

# روشی برای تعیین مدت زمان جنبش نیرومند زمین بر اساس شدت و انرژی، مطالعه موردی: زلزله سرپل ذهاب

آزاده نوری فرد

استاد مدعو، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران،

تهران، ایران

azadeh.noorifard@ut.ac.ir

محمدرضا تابش پور\*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

tabeshpour@sharif.edu

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

## چکیده

در مواجهه با رکورد یک زلزله، شناسایی لحظه‌ای که در تاریخچه زمانی، هنگام ورود انرژی اصلی به سازه است، اهمیت ویژه‌ای دارد. شدت و پارامترهای نشان دهنده آن به خوبی، میزان اثرگذاری زلزله را نشان می‌دهند. از نظر فنی، یافتن و تعریف پارامتری که شدت زلزله را نشان دهد بسیار مهم است. هرچند بیشینه شتاب و همچنین بیشینه‌های سرعت و جابه‌جایی، پارامترهای بسیار مهمی در مهندسی زلزله هستند ولی آگاهی از میزان شدت و زمان شدیدترین جنبش در تاریخچه زمانی زلزله، اهمیت زیادی دارد. با نگاه عمیق و هوشمندانه به تاریخچه زمانی زلزله می‌توان درک و تخمین مناسبی از زمان شدیدترین جنبش داشت. در این مقاله با مطالعه موردی تاریخچه زمانی زلزله سرپل با استفاده از نرم‌افزار سائزموسیگنال<sup>۱</sup>، روش ساده و تخمین مناسبی از شدت و توزیع آن در طول رکورد ارائه گردیده است، همچنین تلاش شده است روشی مبتنی بر مشتق شدت آریاز<sup>۲</sup> و شار انرژی، جهت تعیین دقیق بخشی از رکورد زلزله که عملاً مهم‌ترین سهم انرژی در آن بازه به سازه منتقل می‌شود، ارائه گردد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد ارتباط دقیق و حساب شده‌ای بین تاریخچه زمانی و ویژگی‌های آن با شدت وجود دارد. همچنین با بررسی روش ارائه شده جهت تعیین مدت موثر پیشنهادی و مقایسه طیف‌های حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که در اغلب مواقع نیازی به در نظر گرفتن کل تاریخچه زمانی زلزله برای تحلیل‌های دینامیکی نبوده و به این ترتیب صرفه‌جویی قابل‌ملاحظه‌ای در زمان و هزینه ایجاد خواهد شد. با استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله برای مدت زمان موثر رکورد مورد نظر، تا ۱۵ برابر زمان تحلیل دینامیکی کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: رکورد زلزله، شدت آریاز، شار انرژی، مدت تداوم، زلزله سرپل ذهاب

\* نویسنده مسئول

## ۱. مقدمه

یکی از نکات مهم در مواجهه با رکورد یک زلزله این است که از چه نقطه‌ای در تاریخچه زمانی، انرژی وارد به سازه‌ها به مقداری می‌رسد که امکان تخریب ایجاد می‌شود. در اغلب تاریخچه‌های زلزله‌های شدید می‌توان یک یا دو نقطه مشخص در طول تاریخچه یافت که لحظه ورود انرژی اصلی بوده و در یک مدت زمان اندکی حرکت شدیدی در پی ایجاد شده و انرژی بزرگی به سازه وارد می‌شود. این انرژی به انرژی جنبشی و کرنشی در سازه تبدیل می‌شود و بخشی نیز توسط انواع سازوکارها تلف می‌شود. انتظار می‌رود با دقت در تاریخچه شتاب بتوان به طور تقریبی این نقطه (نقاط) را یافت. می‌توان گفت زلزله اصلی یا اصل زلزله از این نقطه شروع شده و بر حسب شرایط ممکن است تا چند ثانیه (کم یا زیاد) ادامه یابد [۱]. بازه زمانی که عمده انرژی از زلزله به سازه وارد می‌شود همان طول مدت زلزله است و خرابی‌ها در همین بازه رخ می‌دهد. طول این بازه بسیار مهم است چون خرابی و فروریزش شدیداً وابسته به همین چند سیکل شدید است. شکست کمانشی مهاربندها، شکست و انهدام دیوارهای پرکننده، ایجاد جابه‌جایی‌های ماندگار در طبقه نرم، ریزش سقف‌های غیرمنسجم در سازه‌های بنایی و اغلب سایر انواع شکست‌ها تابعی از همین طول بازه زمانی و تعداد سیکل‌ها و دامنه حرکت است. مطابق استانداردهای لرزه‌ای می‌توان از تحلیل‌های دینامیکی برای بررسی پاسخ سازه‌ها در زلزله استفاده کرد، در استاندارد ۲۸۰۰ به عنوان یکی از خصوصیات شتاب نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل سازه به مدت زمان حرکت شدید زمین اشاره شده است که مقدار آن حداقل ۱۰ ثانیه و یا سه برابر زمان تناوب اصلی سازه،

