

### چکیده

در تحلیل‌های دینامیکی عموماً شتاب زمین به‌عنوان ورودی به سیستم در نظر گرفته می‌شود و معادله‌ی حرکت متناسب با شتاب در هر لحظه حل و تلاش اعضا و تغییر مکان نسبی طبقات سازه در هر لحظه محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه عموماً لرزه‌نگارها و شتاب‌نگارها به‌طور هم‌زمان در یک نقطه نصب نمی‌شوند در برخی موارد رکوردهای زلزله تنها توسط لرزه‌نگارها ثبت می‌گردد. اگر نگاهت ثبت‌شده توسط این دستگاه پس از تصحیح، سرعت واقعی زمین باشد بر اساس اصول دینامیک باید از روی آن بتوان شتاب را با مشتق‌گیری از رکورد سرعت محاسبه و نگاهت‌های لرزه و شتاب را به یکدیگر تبدیل نمود. صحت چنین فرضی در این تحقیق مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به همین منظور پس از زلزله‌ی ۲۷ مرداد ۱۳۹۳ به‌منظور ثبت پس‌لرزه‌ها، یک شتاب‌نگار و یک لرزه‌نگار از یک نوع در منطقه‌ی مورموری استان ایلام و در یک مختصات جغرافیایی نصب گردید. برای بررسی این موضوع، از میان رکوردهای به‌دست‌آمده چهار رکورد انتخاب شده است. در ابتدا هر دو نوع رکورد کالیبره و تصحیح می‌شوند و سپس برخی از ویژگی‌های آنها مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که دو نوع رکورد شباهت زیادی دارند و به‌خصوص در تحلیل سازه‌های با دوره‌ی تناوب کمتر از یک ثانیه استفاده از هر کدام امکان‌پذیر است.

**کلمات کلیدی:** تحلیل دینامیکی، شتاب‌نگاشت<sup>۱</sup>، لرزه‌نگاشت<sup>۲</sup>، زلزله‌ی مورموری، سازه‌ی یک درجه آزاد، پاسخ سازه

## مقایسه‌ی رکوردهای زلزله به‌دست آمده از شتاب‌نگار و لرزه‌نگار و مقایسه‌ی پاسخ سازه تحت اثر آنها

محمد مهدی ایزدی

دکترای مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد هشتگرد،  
دانشکده فنی مهندسی، البرز

مجید محمدی (نویسنده مسؤول)

استادیار پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و  
مهندسی زلزله، تهران

m.mohammadigh@iiees.ac.ir

### ۱- مقدمه

می‌تواند واقع‌بینانه‌ترین پاسخ را در تحلیل سازه ایجاد نماید. این رکورد عموماً نگاهت شتاب بوده که توسط شتاب‌نگار ثبت شده است. از آنجایی که مهندسی سازه بیشتر از شتاب‌نگار و زلزله‌شناس‌ها بیشتر از لرزه‌نگار استفاده می‌کنند این دو دستگاه به‌طور هم‌زمان در یک نقطه نصب نمی‌شوند؛ لذا در برخی مناطق رکوردهای زلزله تنها توسط لرزه‌نگارها ثبت می‌شوند.

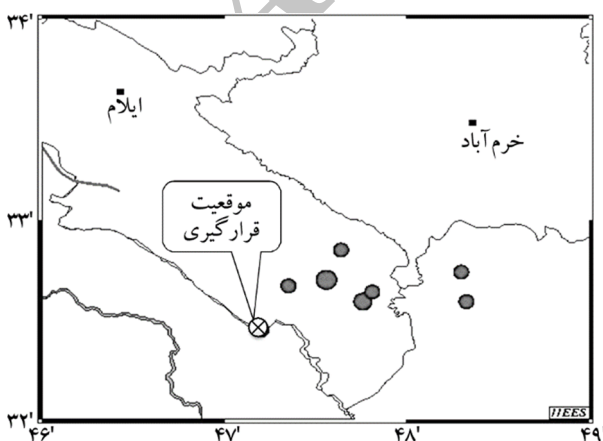
برخی از محققین مثل فولسر پیگوت و گودا [۱۰] استفاده از رکوردهای دارای شتاب کم به‌منظور ارزیابی جنبش نیرومند زمین و ارائه‌ی روابط کاهندگی را مناسب نمی‌دانند. در مقابل محققین دیگری مثل بیووال و همکاران [۱۱] و ماسا و همکاران [۱۲] نیز وجود دارند که پیش‌بینی حرکات زمین با استفاده از

روش تحلیل دینامیکی لرزه‌ای که در آن پاسخ سازه تحت تأثیر رکوردهای زلزله محاسبه می‌شود را می‌توان در مورد همه‌ی ساختمان‌ها به کار برد. در این روش، پاسخ سازه در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله با اعمال شتاب‌های ناشی از حرکت زمین (شتاب‌نگاشت) در تراز پایه ساختمان و حل معادلات دینامیکی تعیین می‌گردد. پاسخ سازه در چنین تحلیل‌هایی خصوصاً در حالت غیرخطی تا حد زیادی به صحت رکورد انتخابی وابسته است [۱]. اهمیت این موضوع موجب گردیده است تا محققین مختلف با روش‌های متفاوت اقدام به انتخاب رکورد مناسب برای تعیین پاسخ سازه نمایند [۲-۹]. رکورد مناسب ثبت شده در منطقه‌ای که قرار است سازه برای آنجا طراحی گردد،

انتگرال گیری از روی رکورد شتاب انجام می شود. مقایسه ی دیگری که روی رکورد شتاب ثبت شده و رکورد شتاب حاصل از مشتق رکورد سرعت صورت گرفته مقایسه ی طیف پاسخ یک سیستم یک درجه آزاد<sup>۳</sup> آنها است. در انتها طیف دامنه فوریه دو رکورد نیز مورد مقایسه قرار گرفته تا نحوه ی توزیع دامنه ی این دو رکورد در فرکانس های مختلف نشان داده شوند.

## ۲- رکوردهای ثبت شده

با توجه به اینکه عموماً در یک نقطه به طور هم زمان شتاب نگار و لرزه نگار نصب نمی شود و نظر به اینکه در این پژوهش داده های هر دو دستگاه برای مقایسه نیاز می باشد، پس از زلزله ی روز ۲۷ مرداد ۱۳۹۳، با بزرگای ۶ در مقیاس امواج پیکری در بخش مورموری شهرستان آبدانان در استان ایلام با توجه به تعدد پس لرزه ها اقدام به نصب دو دستگاه لرزه نگار و شتاب نگار در این منطقه گردید [۱۴-۱۵]. این دو دستگاه در مختصات ۴۷/۱۶ درجه ی طول جغرافیایی و ۳۲/۴۱ درجه ی عرض جغرافیایی نصب شدند. دستگاه ها از تاریخ ۱۳۹۳/۰۶/۲۳ تا تاریخ ۱۳۹۳/۰۷/۱۷ به طور پیوسته اقدام به ثبت رکورد نمودند. در طول این مدت هشت رخداد پس لرزه با بزرگای بیشتر از ۳ ریشتر در منطقه به ثبت رسید. موقعیت دو دستگاه و رخدادهای ثبت شده در شکل (۱) نشان داده شده است (این شکل از سایت پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله IIEES گرفته شده است).



