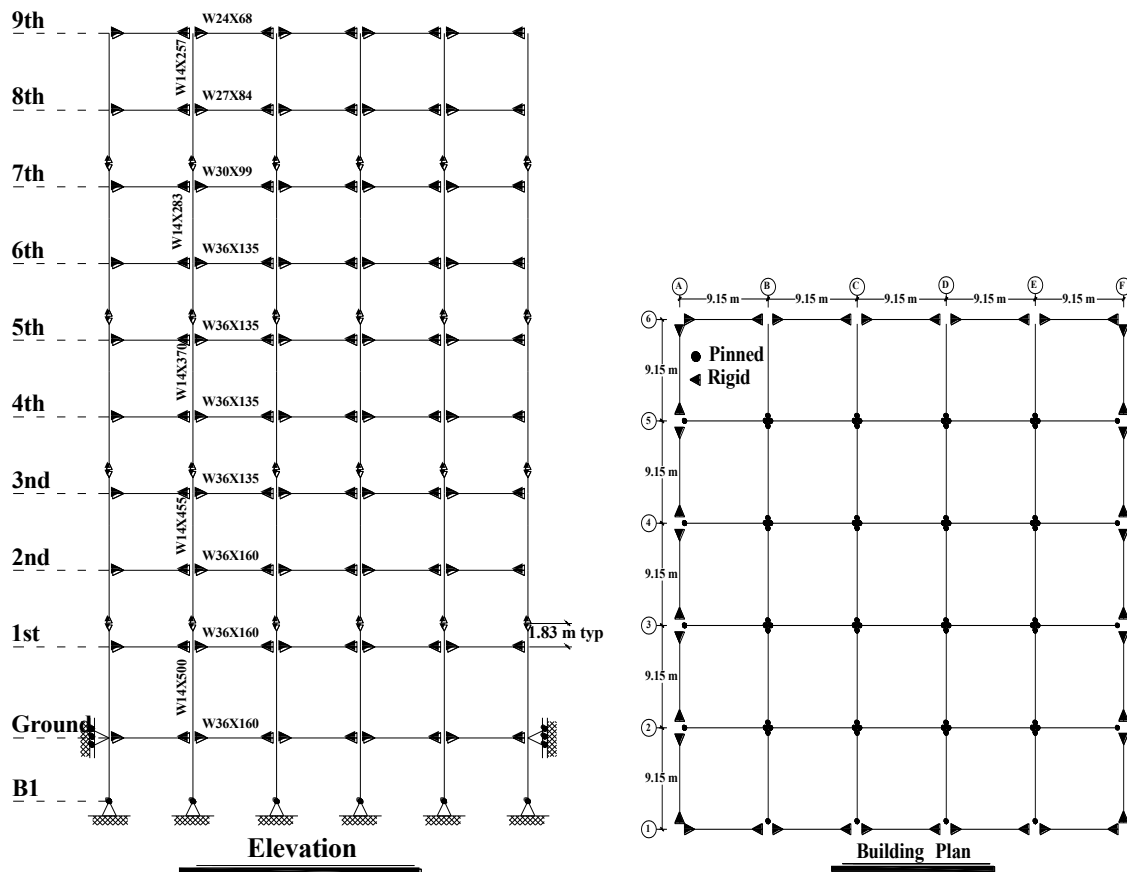
<sup>a</sup> Peak Ground Acceleration, <sup>b</sup>Moment Magnitude, <sup>c</sup> Closest distance from the recording site to the ruptured area, <sup>d</sup> Predominant Period

جدول ۵. مشخصات ۲ زلزله دور از گسل (FF-OR)

Table 5. Characteristics of 2 far-fault earthquakes (FF-OR)

Record No.	Earthquake Name	Year	Station Name	PGA <sup>a</sup> (g)	Mw <sup>b</sup>	R <sup>c</sup> (km)	TP <sup>d</sup> (S)
OR2	Imperial Valley	1992	El Centro Array #6	0.32	6.95	44.60	0.56
OR9	Tabas	1978	Ferdows	0.10	7.35	91.14	0.24

<sup>a</sup> Peak Ground Acceleration, <sup>b</sup>Moment Magnitude, <sup>c</sup> Closest distance from the recording site to the ruptured area, <sup>d</sup> Predominant Period



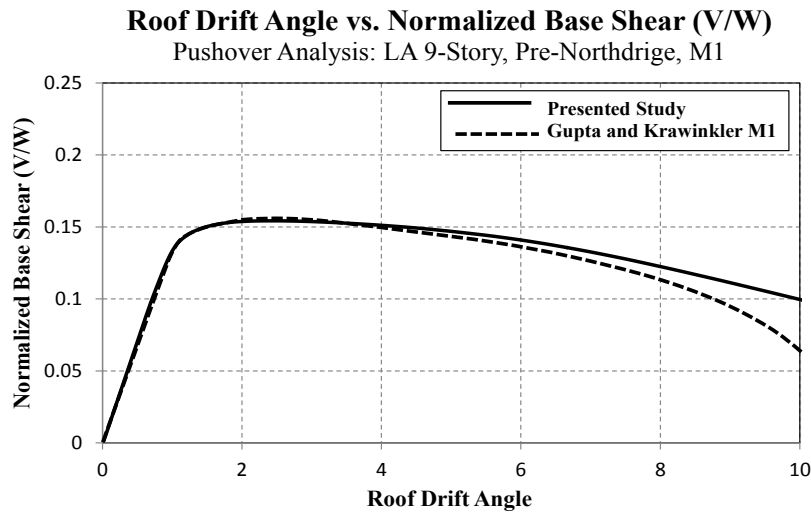
شکل ۲. نمای جانبی و بلان طبقه ساختمان SAC9 [۲۵].

Fig. 2. Elevation and plan of SAC9 building

این مقاله در شکل ۳ نمایش داده شده است. مقایسه بین دو نمودار نشان دهنده دقت قابل قبول در فاز مدل‌سازی این تحقیق است به نحوی که تا زاویه دررفت بام برابر ۴٪ دو نمودار کاملاً بر هم منطبق بوده و هیچ گونه خطایی مشاهده نمی‌شود. دقت دارید که زاویه دررفت بام در اکثر مطالعات برای سازه‌های طراحی شده با ضوابط آخرین ویرایش آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای به ۴٪ محدود می‌شود. از زاویه دررفت ۴٪ تا ۱۰٪ بین دو نمودار اختلاف مشاهده می‌شود. دلیل اختلاف نیز در دو موضوع مستتر است. اول اینکه گوپتا در مدل‌سازی از ایده مفصل پلاستیک متمرکز استفاده کرده است در حالی که در این مطالعه از خاصیت پلاستیسیته گسترده که توسط المان فیبر مدل‌سازی می‌شود، استفاده شده است. ثانیاً در نرم‌افزار مورد استفاده توسط گوپتا شبیه‌سازی اثر  $P-\Delta$  توسط یک ستون مجازی که بر آن بار ثقلی وارد شده و با یک عضو خرابایی با سختی قابل توجه به قاب اصلی

مدل‌سازی، از روش مدل‌سازی M1 که توسط گوپتا و کراوینکلر ارائه شده است، استفاده گردید [۲۵]. تأثیر  $P-\Delta$  در نظر گرفته شده اما اثرات چشمه اتصال صرف نظر شده است. در مدل M1 کلیه تیرها و ستون‌ها به روش خط مرکزی مدل‌سازی شده‌اند. دلیل اصلی انتخاب این سیستم سازه‌ای این است که در این مقاله ارزیابی انواع نیازهای لرزه‌ای غیرخطی در اثر روش‌های مختلف بار افزون و بررسی کفایت هر یک نسبت به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به عنوان هدف اصلی تلقی می‌گردد؛ بنابراین مدل انتخابی می‌بایست بتواند توصیف قابل قبولی از توزیع نیازهای غیرارتجاعی را ارائه کند و با حداقل جزئیات مدل‌سازی، قابل بازتولید در نرم‌افزارهای عددی باشد. بعد از شبیه‌سازی مدل M1 در نرم‌افزار اوپنسیس<sup>۱</sup>، نمودار بار افزون حاصل از مطالعه گوپتا به همراه مدل ۲ بعدی ساخته شده توسط نویسندگان





شکل ۳. مقایسه نمودار بار افزون مدل M1 در مطالعه گوپتا با نمودار عددی مطالعه حاضر در دررفت سرتاسری ۱۰٪ [۲۵].

Fig. 3. Comparison of M1 model overload diagram in Gupta study with numerical diagram of the present study in 10% overall drift

در شکل ۴ مثالی از تاریخچه پاسخ انرژی و طیف انرژی ورودی برای رکوردهای دور از گسل زلزله‌های امپریال-ولی (ایستگاه Oak) و طیس (ایستگاه فردوس) نمایش داده شده است. در شکل ۴-الف و ۴-ب تاریخچه شتاب و سرعت زلزله مورد نظر بوده در حالی که شکل ۴-ج نماینده طیف بازتاب ارتجاعی انرژی ورودی در دو حالت مطلق و نسبی است. ضمن آن که شکل ۴-د نیز انرژی ورودی تجمعی (نسبی و مطلق) را وابسته به زمان نشان می‌دهد. شکل‌های ۴-الف تا ۴-د برای زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی بالا و شکل‌های ۴-ه تا ۴-ح مشابه ۴-الف تا ۴-د ولی برای زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی محدود در نظر گرفته شده است. همچنین برای آن که بتوان مقایسه بین رکوردهای مختلف انجام داد، به طور نمونه صرفاً شکل‌ها برای  $R=2$  تهیه شده و انرژی ورودی به سرعت معادل انرژی به وسیله رابطه  $VEQ=(2E_{AI}/m)^{0.5}$  و  $VEQ'=(2E_{RI}/m)^{0.5}$  به ترتیب برای مقادیر مطلق و نسبی تبدیل شده است [۲۶]. یادآور می‌شود که در این رابطه  $m$  جرم سازه SDOF و  $E_{AI}$  و  $E_{RI}$  به ترتیب انرژی ورودی مطلق و نسبی است. بنابراین منطقی است که از سرعت معادل انرژی برای تعریف اندازه انرژی ورودی استفاده شود. دو تعریف انرژی ورودی عموماً تاریخچه پاسخ انرژی یکسانی را نتیجه می‌دهد و این موضوع برای طیف انرژی ورودی نیز صدق می‌کند. با توجه به شکل ۴-ب از آنجا که برای رکوردهای دور از گسل محتوای فرکانسی بالایی در نگاهت شتاب وجود

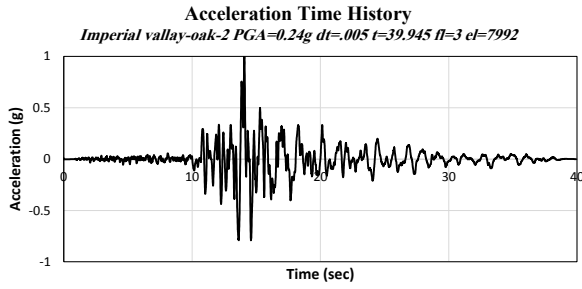
متصل می‌شود، انجام گرفته است که در این مطالعه اثرات غیرخطی شدن هندسه توسط ماتریس‌های انتقال که از ویژگی‌ها برنامه اوپنسیس است تعریف شده است.