هرکدام بیشتر است، می‌بایست باشد. برای تعیین مدت زمان حرکت شدید شتابنگاشت از روش‌های معتبری مانند توزیع تجمعی انرژی می‌توان استفاده نمود [۲]. یکی از مهم‌ترین کارهای پرهزینه و زمانبر در مهندسی زلزله، تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی سازه‌ها است. در همین راستا انتخاب رکوردهای مناسب اهمیت ویژه‌ای دارد. حال اگر بتوان به صورت منطقی فقط بازه کوچک و مشخصی از کل رکورد را به عنوان تحریک پایه در نظر گرفت صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای انجام می‌شود [۳]. در ادامه نخست برخی از تحقیقات انجام شده در خصوص شار انرژی و شدت آریاز و سپس تحقیقات مرتبط با مدت حرکت زمین مرور می‌شود. سارما در مقاله‌ای، شار انرژی زمین لرزه‌های قوی در یک ایستگاه را با در نظر گرفتن گسیختگی پیش رونده یک گسل به عنوان منبع زلزله تعیین کرده است. این مطالعه نشان می‌دهد که حرکت منبع و موقعیت نسبی ایستگاه نسبت به گسل در تعیین چگالی انرژی، شار انرژی و مدت زمان زلزله در آن ایستگاه مهم است. نتایج تحلیلی با نتایج ۵ رکورد حرکت قوی که بسیار نزدیک به گسل زلزله پارکفیلد در ۲۷ ژوئن ۱۹۶۶ به دست آمده است، مطابقت خوبی دارد [۴]. تراواسارو و همکاران یک رابطه تجربی جدید برای تخمین شدت آریاز به عنوان تابعی از بزرگی، فاصله، مکانیسم گسل و نوع سایت بر اساس ۱۲۰۸ رکورد حرکت زمین ثبت شده از ۷۵ زمین لرزه در حاشیه فعال صفحه اقیانوسی ارائه کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد برای زلزله‌های بزرگ (بیش از ۷ ریشتر) شدت آریاز به طرز قابل توجهی توسط روابط قبلی زیاد تخمین زده می‌شود در حالی که برای زلزله‌های کوچک (کمتر از ۶ ریشتر) کم تخمین زده می‌شود. تغییرات اتفاقی مرتبط

با شدت آریاز بزرگتر از اغلب پارامترهای حرکت زمین مانند شتاب طیفی است. با این وجود می‌تواند برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های صلب که پاسخ آن‌ها متأثر از ویژگی‌های دوره تناوب کوتاه زمین است، مفید باشد [۵]. فولسر پیگوت و استفورد در مقاله‌ای، یک مدل جدید برای پیش‌بینی شدت آریاز، که پاسخ غیرخطی سایت را از طریق استفاده از سرعت موج برشی متوسط و ساختار ناهم‌وارانس ترکیب می‌کند، پیشنهاد کردند. به منظور تخمین اثرات حرکات زمین بر روی سیستم‌های توزیع فضایی، مهم است که همبستگی فضایی اندازه شدت در نظر گرفته شود. در حالی که مدل‌های تخمین خسارت موجود، که به عنوان ورودی شدت آریاز به کار می‌روند، این جنبه از حرکت زمین را در نظر نمی‌گیرند [۶]. بالتای و همکاران افت تنش زلزله را مستقیماً از داده‌های شدت آریاز تعیین می‌کنند. شدت آریاز یک معیار مهندسی متناسب با انتگرال قدرمطلق مجذور شتاب در طول مدت شاخص سیگنال است. بنابراین ارتباط نزدیکی با جذر میانگین مربعات شتاب دارد و می‌تواند به راحتی با افت تنش زلزله مرتبط شود. افت تنش شدت آریاز یک روش جدید برای تخمین افت تنش بدون نیاز به اصلاح سایت و مسیر است و بینش بیشتری در مورد ارتباط بین فیزیک منبع و حرکت زمین به دست می‌دهد [۷].