شکل (۱): موقعیت قرارگیری دستگاه ها و رخدادهای بزرگای بیشتر از ۳ ثبت شده توسط آنها [۱۴-۱۵]

زلزله های کوچک را نیز مناسب می دانند. به طور خلاصه می توان چنین برداشت کرد که هر چند برخی از رکوردهای به دست آمده از دستگاه های لرزه نگار رکوردهای ضعیفی می باشند و استفاده از چنین رکوردهایی به منظور برآورد جنبش نیرومند زمین مورد مناقشه است، در مناطقی که هیچ گونه رکورد شتاب ثبت شده ای وجود ندارد امکان استفاده از داده های لرزه نگار منطقی به نظر می رسد. در چنین مواردی این امکان وجود دارد که شتاب در منطقه مورد نظر از مشتق رکورد سرعت لرزه نگارهای موجود به دست آید. نکته ی قابل تأمل در این موارد این است که تاکنون این روند صحت سنجی نشده است. به عبارت دیگر این که بتوان با مشتق گیری عددی از رکورد به دست آمده از لرزه نگار به رکورد شتاب رسید با استفاده از رکوردهای شتاب و سرعت ثبت شده لااقل در یک محل به اثبات نرسیده است.

در این مطالعه برای پاسخ به این چالش دو دستگاه شتاب نگار و لرزه نگار از تولیدات شرکت گورالپ (Guralp) انتخاب گردید و هر دو دستگاه در منطقه ی لرزه خیز مورموری در استان ایلام نصب گردیدند. از میان رخدادهای ثبت شده توسط این دو دستگاه در طول فعالیت، چهار رخداد انتخاب گردید. در ابتدا پاسخ های دستگاهی از رکوردهای به دست آمده حذف گردید و مقادیر شتاب و سرعت ثبت شده متناسب با کاتالوگ دستگاه کالیبره شد. برای دستیابی به رکورد شتاب از روی سرعت ثبت شده طبق اصول دینامیک مشتق گیری شد. سپس دو رکورد شتاب حاصل، که یکی به صورت مستقیم ثبت و دیگری از روی سرعت ثبت شده محاسبه گردیده با استفاده از پارامترهای اندرسون [۱۳] مقایسه گردید. این پارامترها شامل شتاب حداکثر، سرعت حداکثر، جابه جایی حداکثر، شدت اریاز، انتگرال مربع سرعت، طیف فوریه و طیف پاسخ شتاب در فرکانس های مختلف، شکل هم پایه شده انتگرال مربع شتاب و سرعت و همبستگی مقاطع هستند. این پارامترها برای مقایسه ی دو رکورد شتاب می باشند. برای محاسبه ی برخی از این پارامترها لازم است از رکورد شتاب، رکورد متناظر سرعت و جابه جایی نیز به دست آیند که این کار، به ترتیب با یک و دو بار

جدول (۱): ویژگی رکوردهای مورد استفاده در این مقاله

رکورد	تاریخ	زمان (UTC)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	عمق	بزرگی (ML)
۱	۲۰۱۴/۰۹/۲۴	۱۳:۳۹:۱۰	۳۲/۴۵	۴۷/۲	۱۸	۳/۵
۲	۲۰۱۴/۰۹/۲۸	۰۰:۰۰:۴۰	۳۲/۷	۴۷/۵۶	۱۴/۱	۴/۵
۳	۲۰۱۴/۱۰/۰۵	۱۸:۳۱:۱۰	۳۲/۵۹	۴۷/۷۶	۱۷/۹	۴
۴	۲۰۱۴/۱۰/۰۶	۰۰:۰۰:۳۹	۳۲/۶۷	۴۷/۳۵	۱۴/۱	۳/۲

منطقه مورد استفاده قرار گرفته دستگاه شتاب‌نگار Guralpe CMG-5TD است. این دستگاه یک شتاب‌نگار دیجیتالی سه مؤلفه است که در ثبت اطلاعات دقیق برای مطالعات مهندسی زلزله و کاهش خطر زمین‌لرزه کاربرد بسیار دارد. هر شتاب‌نگار شامل یک حسگر شتاب‌سنج سه مؤلفه CMG-5T است که به صورت یک مجموعه‌ی کامل و مستقل عمل می‌کند. از ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به استفاده از المان‌هایی با سطح نویز پایین برای افزایش دقت و محدوده‌ی عملکرد پیشینه، بازده (نسبت سیگنال به نویز) بالا، دارا بودن سنسورهای سه مؤلفه‌ی بسیار حساس و دقیق، وجود دیجیتایزر سه کاناله با محدوده دینامیکی بالا (۲۴ بیت) منبع تغذیه ۱۰ تا ۳۶ ولت، محفظه‌ی محکم و ضد آب مناسب برای نصب در شرایط آب و هوایی مختلف حجم و وزن کم برای حمل و نصب اشاره نمود. این دستگاه نیز ساخت کارخانه گورالپ انگلیس است و توسط کارخانه‌ی سازنده، جداولی برای تبدیل خروجی و حذف پاسخ‌های دستگاهی ارائه شده است [۱۸]. این دستگاه نیز مانند لرزه‌نگار شرکت مزبور مورد استفاده محققین قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به براون‌جان و کو [۱۹] اشاره نمود. در این پژوهش محققین با استفاده از این دستگاه اقدام به ارزیابی میرایی دو ساختمان‌های بلند نمودند.

به‌عنوان نمونه‌ای از کنترل و ارزیابی شباهت سرعت و شتاب حاصل از این دو دستگاه در مطالعات پیشین می‌توان به ماسا و همکاران [۱۲] اشاره نمود. در این پژوهش به‌منظور استخراج رابطه‌ی کاهندگی برای شمال ایتالیا از داده‌های هر دو دستگاه شتاب‌نگار و لرزه‌نگار استفاده شده است. همچنین پس از حذف پاسخ دستگاهی از این دو دستگاه داده‌های همگنی از دو دستگاه

از میان این رخدادها با توجه به سطح نویزهای محیطی و فاصله‌ی دستگاه تا رخداد مورد نظر چهار زلزله انتخاب گردید. برخی از ویژگی‌های این چهار رخداد در جدول (۱) ارائه شده است. هر دو دستگاه به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که قادر به ۱۰۰ نمونه‌برداری در ثانیه باشند؛ لذا گام زمانی همه‌ی رکوردهای ثبت شده ۰/۰۱ ثانیه می‌باشد.