#### ۴- بحث و بررسی

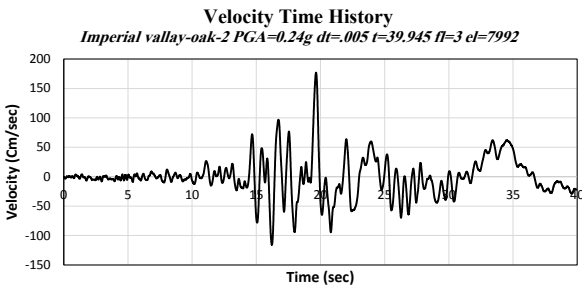
##### ۴-۱- انرژی ورودی لرزه‌ای سازه SDOF

بعد از معرفی زلزله‌های دور از گسل در سه دهه گذشته، زلزله‌های نورثریج ۱۹۹۴، چی چی تایوان ۱۹۹۹ و کوچالی و (ترکیه) نشان دادند که تفاوت‌های فراوانی بین زلزله‌های دور و نزدیک گسل وجود دارد به نحوی که پالس‌های سرعت و شتاب متمایز از مهم‌ترین تفاوت‌ها محسوب می‌گردند. این پالس‌ها که به دلیل اثرات جهت‌پذیری شکل می‌گیرند، از ماهیت جنبشی زمین در مجاورت صفحه گسل سرچشمه می‌گیرند. پالس‌های سرعت و مشخصه‌های پالس‌های شتاب که باعث توسعه ذاتی پالس سرعت ذاتی می‌گردند، نیز نقش عمده‌ای را در محاسبه و تعیین انرژی ورودی مطلق و نسبی حاصل از زلزله‌های نزدیک گسل ایفا می‌نمایند و باعث می‌شوند این مقادیر به شکل عمده‌ای با زلزله‌های دور از گسل تفاوت داشته باشند.

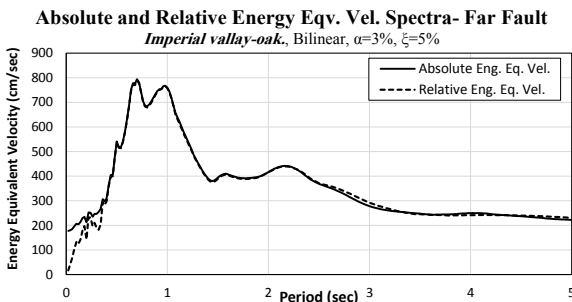
در زلزله‌های دور از گسل انرژی ورودی به صورت تجمعی افزایش می‌یابد و در انتهای حرکت‌های زمین به مقدار حداکثر خود می‌رسد. معمولاً از این حداکثر انرژی حاصل برای تولید طیف انرژی ورودی استفاده می‌شود.



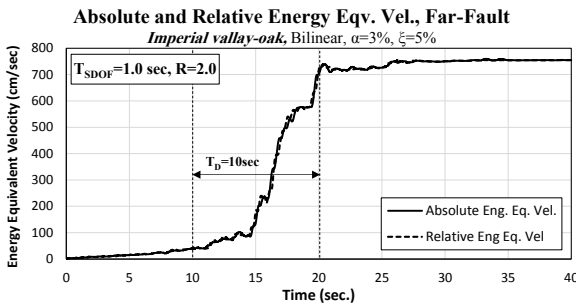
ه) تاریخچه زمانی شتاب - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی محدود



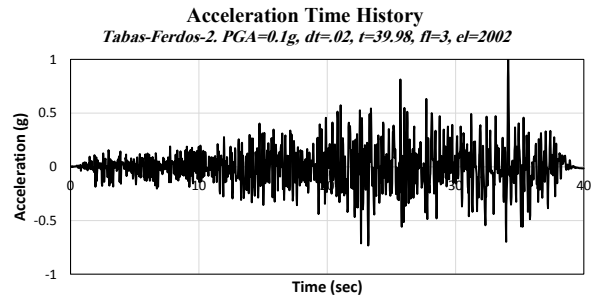
و) تاریخچه زمانی سرعت - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی محدود



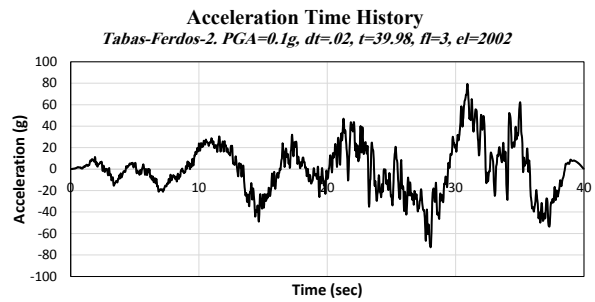
ز) طیف بازتاب ارتجاعی انرژی ورودی - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی محدود



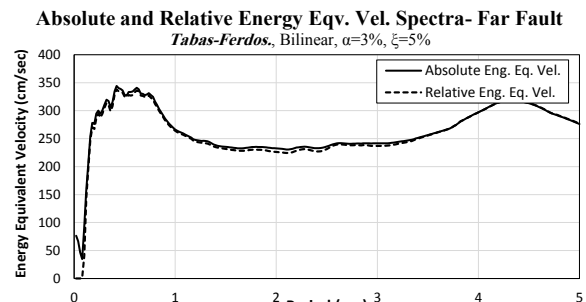
ح) انرژی ورودی تجمعی (نسبی و مطلق) - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی محدود



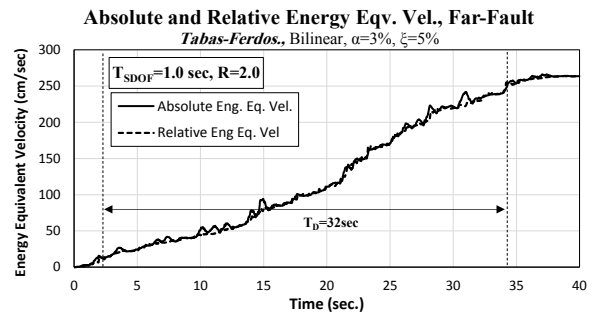
الف) تاریخچه زمانی شتاب - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی بالا



ب) تاریخچه زمانی سرعت - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی بالا



ج) طیف بازتاب ارتجاعی انرژی ورودی - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی بالا



د) انرژی ورودی تجمعی (نسبی و مطلق) - زلزله دور از گسل با محتوای فرکانسی بالا

شکل ۴. تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و سرعت معادل انرژی، VEQ، به همراه طیف سرعت معادل انرژی برای دو زلزله دور از گسل،  $R = 2$

Fig. 4. Time history of acceleration, velocity and velocity equivalent energy, VEQ, plus the spectrum of energy equivalent velocity for two far-field earthquakes,  $R = 2$

ورودی در زمان بسیار کوتاهی و با حداقل زمان مورد نیاز تجمع انرژی به مقدار بیشینه خود می‌رسد. به عبارتی تفاوت بین انرژی ورودی مطلق و نسبی در یک بازه زمانی اندک به شدت افزایش می‌یابد. این تفاوت به دو دلیل قابل توجیه است:

- انرژی جنبشی زمین از پاسخ سازه و پریود طیفی متناظر (غالباً مقادیر مثبتی را داراست) مستقل است.

- کار افزایشی انجام شده توسط شتاب زمین بر پاسخ نسبی سیستم مثبت خواهد بود اگر سرعت زمین هم فاز با سرعت نسبی سازه باشد.

بنابراین هنگامی که سرعت زمین غیرهم فاز با سرعت نسبی سازه باشد، اختلاف بین دو تعریف ارائه شده برای انرژی به حداقل خود منجر می‌گردد. در شکل ۵ شتاب، سرعت، تاریخچه زمانی انرژی و طیف انرژی متناظر با زلزله‌های نورثریج (ایستگاه نیوهال) و نورثریج (ایستگاه جنسن فیلتر پلنت) برای  $R=2$ ، نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که از شکل ۵ مشاهده می‌شود در رکورد سرعت، پالس سرعت دو جهته علامت بارز جهت‌پذیری پیش‌رونده است. با مشاهده این شکل‌های ۵-د و ۵-ح مشخص می‌گردد برای حالتی که پالس واضح در شتاب وجود دارد، در پریودهای کم و زیاد، انرژی ورودی نسبی و مطلق با هم اختلاف دارند. از طرفی معمولاً انرژی ورودی با یک جهش قابل ملاحظه همراه است. در این محدوده تاریخچه انرژی تجمع یافته نسبی و مطلق با هم اختلاف دارند. این در حالی است که اگر شتاب زلزله نزدیک گسل فاقد یک پالس بزرگ در رکورد شتاب باشند، علی‌رغم وجود پالس محسوس در تاریخچه رکورد سرعت، مقادیر انرژی طیفی نسبی و مطلق به هم نزدیک می‌باشند.