کمپتون و استوارت در تحقیقی، بر روی پارامترهای مدت شاخص تمرکز کرده‌اند. مدت شاخص به عنوان بازه زمانی است که در آن مقدار مشخصی از انرژی که توسط انتگرال مربع شتاب یا سرعت زمین اندازه‌گیری می‌شود، آزاد می‌شود. آن‌ها معادلات پیش‌بینی حرکت زمین را برای پارامترهای مدت شاخص به عنوان تابعی

از بزرگی، فاصله سایت از منبع، پارامترهای سایت و پارامترهای گسل-نزدیک توسعه داده‌اند [۸]. راگوناندان و لیل اثر مدت زمان حرکت زمین را بر روی فروریزش ساختمان‌های بتن مسلح بررسی کردند. نتیجه مطالعات ایشان نشان می‌دهد ریسک فروریزش ساختمان‌های تحلیل شده تحت حرکت زمین بلند مدت در مقایسه با حرکت زمین کوتاه مدت که شدت حرکت زمین مشابهی دارند، بیشتر است. ایشان پیشنهاد کردند در طراحی سازه و ارزیابی ریسک لرزه‌ای، مدت زمان حرکت زمین علاوه بر شدت و محتوای فرکانسی آن در نظر گرفته شود [۹]. باربسا و همکاران یک مطالعه تحلیلی برای ارزیابی مدت حرکت زمین بر روی خسارات سازه‌ای ساختمان‌های ۳، ۹ و ۲۰ طبقه قاب خمشی فولادی انجام داده‌اند. ۲۲ زلزله کوتاه-مدت و ۲۲ زلزله بلند-مدت برای مطالعه اثر ترکیبی شتاب طیفی و مدت شاخص حرکت زمین بر روی تغییرمکان نسبی و مقدار خسارت به کار گرفته شدند. نتایج مطالعات ایشان نشان می‌دهد از آنجایی که روش‌های ارزیابی فعلی اثرات مدت زمان حرکت زمین را در بر نمی‌گیرند، روش‌های ارزیابی مبتنی بر عملکرد و مبتنی بر استاندارد باید برای در نظر گرفتن مقدار آسیب‌های حساس به مدت زمان بازنگری شوند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد برای مقدار شتاب طیفی کم، تاثیر مدت حرکت زمین بر روی تغییرشکل و خسارت قابل ملاحظه نیست ولی برای شتاب‌های طیفی بزرگ، مدت زمان بیشتر منجر به تغییرمکان نسبی و شاخص‌های خسارت بیشتر می‌شود. همچنین حرکت زمین بلند مدت، منجر به تغییرشکل‌های بیشتر تحت مقدار مشابه شتاب طیفی می‌شود [۱۰]. میمندی پاریزی و همکاران در مطالعه‌ای، یک معادله

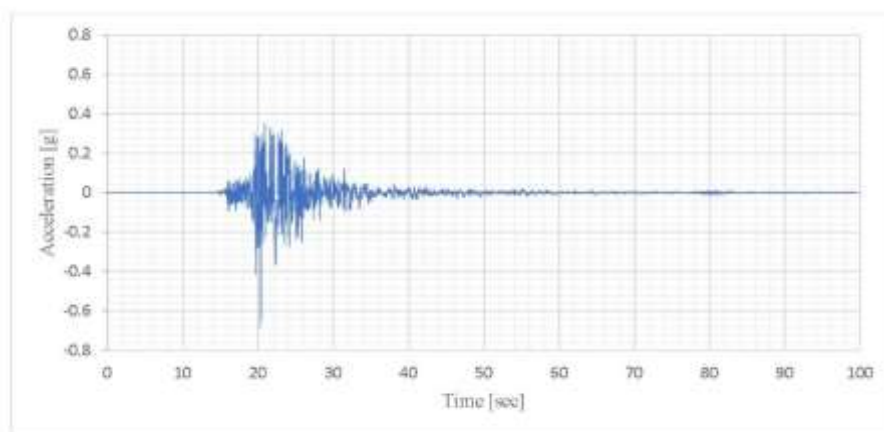
جدید برای مدت شاخص با استفاده از داده‌های حرکات قوی زمین ایران شامل ۲۲۲۸ رکورد از ۷۴۹ زلزله با بزرگای کوچک تا بزرگ تا سال ۲۰۱۸ ارائه کرده‌اند. این مدل می‌تواند برای تخمین مدت شاخص زلزله‌هایی با بزرگای گشتاوری  $4/5$  تا  $7/6$  و فاصله گسیختگی تا ۲۰۰ کیلومتر به کار رود [۱۱]. رضایی منش و صفری در مطالعه‌ای یک معادله تجربی برای پیش‌بینی مدت پایه و مدت یکنواخت با استفاده از داده‌های شتابنگاشت حرکت شدید زمین ایران در زلزله‌های کم عمق تا سال ۲۰۱۸ ارائه کرده‌اند. داده‌ها شامل ۱۱۴۷ رکورد از ۲۱۳ زلزله با بزرگای ۵ تا  $7/8$  ریشتر بوده است. در مقایسه با روابط موجود، این معادله در بازه گسترده‌تری از آستانه شتاب (از  $0.05g$  تا  $0.3g$  با فاصله  $0.05$ ) توسعه یافته است [۱۲]. زعفرانی و سقراط با استفاده از ۲۹۶۵ تاریخچه زمانی سه مولفه از ۶۵۴ زلزله ایران با بزرگی  $3/5$  تا  $7/7$  در فاصله کمتر از ۳۰۰ کیلومتری که در سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۹ ثبت شده است، معادلات تجربی محلی برای

پیش‌بینی اندازه‌های شدت حرکت غیرطیفی زمین، از جمله شدت آریاز، سرعت مطلق تجمعی و مدت زمان حرکات زمین پیشنهاد کردند و در تحلیل‌ها، مدت شاخص را ۵ تا ۷۵ درصد و ۵ تا ۹۵ درصد شدت آریاز در نظر گرفتند [۱۳].