### ۳- تجهیزات

یکی از دستگاه‌هایی که به‌منظور ثبت رویدادهای لرزه‌ای در منطقه استفاده شده سیستم لرزه‌سنج Guralpe CMG-6TD است. این سیستم با دوره‌ی تناوبی ۱۰ ثانیه شامل لرزه‌سنج باند متوسط ۱۵ و دیجیتایزر ۲۴ بیتی است و مجموع لرزه‌سنج و تبدیل‌کننده‌ی آنالوگ به دیجیتال در محفظه‌ای مقاوم جاسازی شده که به علت وزن کم و آسانی حمل و نقل و ضد آب بودن و از جهت سهولت در راه‌اندازی و نصب در شبکه‌های موقت زلزله‌نگاری بسیار مناسب است. این دستگاه ساخت کارخانه گورالپ انگلیس [۱۶] است و به‌طور وسیعی به‌عنوان سرعت‌سنج در کارهای صحرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. توسط کارخانه‌ی سازنده، جداولی برای تبدیل خروجی، محاسبه‌ی مجدد ضریب خروجی دیجیتال و حذف پاسخ دستگاهی ارائه شده است. با توجه به ویژگی این دستگاه محققین مختلف در پژوهش‌های اخیر خود از این دستگاه بهره گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به عسکری و همکاران [۱۷] اشاره نمود. در این پژوهش با استفاده از هشت لرزه‌سنج Guralpe CMG-6TD اقدام به ثبت پس‌لرزه‌های زلزله‌ی ۵ دی ۱۳۸۲ بم گردید. از داده‌های به‌دست آمده به‌منظور استخراج نقشه‌ی ریز پهنه‌بندی بم استفاده شده است.

دستگاه دیگری که به‌منظور ثبت رویدادهای لرزه‌ای در

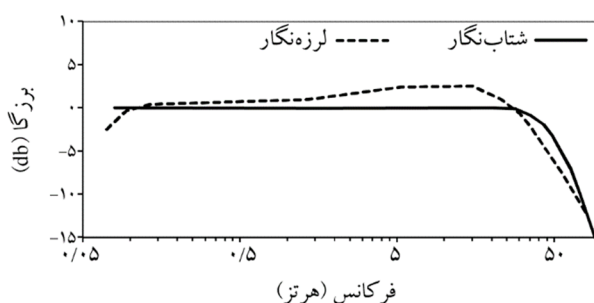
دیگر این ارتباط بین شتاب‌نگاشت و لرزه‌نگاشت ثبت شده توسط آنها وجود نداشته باشد که این موضوع در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴- نتایج مقایسه‌ی رکوردهای ثبت شده

هر رخداد ثبت شده برای این تحقیق شامل سه مؤلفه‌ی شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و قائم می‌باشد. مقایسه‌ی رکوردهای ثبت شده به سه روش صورت می‌گیرد. در روش نخست، ابتدا از رکورد سرعت به دست آمده از لرزه‌نگار مشتق گرفته می‌شود تا رکورد شتاب آن حاصل شود. سپس این رکورد با آنچه توسط شتاب‌نگار ثبت شده در شکل‌های (۳-الف) تا (۳-د) مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است که این شکل‌ها در محدوده زمانی که بیشترین تفاوت بین دو رکورد وجود دارد، رسم شده‌اند. نتایج مقایسه‌ی تاریخیچه زمانی شتاب رکوردهای به دست آمده توسط دو دستگاه، نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن مقادیر شتاب دو رکورد است. در این شکل‌ها Acc رکورد ثبت شده توسط شتاب‌نگار و Diff (Vel) مشتق رکورد ثبت شده به وسیله‌ی لرزه‌نگار را نشان می‌دهد.

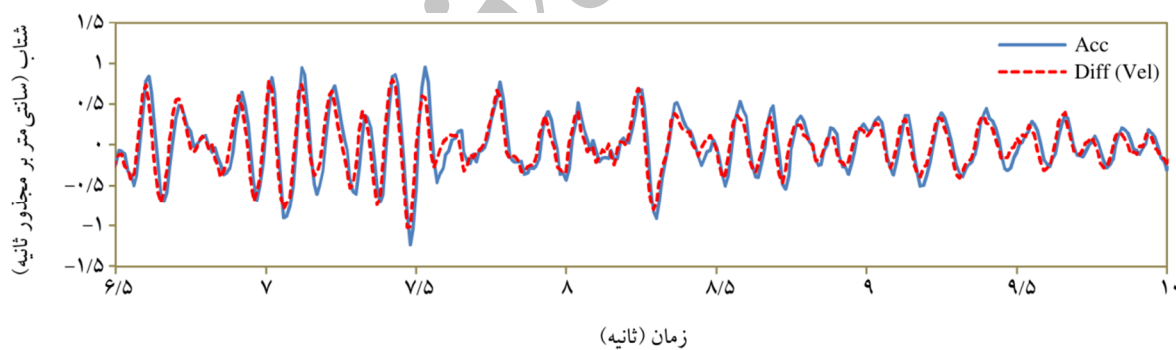
(شامل ۸۲ رخداد) به منظور استخراج معادلات پیش‌بینی حرکت زمین مورد استفاده قرار گرفته است.

پاسخ دستگاهی هر دو دستگاه در شکل (۲) ارائه شده است. پاسخ دستگاهی از رکوردهای مورد مقایسه در بخش‌های بعد متناسب با راهنمای هر دستگاه از رکوردها حذف شده است.

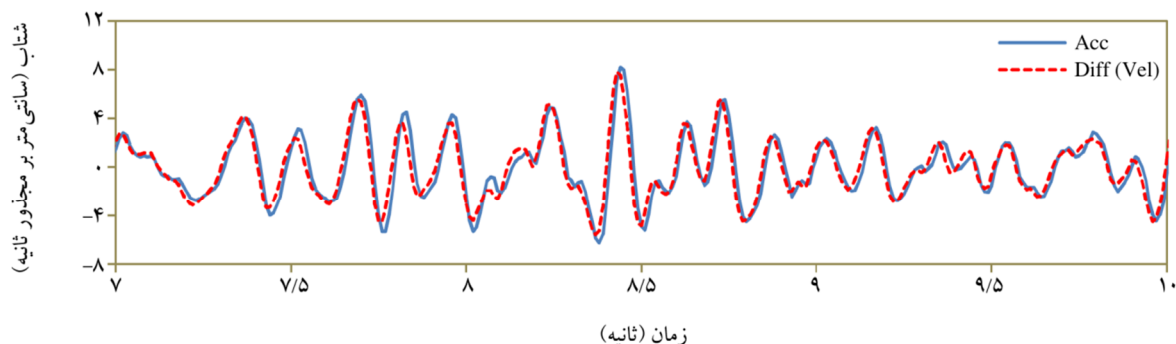


شکل (۲): پاسخ دستگاهی شتاب‌نگار و لرزه‌نگار مورد استفاده

لازم به ذکر است بر اساس مبانی دینامیک می‌توان نمودار سرعت یک نقطه را با استفاده از مشتق شتاب به دست آورد. به‌رغم این موضوع تفاوت ماهیت دو دستگاه لرزه‌نگار و شتاب‌نگار و وجود پاسخ دستگاه در نگاشت، هر یک ممکن است باعث شود