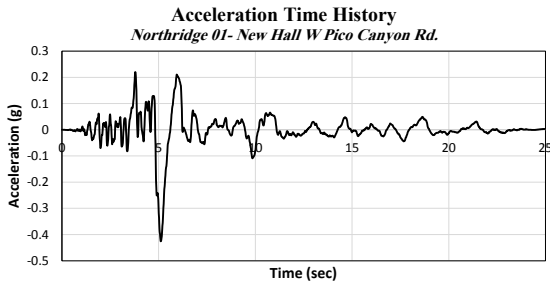
مشاهدات فوق را می‌توان به صورت نسبت انرژی ورودی مطلق به نسبی برای کلیه رکوردهای نزدیک گسل این مقاله و در قالب طیف انرژی هم پایه شده نمایش داد. این دو پارامتر در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. در این شکل محور قایم نسبت انرژی مطلق به نسبی و محور افقی دوره تناوب است. این طیف‌های هم پایه شده برای سه حالت  $R$  برابر با ۲، ۴ و ۶ ترسیم شده‌اند تا بتوان اثرات غیرخطی شدن را بر این نسبت مشاهده نمود. نتایج حاصله در مطالعه کالکان (۲۰۰۶) [۲۶]، چه از منظر شکل ظاهری نمودارهای حاصله و چه از منظر مقادیر، به خوبی نتایج حاصله از نمونه‌های تاریخچه‌های زمانی شتاب، سرعت و سرعت معادل انرژی برای زلزله‌های نزدیک گسل دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده را تصدیق می‌نماید.

لذا در تاریخچه زمانی سرعت افزایش شدید چندگانه دیده می‌شود. این افزایش‌های چندگانه باعث می‌شوند انرژی ورودی به صورت فزاینده رشد داشته و توسط چرخه‌های تغییر شکل غیرخطی چندگانه به خسارت جمعی مرتبط می‌شوند (پدیده خستگی با سیکل کم)؛ بنابراین زمان تداوم مؤثر زلزله عامل مهم در محاسبه حداکثر انرژی ورودی زلزله دور محسوب می‌شود.

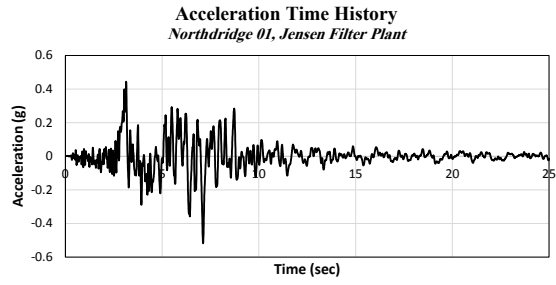
از سوی دیگر، زلزله‌های نزدیک گسل، دارای پالس سرعت با دوره تناوب بلند ذاتی بوده که به طور نمونه در شکل ۵ نتایج مربوط به زلزله‌های نورثریج (ایستگاه نیوهال<sup>۱</sup>) و نورثریج (ایستگاه جنسن فیلتر پلنت<sup>۲</sup>) نمایش داده شده‌اند. این دو رکورد دارای اثر جهت‌پذیری رو به جلو می‌باشند. این حالت زمانی روی می‌دهد که سرعت انتشار گسل با سرعت موج برشی نزدیک است. تغییر شکل وابسته این سرعت موج برشی در جهت عمود بر گسل برای گسل‌های امتداد لغز بزرگ‌تر است. مهم‌ترین وجه تمایز بین رکوردهای دارای اثرات جهت‌پذیری، وجود پالس متمایز در تاریخچه سرعت است. این پالس ممکن است به دلیل بیشینه شتاب با فرکانس بالا (مشابه آنچه در زلزله‌های دور از گسل وجود دارد) شکل بگیرند که در این خصوص می‌توان به رکورد زلزله نورثریج (ایستگاه جنسن فیلتر پلنت) مراجعه نمود. در این رکورد همان‌گونه که در شکل ۵-الف ملاحظه می‌شود رخداد زمین لرزه با فرکانس بالا و بدون پالس قابل تمایز دیده می‌شود. همچنین ممکن است همانند آنچه در شکل ۵-ه دیده می‌شود، در رکورد شتاب یک پالس مشهود دیده شود. این تفاوت می‌تواند انرژی ورودی را تحت تأثیر قرار دهد بسته به اینکه از تعریف نسبی یا مطلق انرژی استفاده نمود. مطالعات نشان می‌دهد که رکوردهای با اثرات جهت‌پذیری که پالس شتاب مشهودی ندارند دارای طیف تاریخچه انرژی مشابهی (مطلق و نسبی) می‌باشند [۲۶]. این در حالی است که وجود پالس مشهود در رکورد شتاب باعث می‌شود که بین مقادیر انرژی نسبی و مطلق در پریودهای کوتاه و بلند اختلاف به وجود می‌آید. در پریودهای میانی تفاوت بین دو نوع انرژی قابل چشم‌پوشی است اما در پریودهای بلند انرژی نسبی عموماً بزرگ‌تر از انرژی مطلق است. چنین نتیجه‌گیری برای رکوردهای مختلف با اثرات جهت‌پذیری که در رکورد شتاب آن‌ها پالس مشهود قابل رویت است، دیده می‌شود. مقایسه تاریخچه انرژی-زمان دو رکورد مذکور جنبه پراهمیت دیگری از پالس‌های شتاب را نمایان می‌سازد. اگر رکورد شتاب غیرپالسی است، انرژی ورودی به صورت تدریجی باگذشت زمان افزایش یافته و در انتهای شتاب با مقدار حداکثر خود می‌رسد. در حالی که برای رکورد با پالس مشهود در شتاب‌نگاشت، انرژی

1 New Hall

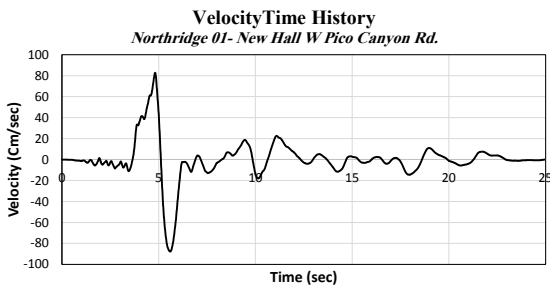
2 Jensen Filter Plant



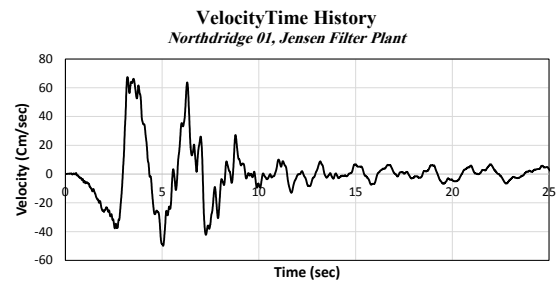
ه) تاریخچه زمانی شتاب - زلزله نزدیک گسل با پالس مشهود در شتاب



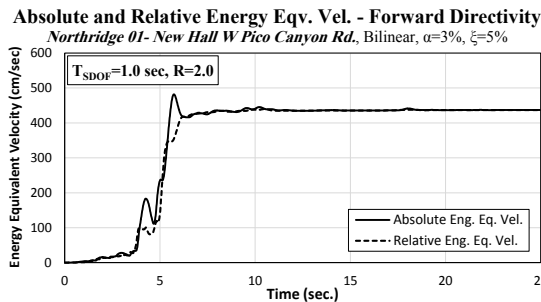
الف) تاریخچه زمانی شتاب - زلزله نزدیک گسل بدون پالس متمایز در شتاب



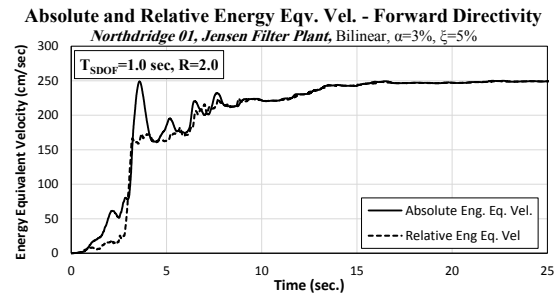
و) تاریخچه زمانی سرعت - زلزله نزدیک گسل با پالس مشهود در شتاب



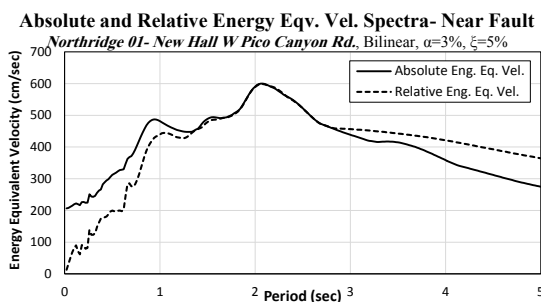
ب) تاریخچه زمانی سرعت - زلزله نزدیک گسل بدون پالس متمایز در شتاب



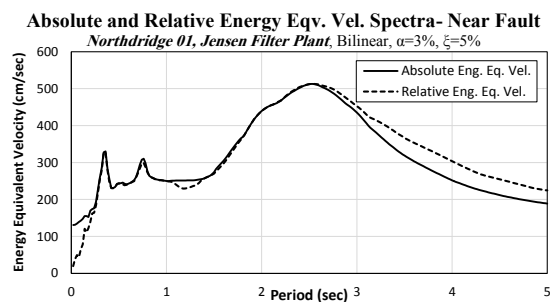
ز) طیف بازتاب ارتجاعي انرژی ورودی - زلزله نزدیک گسل با پالس مشهود در شتاب