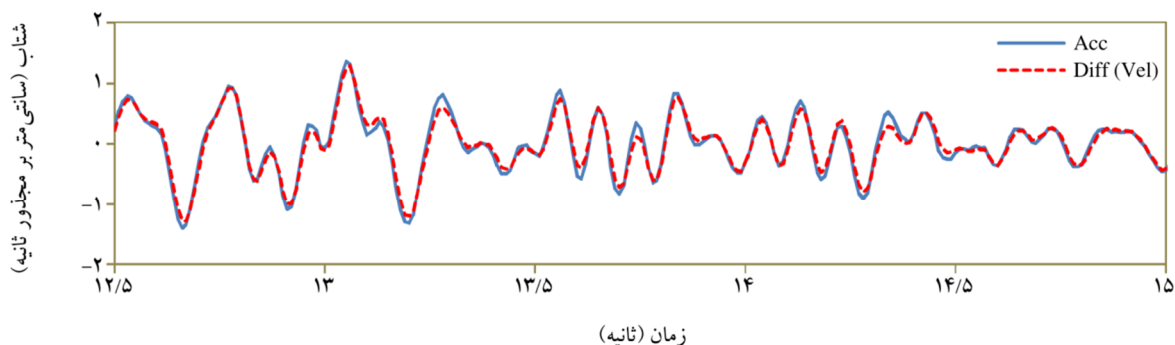


(الف) رکورد شماره ۱ در راستای غربی-شرقی

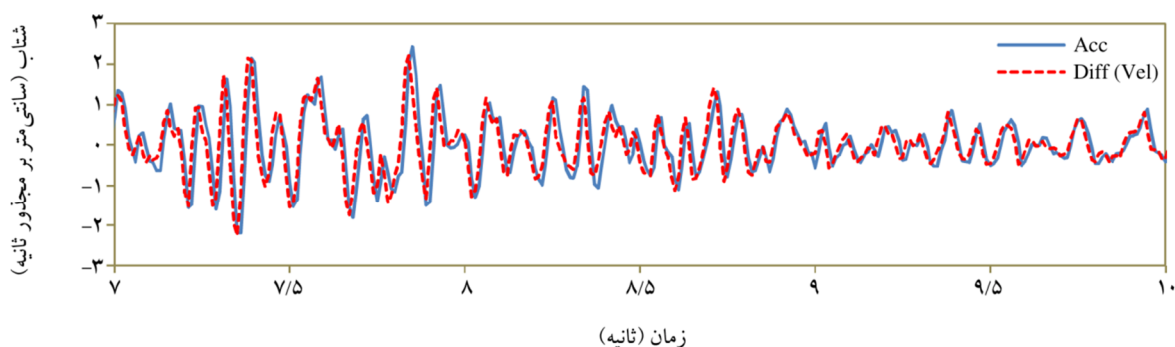


(ب) رکورد شماره ۲ در راستای غربی-شرقی

شکل (۳): مقایسه‌ی رکورد ثبت شده توسط شتاب‌نگار و مشتق رکورد ثبت شده توسط لرزه‌نگار



(پ) رکورد شماره ۳ در راستای شمالی - جنوبی



(ت) رکورد شماره ۴ در راستای قائم

ادامه شکل (۳)

نشان‌دهنده‌ی تطابق ضعیف<sup>۴</sup>، در صورتی که این عدد بین ۴ و ۶ باشد نشان‌دهنده‌ی تطابق نسبی<sup>۵</sup>، همچنین اگر این عدد بین ۶ و ۸ باشد بیانگر تطابق خوب<sup>۶</sup> و در نهایت امتیاز بالای ۸ نشان‌دهنده‌ی تطابق عالی<sup>۷</sup> بین دو رکورد است.

کمیت‌های ده‌گانه‌ی اندرسون در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. در این جدول  $a_1(t)$  و  $a_2(t)$  به ترتیب مربوط به دو شتاب‌نگاشت،  $v(t)$  و  $d(t)$  سرعت و تغییر مکان به‌دست آمده از شتاب‌نگاشت و  $S_{Ai}(f_j)$  مقدار طیف پاسخ شتاب در فرکانس  $f_j$  می‌باشند.

این پارامترها برای رکوردهای چهار زلزله به ترتیب برای راستای غربی - شرقی، شمالی - جنوبی و راستای قائم در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که از مقادیر پارامترهای اندرسون برای هر چهار رویداد در سه راستا استخراج می‌شود Cave رکوردهای مقایسه شده‌ی بزرگ‌تر از ۹ است که این نشانه انطباق بسیار خوب این دو نوع رکورد می‌باشد.

روش دیگر مقایسه‌ی رکوردهای ثبت شده، استفاده از طیف پاسخ و طیف دامنه فوریه دو نوع رکورد است. مقدار طیف پاسخ وابسته به زمان تناوب سازه می‌باشد و ممکن است دو طیف در

در روش دوم برخی پارامترهای دو رکورد (پیشنهاد شده توسط اندرسون [۱۳]) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اندرسون یک روش کمی برای مقایسه‌ی رکوردهای زلزله ارائه نموده و میزان شباهت دو رکورد را بر اساس پارامترهای مختلف به صورت اعدادی بین ۰ تا ۱۰ مشخص می‌نماید؛ با توجه به این که رکوردهای زلزله پیچیدگی‌های گسترده‌ای دارند مقایسه دو رکورد تنها با در نظر گرفتن یک پارامتر منطقی نخواهد بود. لذا در این روش ۱۰ پارامتر شامل شتاب حداکثر، سرعت حداکثر، جابه‌جایی حداکثر، شدت اریاز، انتگرال مربع سرعت، طیف فوریه و طیف پاسخ شتاب در فرکانس‌های مختلف، شکل همپایه شده انتگرال مربع شتاب و سرعت و همبستگی متقاطع دو رکورد مورد مقایسه قرار می‌گیرند. مقدار هر یک از پارامترهای مورد نظر، در صورت انطباق کامل عدد ۱۰ به‌دست می‌آید. هرچقدر این عدد به صفر نزدیک شود نشان از تفاوت بیشتر دو رکورد در آن پارامتر است. پارامترهای مذکور را با  $C_1$  تا  $C_{10}$  و میانگین این ۱۰ پارامتر برای هر رکورد با Cave نشان داده می‌شوند. در این روش در صورتی که Cave کمتر از ۴ باشد

محدوده‌ای از تناوب‌ها یکسان و در محدوده‌ی دیگر متفاوت تناوب کاملاً معنی‌دار است؛ ولی در پارامتر C8 اندرسون تنها باشند. از منظر مهندسیین زلزله تفاوت دو طیف در یک زمان میانگین طیف در همه‌ی فرکانس‌ها مد نظر قرار گرفته است.

جدول (۲): پارامترهای پیشنهادی اندرسون

شماره	نشانه	نام فارسی	نام انگلیسی	تعریف*
C1	SDa	مدت اریاز <sup>۸</sup>	Arias Duration	$10 [1 - \max(F^{IA}(t))]$ در اینجا $F^{IA}(t) =  N_1^{IA}(t) - N_2^{IA}(t) $ $N^{IA}(t) = \frac{I_A(t)}{IA}$
C2	SDe	مدت انرژی <sup>۹</sup>	Energy Duration	$10 [1 - \max(F^E(t))]$ در اینجا $F^E(t) =  N_1^E(t) - N_2^E(t) $ $N^{IA}(t) = \frac{I_E(t)}{IE}$
C3	Sla	شدت اریاز <sup>۱۰</sup>	Arias Intensity	$S(IA_1, IA_2)$ در اینجا $IA_i = I_{Ai}(T_d)$
C4	Slv	انتگرال انرژی <sup>۱۱</sup>	Energy Integral	$S(IE_1, IE_2)$ در اینجا $IE_i = I_{Ei}(T_d)$
C5	Spga	شتاب حداکثر <sup>۱۲</sup>	Peak Acceleration	$S(A_1, A_2)$ در اینجا $A_i = \max  a_i(t) $
C6	Spgv	سرعت حداکثر <sup>۱۳</sup>	Peak Velocity	$S(V_1, V_2)$ در اینجا $V_i = \max  v_i(t) $
C7	Spgd	جابه‌جایی حداکثر <sup>۱۴</sup>	Peak Displacement	$S(D_1, D_2)$ در اینجا $D_i = \max  d_i(t) $
C8	Ssa	طیف پاسخ شتاب <sup>۱۵</sup>	Response Spectra	$mean[S(SA_1(f_j), SA_2(f_j))]$ که در اینجا میانگین برای کل محدوده فرکانسی که مقادیر SA در آنها محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود
C9	Sfs	طیف فوریه <sup>۱۶</sup>	Fourier Spectra	$mean[S(FS_1(f_j), FS_2(f_j))]$ که در اینجا میانگین برای کل محدوده فرکانسی که مقادیر FS از طریق تبدیل فوریه سریع، در آنها محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود
C10	C*	همبستگی مقاطع	Cross Correlation	$C^* = 10 \max[C(a_1(t), a_2(t)), 0]$ $C(a_1, a_2) = \frac{\int a_1(t)a_2(t)dt}{\left[\int a_1(t)^2 dt\right]}$

\* تعریف برخی توابع جدول:

$$I_{AI}(t) = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a_i^2(\tau) d\tau, \quad I_{EI}(t) = \int_0^t v_i^2(\tau) d\tau, \quad S(p_1, p_2) = 10 \exp \left\{ - \left[ \frac{(p_1 - p_2)}{\min(p_1, p_2)} \right]^2 \right\}$$

جدول (۳): مقایسه‌ی رکوردهای چهار زلزله در سه راستا توسط پارامترهای پیشنهادی اندرسون

مؤلفه قائم				مؤلفه شمالی - جنوبی				مؤلفه شرقی - غربی				پارامتر مورد بررسی
شماره رکورد				شماره رکورد				شماره رکورد				
۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	
۹/۶۶	۹/۷۷	۹/۸۹	۹/۶۰	۹/۶۳	۹/۴۲	۹/۵۷	۹/۸۸	۹/۶۹	۹/۵۱	۹/۷۷	۹/۶۵	C1 (SDa)
۹/۷۰	۹/۸۰	۹/۳۶	۹/۸۲	۹/۷۲	۹/۶۴	۹/۴۸	۹/۲۷	۹/۷۶	۹/۵۹	۹/۵۰	۹/۷۴	C2 (SDe)
۹/۹۴	۹/۹۴	۹/۹۳	۹/۸۹	۹/۲۹	۹/۶۴	۹/۰۰	۹/۳۸	۹/۶۲	۹/۷۴	۹/۹۳	۹/۶۴	C3 (SIa)
۹/۹۷	۹/۹۸	۹/۹۷	۹/۹۶	۹/۶۸	۹/۹۴	۹/۳۴	۹/۹۷	۹/۷۵	۹/۹۱	۹/۸۹	۹/۹۹	C4 (SIv)
۹/۹۳	۹/۹۹	۱۰/۰۰	۹/۹۹	۹/۸۸	۹/۹۳	۹/۸۰	۹/۷۹	۹/۹۸	۱۰/۰۰	۹/۹۸	۹/۵۶	C5 (Spga)
۹/۹۸	۹/۹۹	۹/۹۷	۹/۹۴	۹/۷۹	۱۰/۰۰	۹/۶۲	۹/۸۴	۹/۹۸	۹/۸۹	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	C6 (Spgv)
۹/۹۹	۹/۹۹	۸/۵۲	۹/۹۵	۹/۹۸	۱۰/۰۰	۹/۶۶	۷/۲۱	۹/۲۲	۹/۹۵	۹/۹۵	۹/۶۲	C7 (Spgd)
۹/۸۹	۹/۸۸	۹/۰۷	۹/۹۴	۹/۸۸	۹/۹۳	۹/۴۹	۸/۶۱	۹/۶۴	۹/۹۰	۹/۵۷	۹/۷۳	C8 (Ssa)
۸/۵۲	۸/۶۵	۸/۳۶	۸/۵۶	۸/۳۱	۸/۳۲	۸/۰۵	۸/۳۶	۸/۱۹	۸/۰۲	۷/۹۸	۷/۹۶	C9 (Sfs)
۷/۵۵	۸/۹۴	۸/۶۸	۸/۸۳	۹/۴۳	۹/۰۷	۹/۱۲	۸/۹۸	۸/۴۷	۹/۲۶	۹/۲۳	۸/۷۰	C10 (C*)
۹/۵۱	۹/۶۹	۹/۳۹	۹/۶۵	۹/۴۳	۹/۵۹	۹/۳۱	۹/۱۳	۹/۴۳	۹/۵۸	۹/۵۸	۹/۴۶	C <sub>ave</sub>

در نظر گرفتن نیروی سختی  $f_s$ ، میرایی  $f_D$  هر ستون و نیروی اینرسی  $f_I$  معادله‌ی حرکت به‌صورت زیر می‌باشد.