ج) طیف بازتاب ارتجاعي انرژی ورودی - زلزله نزدیک گسل بدون پالس متمایز در شتاب



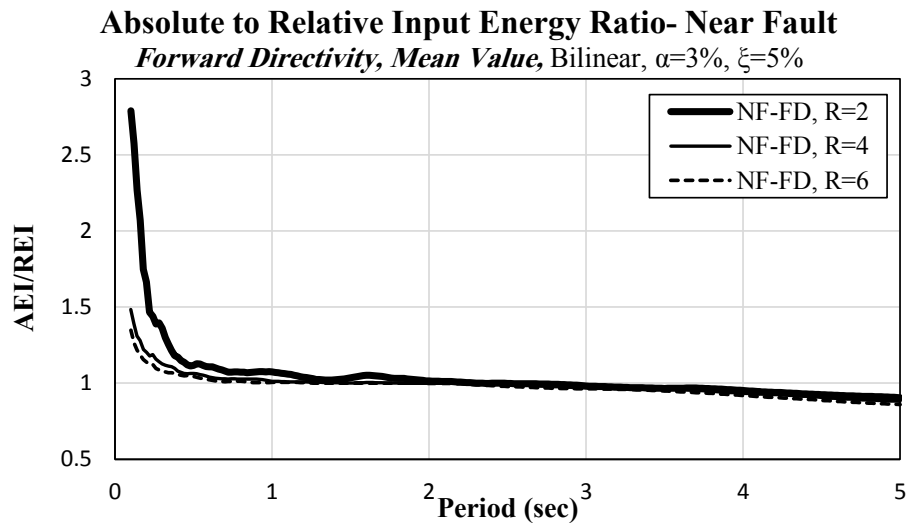
ح) طیف بازتاب ارتجاعي انرژی ورودی - زلزله نزدیک گسل با پالس مشهود در شتاب



د) انرژی ورودی تجمعی (نسبی و مطلق) - زلزله نزدیک گسل بدون پالس متمایز در شتاب

شکل ۵. تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و سرعت معادل انرژی، VEQ، به همراه طیف سرعت معادل انرژی برای دو زلزله نزدیک گسل با و بدون پالس مشهود در رکورد شتاب،  $R = 2$

Fig. 5. Time history of acceleration, velocity and energy equivalent velocity, VEQ, plus energy velocity spectrum for two near-fault earthquakes with and without pulse evident in the acceleration record,  $R = 2$



شکل ۶. تغییرات نسبت انرژی مطلق به نسبی در برابر دوره تناوب برای  $R = 2, 4, 6$  در زلزله نزدیک گسل

Fig. 6. . Changes in the ratio of absolute energy to relative versus periodicity for  $R = 2, 4, 6$  in near-fault earthquakes

محسوب می‌شود. در به رسمیت شناختن این موضوع، اندیس‌های مختلفی بر پایه توازن انرژی توسعه داده شده‌اند [۷-۱۰]. کلیه اندیس‌های پیشنهادی از فرمول نویسی مطلق یا نسبی بهره می‌گیرند و توجهی به مشخصات زلزله اعم از طبیعت چرخه‌ای زلزله‌های دور از گسل یا طبیعت پالس گونه زلزله‌های نزدیک گسل ندارند.

رکوردهای دور از گسل دارای طبیعت چرخه‌ای می‌باشند؛ بنابراین سطح خسارت‌های سازه‌ای به تنهایی به حداکثر تغییر شکل وابسته نیست زیرا مدت زمان تداوم خستگی با سیکل کم نیز تأثیر قابل توجهی بر خسارت‌های سازه‌ای دارد [۲۷-۲۹]. این موضوع نشان می‌دهد که می‌بایست انرژی تجمعی ورودی را به یک پارامتر یا اندیس متداول که بتواند به شکل مؤثری پتانسیل خسارت را تعریف نماید، وابسته ساخت. این در حالی است که برای زلزله‌های نزدیک گسل، بخش عمده‌ای از خسارت‌های سازه‌ای تنها در چند سیکل پلاستیک محدود شکل می‌گیرد که به دلیل نیاز انرژی آنی وابسته به اثرات پالس است. در این حالت مفهوم خستگی با سیکل کم عموماً بی‌معنی بوده و خسارت تجمعی مستقیماً با حداکثر تغییر شکل سازه مرتبط می‌گردد. از طرفی به کارگیری انرژی تجمعی ورودی به عنوان اندیس پاسخ ممکن است به نتایج غیردقیق برای زلزله‌های نزدیک گسل دارای پالس مشهود در رکورد شتاب بیانجامد زیرا حداکثر نیاز انرژی در چنین رکوردی دارای یک

#### ۴-۲- رابطه بین انرژی لرزه‌ای ورودی و بازتاب سازه SDOF

بنیادی‌ترین هدف تعریف شده در طراحی بر اساس عملکرد، این است که طرح لرزه‌ای تضمین نماید المان‌های سازه‌ای شکل‌پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی کافی را به نحوی داشته باشند که سطوح خسارت وارد بر سازه برحسب زاویه دررفت طبقه و تغییر شکل اعضا به مقادیر حدی متناظر با سطوح عملکردی مورد نظر طراح محدود شوند. بدیهی است ارزیابی و تحقق این اصل اساسی در فاز غیرارتجاعی معنی پیدا می‌کند. موضوع کلیدی در این بحث، شناسایی عملکرد لرزه‌ای سازه متناظر با ظرفیت نهایی تسلیم اعضا و مقایسه آن‌ها با بیشینه پاسخ تغییر مکانی است. بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد برای تأمین این مفهوم کلیدی، استفاده از فرمول‌بندی بر پایه توازن انرژی یک روش کارآمد و مؤثر در ارزیابی لرزه‌ای است. به کمک این فرمول نویسی می‌توان ارزیابی منطقی‌تری از مکانیسم انرژی جذب شده و تلف شده به دست آورده و نحوه ارتباط آن با اندازه انرژی‌های ورودی بر سازه مشخص گردد. به همین دلیل به نظر می‌رسد معرفی پارامترهای مناسب که بر اساس توازن انرژی پایه‌ریزی شده‌اند می‌توانند به نتایج قابل اتکایی از درجه تخمین نیازهای بیشینه بیانجامد. به علاوه می‌توان درجه خرابی‌های القا شده توسط زلزله را نیز کمیته نمود. ارتقا و توسعه این دو مفهوم اساسی به تدریج به عنوان یک پیش‌نیاز قطعی در مهندسی طراحی بر اساس عملکرد

می‌کند که معادل کار انجام شده توسط کل نیروی برش پایه در اثر حرکت زمین است. از سوی دیگر،  $E_{RI}$ ، نماینده کار انجام شده توسط سازه با تکیه‌گاه ثابت در اثر نیروی جانبی معادل است. به علاوه  $E_{\xi}$ ، انرژی میرایی و  $E_s$ ، انرژی کرنشی ارتجاعی است. می‌توان رابطه‌ی (۸) را به شکل رابطه‌ی (۹) نوشت:

$$m \frac{\dot{u}}{2} + \int (cu) du + \int f(u) du = - \int m (\ddot{u}_g) du = - \int m \ddot{u}_g u dt \quad (9)$$

استفاده از شکل ۷ دارای این مزیت است که به کمک آن می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از نیازهای لرزه‌ای و رابطه آن‌ها با انواع مؤلفه‌های انرژی ورودی به دست آورد. با توجه به این که خسارت وارد بر مؤلفه‌های سازه مستقیماً به انرژی تلف شده وابسته است، شکل ۷ نشان می‌دهد که انرژی جنبشی در هنگام برعکس شدن سرعت سازه حذف می‌گردد بنابراین مجموع انرژی میرایی و چرخه‌ای با انرژی ورودی نسبی برابر می‌شود. این حالت را می‌توان بر اساس نقاط گوشه علامت زده شده در چرخه هیستریزس نیرو-تغییر شکل نیز مشاهده نمود. توازن انرژی بین دونقطه از بیشینه پاسخ را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱۰) نوشت:

$$\Delta E_H + \Delta E_D = \Delta E_{RI} \quad (10)$$

جایی که  $\Delta E_{EH}$ ، انرژی رشد یافته در اثر انرژی کرنشی تجدیدپذیر ( $\Delta E_{ES}$ ) و انرژی کرنشی تجدید ناپذیر ( $\Delta E_{EP}$ ) و  $\Delta E_{ED}$ ، انرژی رشد یافته در اثر انرژی میرایی ویسکوز است. بیشینه سمت راست رابطه‌ی (۱۰)،  $\Delta E_{ERI,max}$  را می‌توان با عنوان انرژی چرخه‌ای مؤثر،  $ECE^4$ ، در نظر گرفت. طبق تعریف، ECE عبارت است از کار انجام شده در خلال یک بازه زمان محدود که در ابتدا و انتها آن سرعت سازه برعکس می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، ECE بلافاصله بعد از حداکثر تغییر شکل سازه به مقدار بیشینه خود می‌رسد. شایان ذکر است که ECE علاوه بر آن که به مشخصات زلزله وابسته است، به ویژگی‌های دینامیکی سازه (دوره تناوب، قانون هیستریزس، میرایی، شکل‌پذیری) وابسته است. با اینکه روابط ۶ و ۱۰

پیک قابل توجه در فازهای اولیه پاسخ تاریخچه زمانی انرژی است که باعث می‌شود اثر چنین پدیده‌ای بحرانی‌تر از انرژی ورودی تجمع یافته در انتهای رکورد زلزله باشد. این جهش قابل توجه در انرژی ممکن است در تاریخچه زمانی انرژی نسبی یا مطلق دیده شوند. این موضوع به نسبت پریرود سازه به پریرود غالب پالس زلزله وابسته است؛ بنابراین اختلاف بین تاریخچه زمانی انرژی زلزله و به تبع آن طیف انرژی در دو حالت نسبی و مطلق افزایش می‌یابد. در حقیقت این موضوع علاوه بر اینکه برای ارزیابی قابلیت اطمینان اندیس‌های مختلف پاسخ که بر اساس فرمول‌بندی انرژی نسبی و مطلق پیشنهاد شده‌اند حائز اهمیت است، در مدیریت تعاریف مختلف انرژی ورودی زلزله و وابستگی آن‌ها به نیازهای تغییر شکل بیشینه وابستگی دارد. به همین دلیل است که در این بخش از مقاله ارتباط نیازهای سازه با مشخصات زلزله ورودی بررسی شده است. بدین منظور از تعریف حداکثر انرژی چرخه‌ای مؤثر، ECE<sup>۱</sup>، که توسط کالکان (۲۰۰۶) پیشنهاد گردید [۲۶]، استفاده شده است. این پارامتر معرف حداکثر مقادیر انرژی تلف شده در خلال حلقه‌های هیستریزس و میرایی است (در بازه زمانی مورد نیاز برای آن که سرعت سیستم معکوس شود). برای تعیین رابطه بین ECE و حداکثر تغییر مکان سازه، از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سیستم SDOF با دوره تناوب یک ثانیه و متناظر با  $R=2$  استفاده شده است. در شکل ۷ تاریخچه انرژی معادل سرعت جمعی، سرعت سازه، تغییر مکان و منحنی چرخه‌ای (هیستریزس) حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه SDOF با مشخصات  $T=1.0$  Sec و  $R=2.0$  در برابر دو زلزله دور و نزدیک گسل ارائه شده است. شتاب‌نگاشت زلزله نورث‌ریج (ایستگاه پیکو کانیون<sup>۲</sup>) از نوع نزدیک گسل و شتاب‌نگاشت زلزله امپریال والی<sup>۳</sup> (ایستگاه OAK) از نوع دور از گسل است. از آن جایی که در این بخش رکوردهای مورد استفاده مقیاس نشده‌اند، با تغییر در مقاومت تسلیم، ضریب R مورد نظر تأمین گردید. در این شکل از فرمول‌بندی انرژی ورودی نسبی مطابق رابطه‌ی (۸) استفاده شده است:

$$E_{KR} + E_{\xi} + E_s + E_H = E_{RI} \quad (8)$$

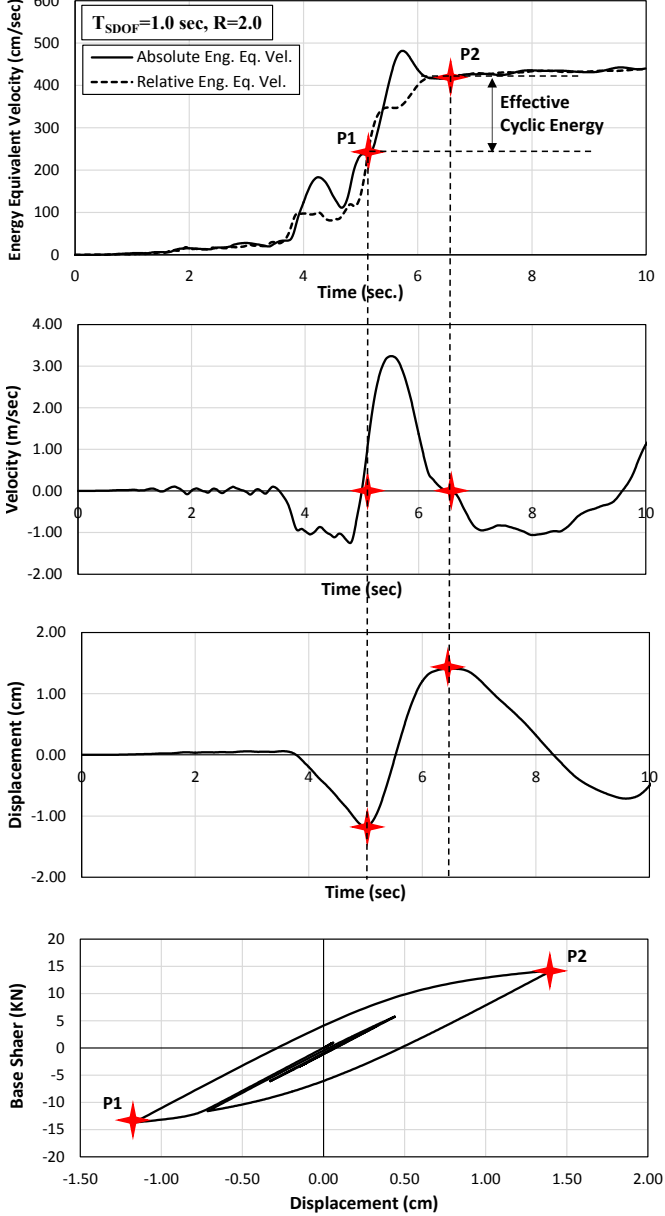
جایی که،  $E_{RI}$ ، انرژی ورودی نسبی،  $E_{KR}$ ، انرژی جنبشی نسبی است.  $E_I$ ، نماینده کاری است که به وسیله نیروی اینرسی ( $m\ddot{u}_t$ ) بر سازه اثر

- 1 Effective Cyclic Energy (ECE)
- 2 Pico Canyon
- 3 Imperial Wally



**Absolute and Relative Energy Eqv. Vel. - Forward Directivity**

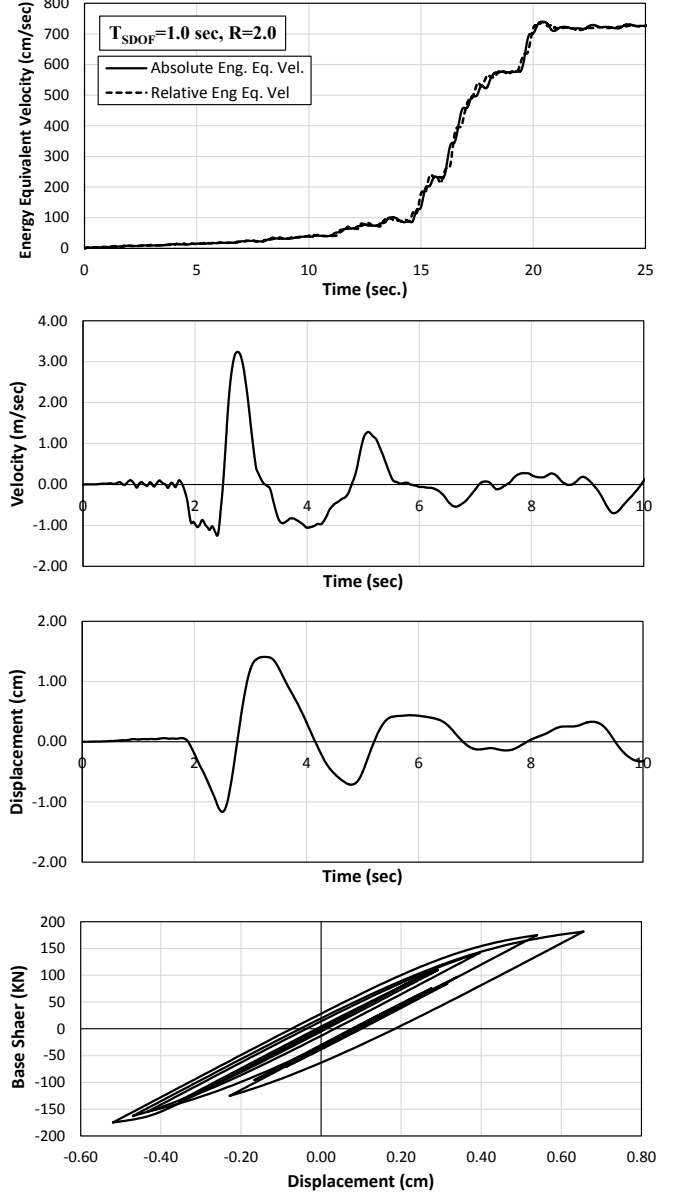
*Northridge 01- New Hall W Pico Canyon Rd., Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$*



ب) زلزله نزدیک به گسل

**Absolute and Relative Energy Eqv. Vel., Far-Fault**

*Imperial valley-oak, Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$*



الف) زلزله دور از گسل

شکل ۷. رابطه بین انرژی چرخه‌ای مؤثر، ECE و پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و منحنی چرخه‌ای سازه SDOF برای  $R=2$  و  $T=1.0\text{Sec}$  در دو حالت نزدیک و دور از گسل (برای زلزله دور ECE محاسبه نشده است).

Fig. 7. Relationship between effective cycle energy, ECE and displacement responses, velocity and cycle curve of SDOF structure for  $R = 2$  and  $T = 1.0\text{Sec}$  in both near and far fault modes

۱۲) را می‌توان بر اساس تفاوت در فرمول نویسی انرژی جنبشی نوشت به نحوی که بر اساس پیشنهاد کالکان (۲۰۰۶) [۲۶]، داریم:

$$E_{AI} - E_{RI} = \frac{1}{2} m \dot{u}_g^2 + \sum_{j=1}^N m_j \dot{u}_g \dot{u}_{(j)} \quad (13)$$