در حل معمول معادله حرکت تغییر مکان کلی جرم سازه  $u^t$  شامل تغییر مکان نسبی  $u$  و تغییر مکان زمین  $u_g$  حین ارتعاش می‌باشد. به‌منظور حل عددی این معادله، مقادیر شتاب زمین به‌عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود و از حل این معادله مقادیر تغییر مکان نسبی  $u$  در هر لحظه به‌دست می‌آید. در صورتی که مقادیر تغییر مکان نسبی  $u$  بر حسب تغییر مکان کلی محاسبه شود:

$$u^t = u_g + u \rightarrow u = u^t - u_g \rightarrow \dot{u} = \dot{u}^t - \dot{u}_g \quad (۲)$$

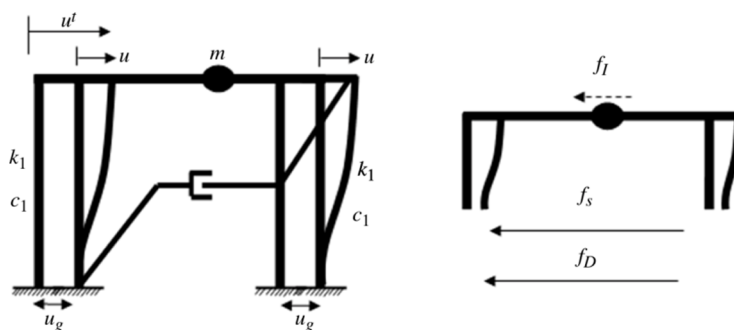
با جاگذاری این مقادیر در معادله‌ی حرکت (رابطه ۱):

$$m\ddot{u}^t + c(\dot{u}^t - \dot{u}_g) + k(u^t - u_g) = 0 \quad (۳)$$

طیف پاسخ در حقیقت نمودار حداکثری یک پاسخ انتخابی (نظیر تغییر شکل، سرعت و یا شتاب) در مقابل زمان تناوب سازه  $T_n$  (و یا کمیت‌های مشابه نظیر فرکانس) می‌باشد [۲۰]. طیف معمولاً به‌صورت مستقیم از روی شتاب‌نگاشت به‌دست می‌آید؛ ولی برای مقایسه‌ی بهتر رکوردهای به‌دست‌آمده در این تحقیق طیف پاسخ هر یک از این رکوردهای شتاب و سرعت به‌صورت مستقیم با اعمال آنها به سازه و محاسبه‌ی پاسخ سازه محاسبه گردید. این امر برای شتاب‌نگاشت به‌صورت معمول که در کتاب‌های دینامیک سازه موجود است، انجام شد ولی برای سرعت نگاشت از معادلات زیر استفاده گردید:

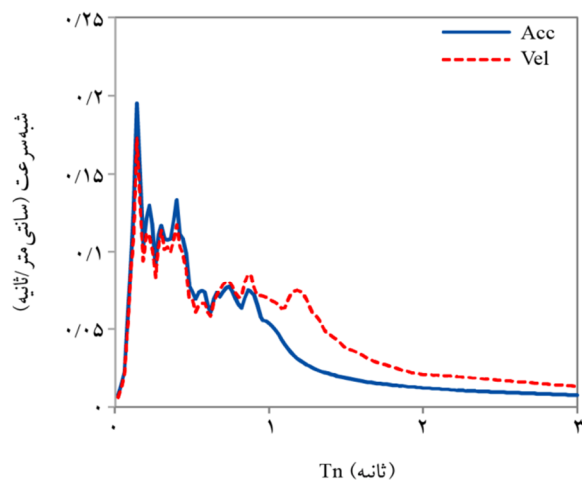
$$f_I + f_D + f_s = 0 \quad (۱)$$

برای سازه‌ی یک درجه آزاد نشان داده شده در شکل (۴) با

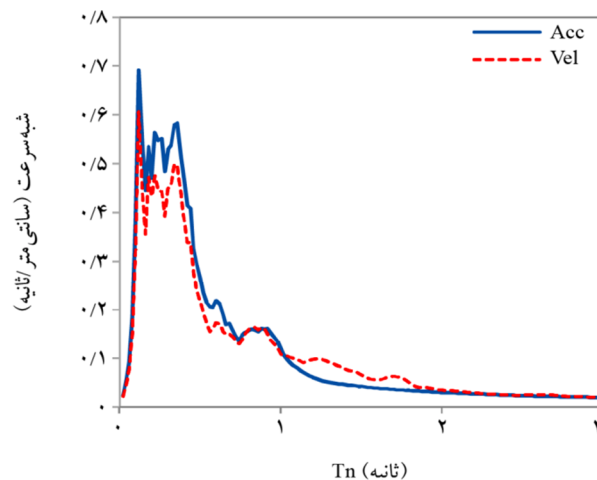


شکل (۴): سازه‌ی یک درجه آزاد

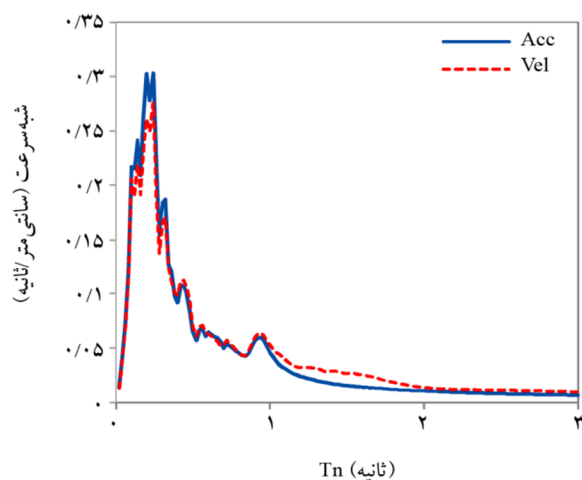




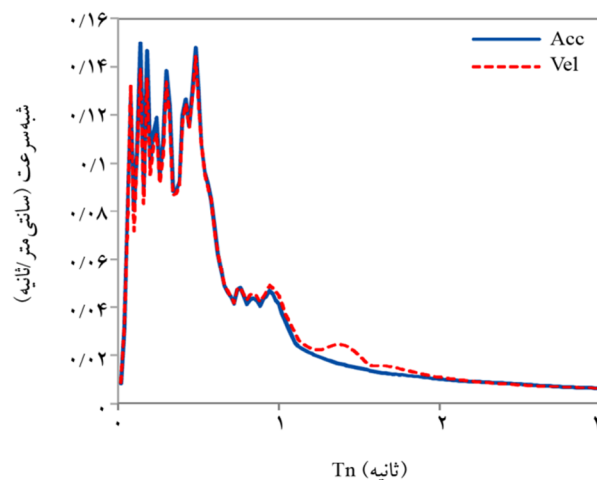
(ب) رکورد شماره ۲ در راستای شمالی - جنوبی