#### ۴-۴- انرژی ورودی و پتانسیل تخریب زلزله‌های نزدیک گسل در سیستم MDOF

در این بخش رابطه بین پتانسیل تخریب زلزله‌های نزدیک گسل و محتوای انرژی ورودی با بررسی پاسخ قاب FRN15B3 ارزیابی می‌گردد. مدل مورد نظر در برابر دو رکورد نزدیک گسل با اثرات جهت‌پذیری تحلیل شده است. در انتخاب این دو رکورد دقت شده است که یکی از آن‌ها دارای پالس مشهود در تاریخچه شتاب بوده و دیگری فاقد پالس در شتاب‌نگاشت باشد؛ اما هر دو رکورد دارای پالس مشهود در تاریخچه سرعت خود می‌باشند. تلاش می‌شود تا رابطه بین انرژی ورودی و نیازهای لرزه‌ای به صورت کمینه بیان شوند. دو رکورد انتخابی مربوط به زلزله‌های نورث‌ریج (ایستگاه نیوهال) و لندرز<sup>۲</sup> (ایستگاه فایر استیشن<sup>۳</sup>) می‌باشند که به ترتیب با شناسه SN3 و SN8 ارائه شده‌اند. در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب تاریخچه انرژی ورودی تجمعی نسبی و مطلق به همراه انرژی جنبشی برای ۴ تراز مختلف رفتار غیرخطی (R=1.0, 2.0, 4.0, 6.0) ترسیم شده‌اند که اولی مربوط به رکورد SN3 و دومی مربوط به SN8 است. لازم به یادآوری است که برای SN3، پالس مشهود در شتاب‌نگاشت وجود دارد در حالی که در رکورد SN8، این پالس تنها در رکورد سرعت وجود دارد. دلیل انتخاب مدل FRN15B3 این است که این مدل در رده سازه‌های میان مرتبه متداول در ایران از نظر ارتفاع قرار داشته بنابراین اثر موده‌های بالاتر و درجات آزادی به خوبی در آن نمود پیدا می‌کند. به علاوه در شکل ۱۰ حداکثر دررفت بین طبقه‌ای برای مقادیر مختلف R نمایش داده شده‌اند. ارزیابی شکل ۱۰ نشان می‌دهد برای R=۲، چنانچه در تاریخچه شتاب زلزله پالس مشهود وجود داشته باشد (مشابه رکورد SN3)، بیشینه نیاز دررفت طبقه عمدتاً در طبقات فوقانی شکل می‌گیرد. نکته دیگر اینکه برای رکورد SN3، افزایش R باعث گردید از تأثیر موده‌های بالاتر کم شده و عمده پاسخ در مود اول سازه باشد. این موضوع با تجمع بیشینه IDR<sup>۴</sup> در طبقات تحتانی سازه

بر اساس انرژی ورودی نسبی محاسبه شده‌اند، ECE چندان به انتخاب تعریف انرژی اعم از مطلق یا نسبی وابسته نیست. به علاوه مراجعه به شکل ۷ نشان می‌دهد که برای زلزله‌های دور از گسل، تعریف ECE چندان میسر نیست، زیرا در این نوع زلزله تغییر شکل‌های غیرارتجاعی با تعداد سیکل بیشتری تلف شده بنابراین سازه با تعداد دفعات بیشتری تراز تسلیم را تجربه می‌کند. در چنین حالتی استفاده از مجموع انرژی تلف شده می‌تواند به عنوان یک شاخص مناسب برای درک رفتار غیرخطی سازه استفاده گردد.

#### ۴-۳- انرژی ورودی لرزه‌ای به سیستم MDOF

فرم عمومی انرژی ورودی مطلق برای سازه SDOF در رابطه‌ی (۴) توسط یانگ و برترو به سیستم n طبقه چند درجه آزادی به شکل زیر تعمیم و توسعه داده شده است [۶]:

$$\frac{1}{2} \{\dot{u}_t\}^T [m] \{\dot{u}_t\} + \int (\{\dot{u}_t\}^T [c]) d\{u\} + \int \{f(u)\}^T d\{u\} = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_{t(j)} \right) du_g = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_{t(j)} \right) \dot{u}_g dt \quad (11)$$

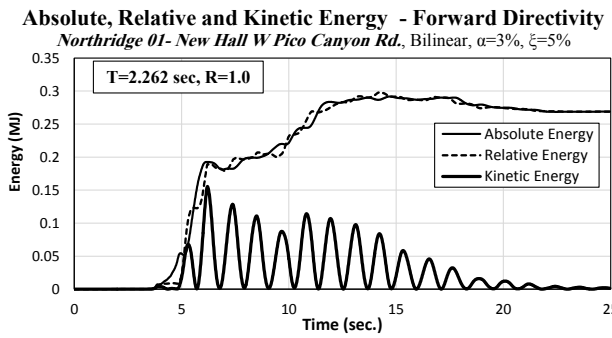
در رابطه فوق، [m]، ماتریس جرم قطری، [c]، ماتریس میرایی و [۱] بردار تغییر مکان نسبی طبقه است. به علاوه  $m_j$  جرم متمرکز طبقه j و  $u_{t(j)}$  شتاب مطلق ثبت شده در طبقه j ام است و N تعداد طبقات سازه است. سمت چپ رابطه (۱۱) متناظر با کل کار انجام شده توسط نیروی اینرسی ( $m_j u_{t(j)}$ ) در هر طبقه در اثر تغییر مکان زمین،  $u_g$ ، در تراز فونداسیون است. به همین روش می‌توان انرژی نسبی سیستم MDOF را به شکل زیر برآورد نمود:

$$\frac{1}{2} \{\dot{u}\}^T [m] \{\dot{u}\} + \int (\{\dot{u}\} [c]) d\{u\} + \int \{f(u)\} d\{u\} = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_g \right) d\{u\} = \int \left( \sum_{j=1}^N m_j \ddot{u}_g \dot{u}_{(j)} \right) dt \quad (12)$$

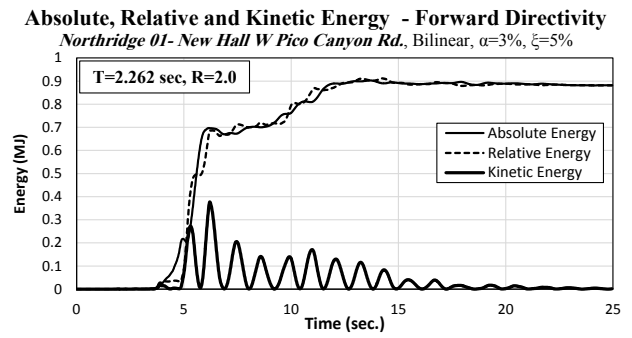
تفاوت بین فرمول نویسی انرژی به صورت نسبی و مطلق (روابط ۱۱ و

1 . Multi Degree of Freedom

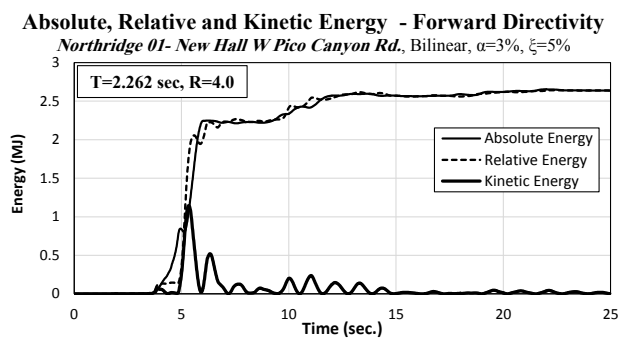
2 . Landers  
3 . Yermo Fire Station  
4 . Inter-story Drift Ratio



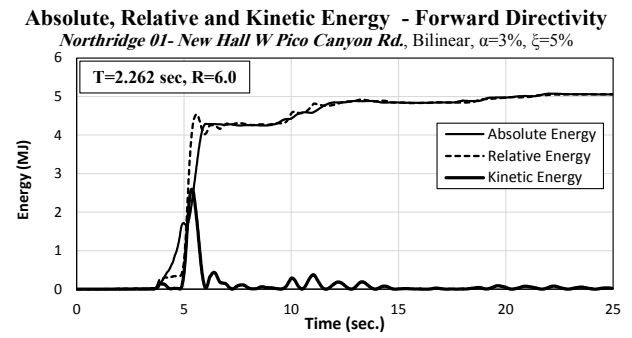
(a) R=1.0



(b) R=2.0



(c) R=4.0



(d) R=6.0

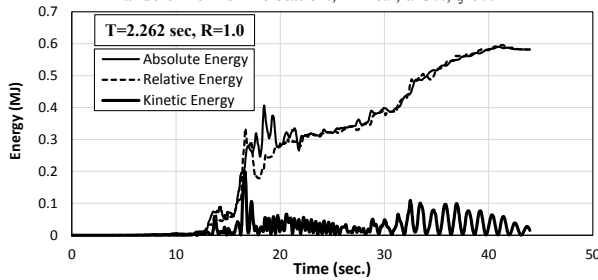
شکل ۸. تاریخچه انرژی ورودی نسبی، مطلق و انرژی جنبشی در اثر زلزله نورتریج-نیوهال (SN3) برای  $R = 1, 2, 4, 6$  و FRN15B3 (Sec. 2.262=T)

Fig. 8. History of Relative, Absolute, and Kinetic Energy of Northridge-Newhall Earthquake (SN3) for  $R = 1, 2, 4, 6$ , and FRN15B3 ( $T = 2.262$  Sec.)

مطلق رکورد SN3 و SN8 نشان می‌دهد که تراز انرژی ورودی در رکورد SN8 به مراتب بزرگ‌تر از SN3 است. با این حال برای  $R$  های کوچک،  $IDR_{max}$  هر دو شتاب‌نگاشت با هم برابر است. در توجیه این موضوع می‌توان گفت که در رکورد SN3 حجم قابل توجهی از انرژی ورودی زلزله در مدت زمان کوتاهی (تقریباً ۲ ثانیه) به سازه وارد می‌شود. لذا سازه فرصت کافی برای عکس‌العمل به این تراز انرژی تجمع یافته را نخواهد داشت؛ بنابراین اینکه انرژی ورودی زلزله بیشتر باشد، نیازهای تحمیلی به سازه بیشتر است نتیجه‌گیری درستی نیست بلکه اندازه تقاضای تغییر شکل به زمان مؤثر انرژی ورودی تجمعی نیز وابسته است. به علاوه، بزرگ‌ترین مقدار  $IDR_{max}$  دقیقاً به اندازه انرژی تجمعی ورودی وابسته است. هر چه قدر انرژی تجمعی ورودی بیشتر باشد، نیازهای بزرگ‌تری در ارتفاع سازه