(الف) رکورد شماره ۱ در راستای شمالی - جنوبی



(ت) رکورد شماره ۴ در راستای قائم



(پ) رکورد شماره ۴ در راستای غربی - شرقی

شکل (۵): مقایسه‌ی طیف پاسخ شبه سرعت برای رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه شتاب‌نگار و لرزه‌نگار

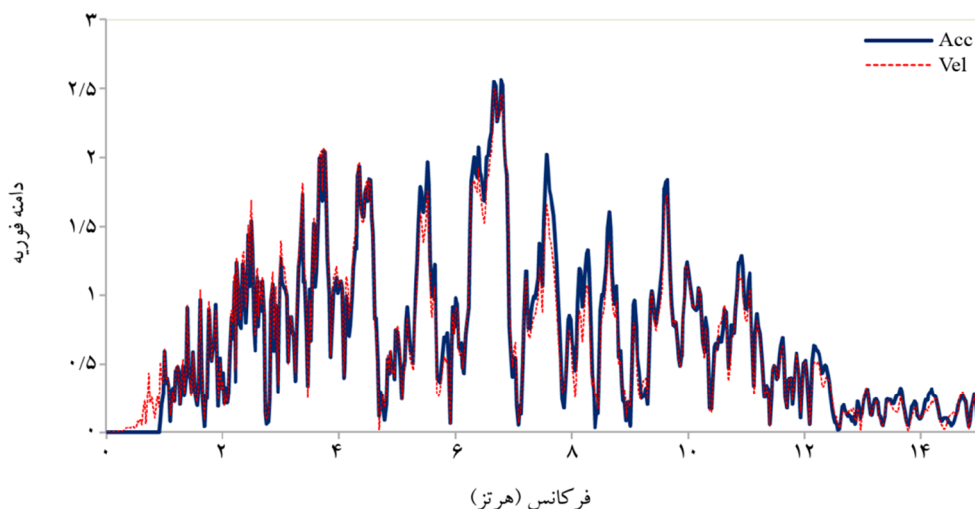
رکورد سرعت استفاده شده است.

شکل (۵) نشان‌دهنده‌ی طیف‌های پاسخ شبه سرعت برای برخی از رکوردها برای نسبت میرایی ۵ درصد می‌باشند. در این شکل‌ها نمودار Acc طیف پاسخ حاصل از رکورد شتاب‌نگاشت و نمودار Vel طیف پاسخ حاصل از رکورد لرزه‌نگاشت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در طیف پاسخ به‌دست آمده از دو نوع رکورد مشاهده می‌شود در پریردهای پایین غالباً طیف شبه سرعت حاصل از لرزه‌نگاشت مقادیر کمتری نسبت به طیف حاصل از شتاب‌نگاشت دارد؛ در حالی که در پریردهای ارتعاشی بالا غالباً طیف حاصل از لرزه‌نگاشت مقادیر بیشتری در مقایسه با طیف حاصل از شتاب‌نگاشت دارد. شکل (۶) نیز طیف دامنه فوریه

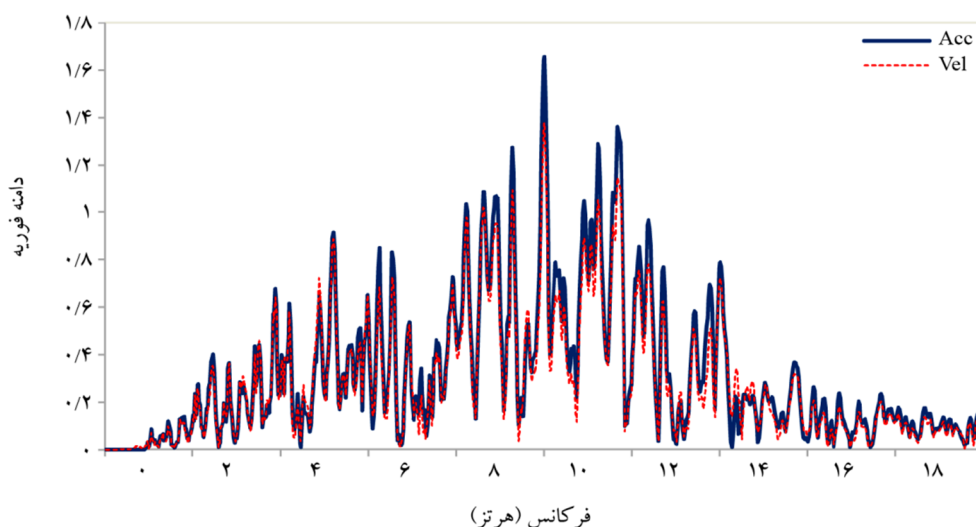
$$m\ddot{u}^t + c\dot{u}^t + ku^t = c\dot{u}_g + ku_g = P_{eff} \quad (۴)$$

با در نظر گرفتن معادله‌ی حرکت به فرم رابطه (۴)، مقادیر تغییر مکان و سرعت زمین به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود و از حل عددی این معادله مقادیر تغییر مکان کلی درجه آزادی  $u^t$  در هر لحظه به‌دست می‌آید. در صورتی که هدف، تعیین تغییر مکان نسبی جرم باشد که ارتباط مستقیم با نیروهای داخلی ایجاد شده در سیستم دارد، از رابطه (۲) می‌توان استفاده نمود [۲۱]. با توجه به اینکه رکورد ثبت شده توسط لرزه‌نگارها سرعت زمین در هر لحظه می‌باشد لذا برای به‌دست آوردن طیف پاسخ در این حالت از رابطه شماره (۴) استفاده می‌شود. لازم به ذکر است برای رکورد تغییر مکان زمین در این رابطه، از انتگرال





(الف) رکورد شماره ۲ در راستای غربی-شرقی



(ب) رکورد شماره ۴ در راستای شمالی-جنوبی

شکل (۶): مقایسه طیف دامنه فوریه برای رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه شتاب‌نگار و لرزه‌نگار

ورودی استفاده و سپس تلاش اعضا و دریافت طبقات بر اساس آن محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه عموماً لرزه‌نگارها و شتاب‌نگارها به‌طور هم‌زمان در یک نقطه نصب نمی‌شوند در برخی موارد رکوردهای زلزله تنها توسط لرزه‌نگارها ثبت می‌شوند. اگر نگاشت ثبت شده توسط این دستگاه پس از تصحیح و حذف کامل فرکانس‌های دستگاه و محیط، سرعت واقعی زمین باشد بر اساس اصول دینامیک باید از روی آن بتوان شتاب را با مشتق‌گیری از رکورد سرعت محاسبه و نگاشت‌های لرزه و شتاب را به یکدیگر تبدیل نمود. صحت چنین فرضی در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور در این تحقیق یک دستگاه شتاب‌نگار و

دو نوع رکورد مورد مقایسه قرار گرفته است. طیف دامنه فوریه یک رکورد لرزه‌ای نحوه‌ی توزیع دامنه را در فرکانس‌های مختلف نشان داده و محتوای فرکانسی یک رکورد را به‌طور واضح ترسیم می‌کند [۲۲]. این شکل‌ها در محدوده فرکانسی که دو رکورد تفاوت قابل ملاحظه‌تری دارند ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود دو نوع رکورد در بیشتر فرکانس‌ها مقادیر دامنه فوریه‌ی نزدیک به هم دارند.

## ۶- نتیجه‌گیری

معمولاً در تحلیل‌های دینامیکی از شتاب‌نگاشت به‌عنوان

8. Jayaram, N., Lin, T., and Baker, J.W. (2011) A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance. *Earthquake Spectra*, **27**(3), 797-815.
9. Ghafory-Ashtiany, M., Mousavi, M., and Azarbakht, A. (2011) Strong ground motion record selection for the reliable prediction of the mean seismic collapse capacity of a structure group. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **40**(6), 691-708.
10. Foulser-Piggott, R. and Goda, K. (2014) New prediction equations of Arias intensity and cumulative absolute velocity for Japanese earthquakes. *2<sup>nd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey.
11. Beauval, C., Tasan, H., Laurendeau, A., Delavaud, E., Cotton, F., Guéguen, P., and Kuehn, N. (2012) On the testing of ground-motion prediction equations against small-magnitude data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**(5), 1994-2007.
12. Massa, M., Morasca, P., Moratto, L., Marzorati, S., Costa, G., and Spallarossa, D. (2008) Empirical ground-motion prediction equations for northern Italy using weak-and strong-motion amplitudes, frequency content, and duration parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(3), 1319-1342.
13. Anderson, J.G. (2004) Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings*, Vancouver, Canada, Paper (Vol. 243).
14. Zare, M., Farzanegan, E., Shahvar, M., Kamalian, E., and Saeidi, A.R. (2014) *Mormori (Ilam) SW Iran's Earthquake of 18 August 2014, Mw6.2: A Preliminary Reconnaissance Report*. [https://www.eeri.org/wp-content/uploads/Mormori\\_Reconn\\_Rep\\_20\\_9\\_2014.pdf](https://www.eeri.org/wp-content/uploads/Mormori_Reconn_Rep_20_9_2014.pdf).
15. Mostafazadeh, M., Motaghi, AS., Davoodi, M., and Kalantari, A. (2014) *Immediate Report of Visit to the Affected Areas Mormori Earthquake 27*

لرزه‌نگار در منطقه‌ی مورموری استان ایلام نصب گردید و داده‌های آن استخراج شد تا بتوان رکورد شتاب حاصل از آنها که در اولی به صورت مستقیم ثبت و در دومی از مشتق رکورد ثبت شده به دست می‌آید با یکدیگر مقایسه کردند. دو نوع رکورد با استفاده از تاریخچه‌های زمانی شتاب، پارامترهای اندرسون، طیف پاسخ و طیف دامنه فوریه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده از مقایسه‌های صورت گرفته حاکی از آن است که این دو رکورد شباهت زیادی به یکدیگر دارند و از رکورد حاصل از لرزه‌نگاشت نیز می‌توان در تحلیل سازه به خصوص سازه‌های با دوره تناوب کمتر یا مساوی یک ثانیه استفاده نمود.

### مراجع

1. Baker, J.W. and Allin Cornell, C. (2006) Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(9), 1077-1095.
2. Shome, N., Cornell, C.A., Bazzurro, P., and Carballo, J.E. (1998) Earthquakes, records, and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*, **14**(3), 469-500.
3. Iervolino, I. and Cornell, C.A. (2005) Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, **21**(3), 685-713.
4. Iervolino, I., Maddaloni, G., and Cosenza, E. (2009) A note on selection of time-histories for seismic analysis of bridges in Eurocode 8. *Journal of Earthquake Engineering*, **13**(8), 1125-1152.
5. Naeim, F., Alimoradi, A., and Pezeshk, S. (2004) Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms. *Earthquake Spectra*, **20**(2), 413-426.
6. Katsanos, E.I., Sextos, A.G., and Manolis, G.D. (2010) Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(4), 157-169.
7. Iervolino, I., Galasso, C., and Cosenza, E. (2010) REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**(2), 339-362.

Energy integral	۱۱- انتگرال انرژی	<i>Shahrivar 1393 (Abdanan-Dehloran)</i> . International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (in Persian).
Peak Acceleration	۱۲- شتاب حداکثر	
Peak Velocity	۱۳- سرعت حداکثر	16. Guralp, C.M. CMG-6TD Digital seismograph system: User's Guide
Peak Displacement	۱۴- جابه‌جایی حداکثر	
Response Spectra	۱۵- طیف پاسخ شتاب	17. Askari, F., Azadi, A., Davoodi, M., Ghayamghamian, M.R., Haghshenas, E., Hamzehloo, H., and Sohrabi-Bidar, A. (2004) Preliminary seismic microzonation of Bam. <i>Journal of Seismology and Earthquake Engineering</i> , 5, 69-80.
Cross Correlation	۱۶- طیف فوریه	
		18. Guralp, C.M. CMG-5TD Digital Accelerograph System: User's Guide
		19. Brownjohn, J.M. and Koo, K.Y. (2010) Vibration Serviceability of Tall Buildings Due to Wind Loads: Prediction, Measurement, and Evaluation of Damping. <i>Structures Congress 2010</i> (2961-2971). ASCE.
		20. Chopra, A.K. (1995) <i>Dynamics of Structures</i> (Vol. 3). New Jersey: Prentice Hall.
		21. Mohammadi, M. and Izadi, M.M. (2015) effects of the multi-support excitation on linear response of one-story buildings. <i>7<sup>th</sup> International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE7)</i> , Tehran, Iran.
		22. Kramer, S.L. (1996) <i>Geotechnical Earthquake Engineering</i> . Pearson Education India.

### اصطلاحات فنی

Accelerogram	۱- شتاب‌نگاشت
Seismogram	۲- لرزه‌نگاشت
Single-Degree-of-Freedom System	۳- سیستم یک درجه آزاد
Poor Fit	۴- تطابق ضعیف
Fair Fit	۵- تطابق نسبی
Good Fit	۶- تطابق خوب
Excellent Fit	۷- تطابق عالی
Arias Duration	۸- مدت اریاز
Energy Duration	۹- مدت انرژی
Arias intensity	۱۰- شدت اریاز