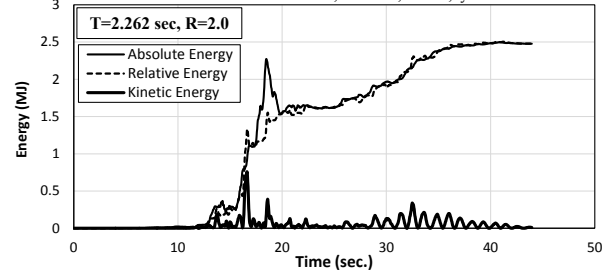
قابل توجیه است. البته اینکه پریود پالس تا چه اندازه به پریود مدهای دوم به بعد نزدیک باشد، می‌تواند فاکتور کلیدی در تأثیرپذیری توزیع دررفت در ارتفاع از مدهای بالا قلمداد گردد. این در حالی است که برای  $R=2$  نتایج رکورد SN8 (جایی که انرژی تجمعی ورودی به تدریج افزایش می‌یابد) نشان می‌دهد علاوه بر فعال شده اثر مدهای بالاتر در طبقات فوقانی، نیازهای دررفت در بخش‌های پایین سازه نیز قابل توجه می‌باشند. با افزایش  $R$  متناظر با نتایج SN8 تجمع نیازهای بیشینه در طبقات تحتانی قرار گرفته و به نوعی اثر مود اول بر پاسخ نهایی سازه غلبه پیدا می‌کند. نتایج به دست آمده در این قسمت با مطالعه انجام شده توسط یانگ و برترو (۱۹۹۰) [۲۱] و کالکان (۲۰۰۶) [۲۶] از انطباق مناسب و خوبی برخوردار است. بررسی شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد مقایسه انرژی ورودی نسبی و

**Absolute, Relative and Kinetic Energy - Forward Directivity**  
Landers- Yermo Fire Station., Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



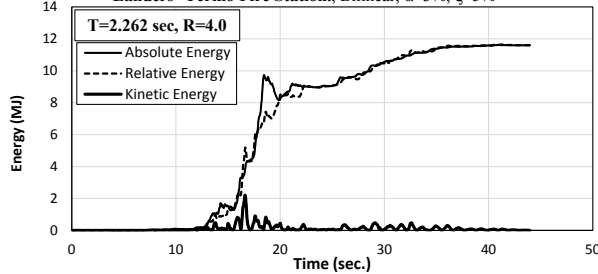
(a) R=1.0

**Absolute, Relative and Kinetic Energy - Forward Directivity**  
Landers- Yermo Fire Station., Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



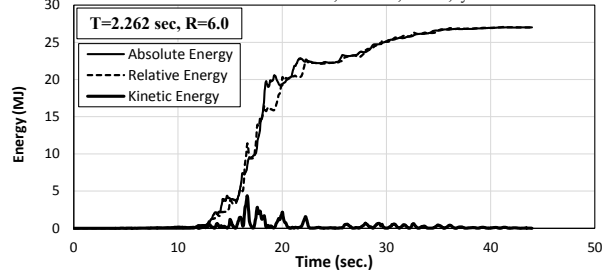
(b) R=2.0

**Absolute, Relative and Kinetic Energy - Forward Directivity**  
Landers- Yermo Fire Station., Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



(c) R=4.0

**Absolute, Relative and Kinetic Energy - Forward Directivity**  
Landers- Yermo Fire Station., Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



(d) R=6.0

شکل ۹. تاریخچه انرژی ورودی نسبی، مطلق و انرژی جنبشی در اثر زلزله لندرز-یرمو (SN8) برای  $R = 1, 2, 4, 6$  و FRN15B3 (T = 2.262 Sec)

**Fig. 9. History of Relative, Absolute Input Energy and Kinetic Energy by Landers-Yermo Earthquake (SN8) for  $R = 1, 2, 4, 6$  and FRN15B3 (T = 2.262 Sec.)**

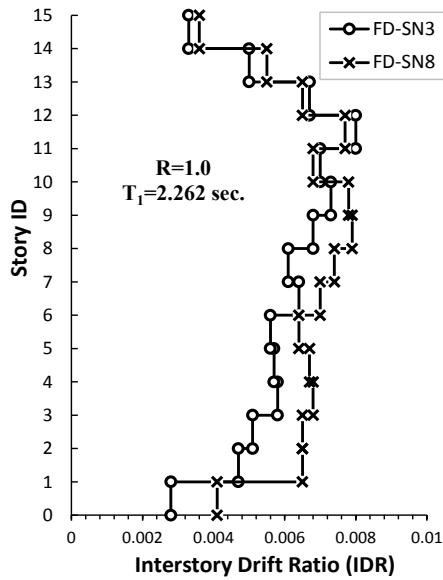
توسط سیستم SDOF معادل نیز می‌تواند مدنظر قرار گیرد. نکته قابل ذکر اینکه وجود پالس مشهود در زلزله نزدیک باعث می‌شود نیاز انرژی ورودی و به تبع آن توزیع تقاضای انرژی تلف شده در اثر رفتار چرخه‌ای و میرایی به همراه انرژی جنبشی و کرنشی ارتجاعی با زلزله دور از گسل متفاوت باشد. در این مقاله تلاش گردید تا اثر زلزله‌های نزدیک گسل پالس گونه بر نیازهای ارتجاعی قاب‌های خمشی فولادی مورد مطالعه و تحقیق قرار گیرد. در این راستا ابتدا رابطه بین انرژی چرخه‌ای مؤثر، ECE و پاسخ‌های تغییر مکان، سرعت و منحنی چرخه‌ای سازه SDOF در دو حالت زلزله نزدیک و دور از گسل مورد بررسی قرار گرفت. سپس ضمن بررسی تاریخچه انرژی ورودی تجمعی نسبی و مطلق به همراه انرژی جنبشی در یک بخش و حداکثر دریافت بین طبقه‌ای برای ۴ تراز مختلف رفتار غیرخطی ( $R=1.0, 2.0,$ )

شکل می‌گیرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

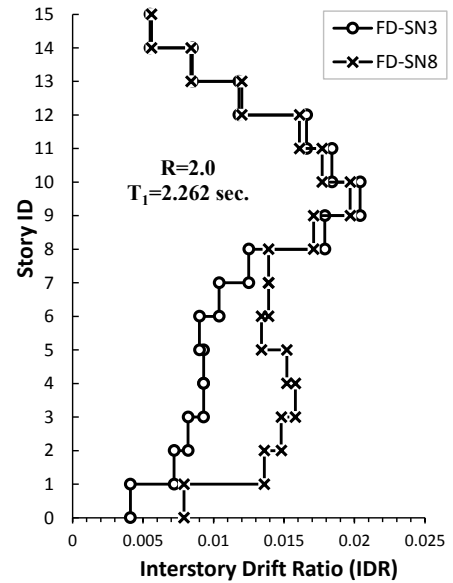
چند سالی است که محققین مختلف تلاش داشته‌اند تا مفاهیم طراحی بر مبنای عملکرد را به کمک مبانی انرژی بسط و توسعه دهند. مهم‌ترین دیدگاهی که مدنظر ایشان بوده است محاسبه نقطه توقف تحلیل (تغییر مکان هدف) به کمک انواع انرژی موجود در سازه در اثر زلزله است. شاید آنچه مطالعات مرتبط با این موضوع را از هم متمایز می‌نماید، نوع انرژی است که در نظر گرفته شده است. یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسبه تغییر مکان هدف بر مبنای انرژی، استفاده از انرژی ورودی سازه است که به دو فرم نسبی و مطلق تعریف می‌شود. البته استفاده از انرژی چرخه‌ای تلف شده

**Inelastic Interstory Drift Ratio (IDR),**  
FRN15B3, NF-SN , Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



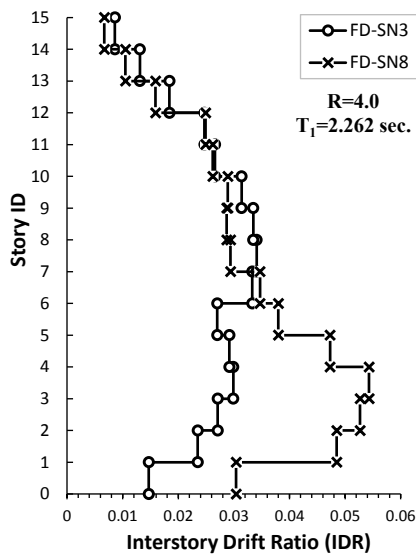
(a) R=1.0

**Inelastic Interstory Drift Ratio (IDR),**  
FRN15B3, NF-SN , Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



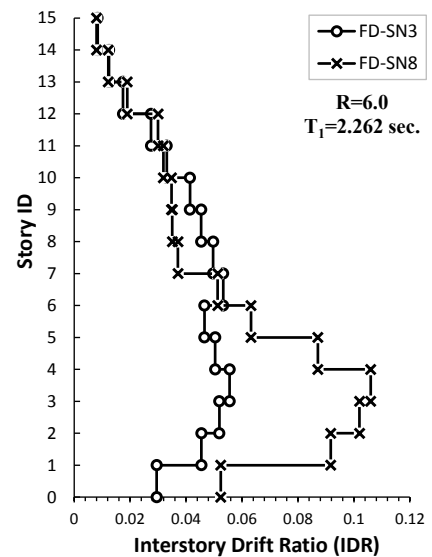
(b) R=2.0

**Inelastic Interstory Drift Ratio (IDR),**  
FRN15B3, NF-SN , Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



(c) R=4.0

**Inelastic Interstory Drift Ratio (IDR),**  
FRN15B3, NF-SN , Bilinear,  $\alpha=3\%$ ,  $\xi=5\%$



(d) R=6.0

شکل ۱۰. توزیع بیشینه زاویه دررفت غیر ارتجاعی بین طبقه‌ای در ارتفاع در اثر زلزله‌های SN3 و SN8 برای  $(T = 2.262 \text{ Sec})$  FRN15B3 و  $R = 1, 2, 4, 6$

**Fig. 10. Maximum distribution of inelastic drift angle between floors at height due to SN3 and SN8 earthquakes For  $R = 1, 2, 4, 6$  and FRN15B3 ( $T = 2.262 \text{ Sec}$ )**

6.0, 4.0) در بخش دیگر، اثر تعداد مودهای بالاتر مورد ارزیابی گردید. در ادامه نتایج به دست آمده تشریح می‌شوند.

۱- از آنجا که در رکوردهای دور از گسل محتوای فرکانسی بالایی در نگاشت سرعت وجود دارد، لذا در تاریخچه زمانی سرعت افزایش شدید چندگانه دیده می‌شود. این افزایش‌های چندگانه باعث می‌شوند انرژی ورودی به صورت فزاینده افزایش یافته و توسط چرخه‌های تغییر شکل غیرخطی چندگانه به خسارت تجمعی مرتبط شوند (پدیده خستگی با سیکل کم)؛ بنابراین زمان تداوم مؤثر زلزله‌ک عامل مهم در محاسبه حداکثر انرژی ورودی محاسبه می‌شود.

۲- نتایج نشان می‌دهد که رکوردهای با اثرات جهت‌پذیری که پالس شتاب مشهودی ندارند دارای طیف تاریخچه انرژی مشابهی (مطلق و نسبی) می‌باشند. این در حالی است که وجود پالس مشهود در رکورد شتاب باعث می‌شود که بین مقادیر انرژی نسبی و مطلق در پریودهای کوتاه و بلند اختلاف به وجود آید. در پریودهای میانی تفاوت بین دو نوع انرژی قابل چشم‌پوشی است اما در پریودهای بلند انرژی نسبی عموماً بزرگ‌تر از انرژی مطلق است.

۳- مقایسه تاریخچه زمانی انرژی سازه متاثر از دو رکورد با و بدون پالس مشهود در شتاب جنبه پراهمیت دیگری از پالس‌های شتاب را نمایان می‌سازد. اگر رکورد شتاب غیرپالسی است، انرژی ورودی به صورت تدریجی با گذشت زمان افزایش یافته و در انتهای شتاب با مقدار حداکثر خود می‌رسد. در حالی که برای رکورد با پالس مشهود در شتاب‌نگاشت، انرژی ورودی در زمان بسیار کوتاهی و با حداقل تجمع انرژی به مقدار بیشینه خود می‌رسد. به عبارتی تفاوت بین انرژی ورودی مطلق و نسبی در یک بازه زمانی اندک به شدت افزایش می‌یابد.

۴- رکوردهای دور از گسل دارای طبیعت چرخه‌ای می‌باشند؛ بنابراین سطح خسارت‌های سازه‌ای به تنهایی به حداکثر تغییر شکل وابسته نیست زیرا مدت زمان تداوم خستگی با سیکل کم نیز تأثیر قابل‌توجهی بر خسارت‌های سازه‌ای دارد. این در حالی است که برای زلزله‌های نزدیک گسل، بخش عمده‌ای از خسارت‌های سازه‌ای تنها در چند سیکل پلاستیک محدود شکل می‌گیرد که به دلیل نیاز انرژی آنی وابسته به اثرات پالس است. در این حالت مفهوم خستگی با سیکل کم عموماً بی‌معنی بوده و خسارت تجمعی به شکل مستقیم با حداکثر تغییر شکل سازه مرتبط می‌گردد.

۵- به کارگیری انرژی تجمعی ورودی به عنوان اندیس پاسخ ممکن است به نتایج غیردقیق برای زلزله‌های نزدیک گسل دارای پالس مشهود در

رکورد شتاب بیانجامد زیرا حداکثر نیاز انرژی در چنین رکوردی دارای یک پیک قابل توجه انرژی در فازهای اولیه پاسخ تاریخچه زمانی انرژی است که باعث می‌شود اثر چنین پدیده‌ای بحرانی‌تر از انرژی ورودی تجمع یافته در انتهای رکورد زلزله باشد. این جهش قابل‌توجه در انرژی ممکن است در تاریخچه زمانی انرژی نسبی یا مطلق دیده شوند. این موضوع به نسبت پریود سازه به پریود غالب پالس زلزله وابسته است.

۶- مطالعه پروفیل دریافت بین طبقه‌ای برای دو زلزله نزدیک گسل با پالس مشهود در شتاب (SN3) و بدون پالس مشهود در شتاب (SN8) نشان می‌دهد که برای درجات غیرخطی کم ( $R=1.0$  و  $R=2$ ) رکورد SN3 باعث شده تا تمرکز دریافت‌های حداکثر،  $IDR_{max}$ ، در طبقات فوقانی باشد. این موضوع مؤید تأثیر آن بر مشارکت مودهای بالاتر است. این در حال است که رکورد SN8، علاوه بر تشدید  $IDR_{max}$  در طبقات فوقانی، در طبقات تحتانی نیز نیازهای بزرگی بر سازه تحمیل شود. به عبارتی رکورد فاقد پالس مشهود شتاب در طبقات تحتانی، عمدتاً مود اول پاسخ را درگیر می‌کند.

۷- در رکورد SN3 حجم قابل‌توجهی از انرژی ورودی زلزله در مدت زمان کوتاهی (تقریباً ۲ ثانیه) به سازه وارد می‌شود. لذا سازه فرصت کافی برای عکس‌العمل به این تراز انرژی تجمع یافته را نخواهد داشت؛ بنابراین اینکه انرژی ورودی زلزله بیشتر باشد، نیازهای تحمیلی به سازه بیشتر است نتیجه‌گیری درستی نیست بلکه اندازه تقاضای تغییر شکل به زمان مؤثر انرژی ورودی تجمعی نیز وابسته است.

## منابع

- [1] G.W. Housner, Limit design of structures to resist earthquakes, in: Proc. of 1st WCEE, 1956, pp. 5.1-5.13.
- [2] H. Krawinkler, Performance assessment of steel components, Earthquake spectra, 3(1) (1987) 27-41.
- [3] T. Minami, Y. Osawa, Elastic-plastic response spectra for different hysteretic rules, Earthquake engineering & structural dynamics, 16(4) (1988) 555-568.
- [4] Y.-J. Park, A.-S. Ang, Y.-K. Wen, Seismic damage analysis and damage-limiting design of RC buildings, University of Illinois Engineering Experiment Station, 1984.
- [5] J.M. Tembulkar, J.M. Nau, Inelastic modeling and seismic



- seismic demands of SMRFs with MDOF's and higher modes considerations, Dissertation, Semnan University, Semnan, Iran, 2015.
- [17] S.A. Razavi, N. Siahpolo, M. Mahdavi Adeli, The Effects of Period and Nonlinearity on Energy Demands of MDOF and E-SDOF Systems under Pulse-Type Near-Fault Earthquake Records, *Scientia Iranica*, (2020).
- [18] S.A. Razavi, N. Siahpolo, M. Mahdavi Adeli, A New Empirical Correlation for Estimation of EBF Steel Frame Behavior Factor under Near-Fault Earthquakes Using the Genetic Algorithm, *Journal of Engineering*, 2020 (2020).
- [19] C. Fang, Q. Zhong, W. Wang, S. Hu, C. Qiu, Peak and residual responses of steel moment-resisting and braced frames under pulse-like near-fault earthquakes, *Engineering Structures*, 177 (2018) 579-597.
- [20] L. Xin, X. Li, Z. Zhang, L. Zhao, Seismic behavior of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge subjected to near-fault fling-step motions, *Engineering Structures*, 180 (2019) 148-159.
- [21] V.V. Bertero, R. Herrera, S. Mahin, Establishment of design earthquakes—Evaluation of present methods, in: *Proc., Int. Symp. on Earthquake Structural Engineering*, Univ. of Missouri-Rolla Rolla, Mo., 1976, pp. 551-580.
- [22] C. Csi, Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE, Computers and Structures, Berkeley, California, USA, (2016).
- [23] A. ANSI, AISC 360-10, Chicago, IL, (2010).
- [24] J.W. Baker, Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5) (2007) 1486-1501.
- [25] A. Gupta, H. Krawinkler, Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures, Stanford University, 1998.
- [26] E. Kalkan, Prediction of seismic demands in building structures, University of California, Davis, 2006.
- [27] P. Fajfar, T. Vidic, Consistent inelastic design spectra: energy dissipation, *Journal of Structural Engineering*, 113(6) (1987) 1373-1377.
- [6] C.M. Uang, V.V. Bertero, Evaluation of seismic energy in structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19(1) (1990) 77-90.
- [7] Y. Chai, P. Fajfar, A procedure for estimating input energy spectra for seismic design, *Journal of Earthquake Engineering*, 4(04) (2000) 539-561.
- [8] C.C. Chou, C.M. Uang, Establishing absorbed energy spectra—an attenuation approach, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(10) (2000) 1441-1455.
- [9] L.D. Decanini, F. Mollaioli, An energy-based methodology for the assessment of seismic demand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(2) (2001) 113-137.
- [10] R. Riddell, J.E. Garcia, Hysteretic energy spectrum and damage control, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(12) (2001) 1791-1816.
- [11] C.C. Chou, C.M. Uang, A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(2) (2003) 229-244.
- [12] S. Leelataviwat, S.C. Goel, B. Stojadinović, Energy-based seismic design of structures using yield mechanism and target drift, *Journal of Structural Engineering*, 128(8) (2002) 1046-1054.
- [13] E. Kalkan, S.K. Kunnath, Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, *Earthquake spectra*, 22(2) (2006) 367-390.
- [14] F. McKenna, OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation, *Computing in Science & Engineering*, 13(4) (2011) 58-66.
- [15] R. Vahdani, M. Gerami, M.A. Vaseghi Nia, Structural damping and displacement ductility effects on input energy spectrum of earthquake, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(2) (2018) 5-21.
- [16] N. Siahpolo, The effect of near-field earthquake on

- structural dynamics, 33(4) (2004) 499-520.
- [29] A. Teran-Gilmore, J.O. Jirsa, A damage model for practical seismic design that accounts for low cycle fatigue, Earthquake spectra, 21(3) (2005) 803-832.
- hysteretic and input energy, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 23(5) (1994) 523-537.
- [28] S. Kunnath, Y. Chai, Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum, Earthquake engineering &

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*N. Siahpolo, S. A. Razavi, H. Beiraghi, Evaluation of the Relative and Absolute Cumulative Input Energy Time History under Near-Fault Earthquake with Visible Pulse in Acceleration Time History, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 1653-1674.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19528.7194