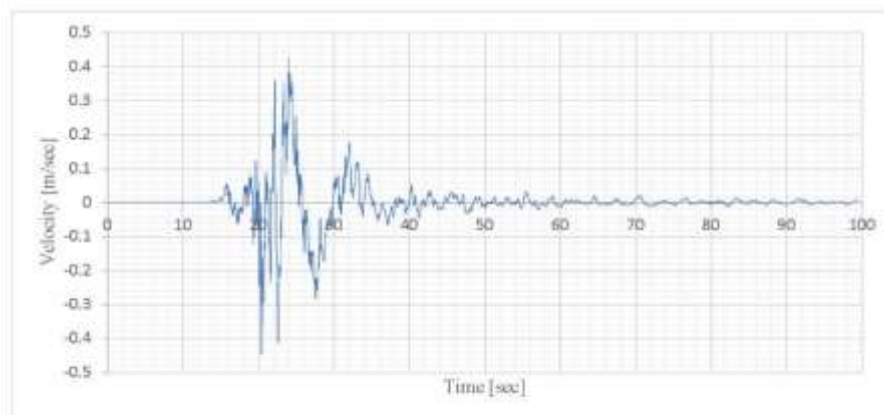
در این مقاله ضمن بررسی مفاهیم شدت، شار انرژی و مدت تداوم به مطالعه موردی رکورد زلزله سرپل ذهاب پرداخته شده است و در این خصوص مطالعه تطبیقی بین تاریخچه زمانی شتاب، سرعت، جابه‌جایی و منحنی شدت آریاز و شار انرژی انجام شده است. در ادامه با استفاده از مشتق شدت آریاز و شار انرژی روشی برای تعیین مدت موثر پیشنهاد شده است که ضمن تعیین مدت زمان کوتاهی در مقایسه با کل تاریخچه، پاسخ‌های مشابهی در طیف‌های پاسخ حاصل شود.

## ۲. تاریخچه زمانی

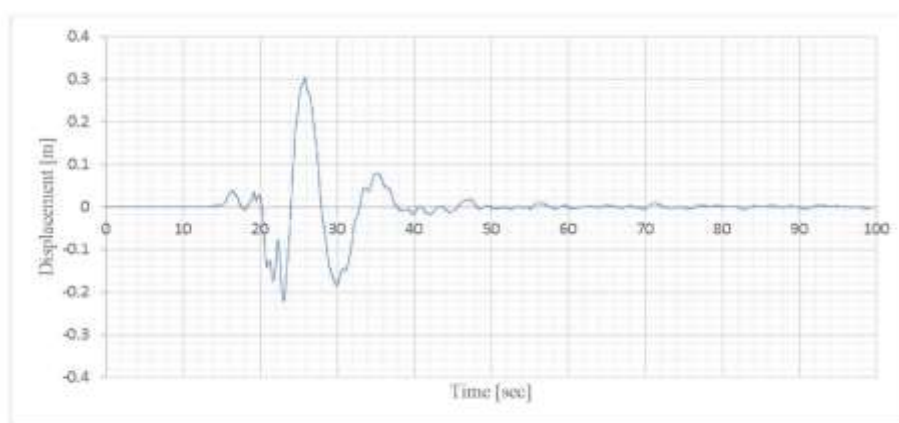
در شکل ۱ الی ۳ تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب با استفاده از نرم‌افزار سائزموسیگنال ارائه شده است [۱۴].



شکل ۱. تاریخچه زمانی شتاب مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب



شکل ۲. تاریخچه زمانی سرعت مولفه شمالی- جنوبی زلزله سرپل ذهاب



شکل ۳. تاریخچه زمانی جابه‌جایی مولفه شمالی- جنوبی زلزله سرپل ذهاب

و چون مدت حرکت بر آن مؤثر است، جذر میانگین مربعات شتاب در کاربردهای مهندسی بسیار مفید است، اما مقدار آن به روش معرفی مدت حرکات نیرومند بستگی دارد. مقدار جذر میانگین مربعات شتاب برای مولفه شمالی-جنوبی سرپل (0.05g) محاسبه شده است.

#### ۴. شدت آریاز

پارامتری که رابطه‌ی بسیار نزدیک با جذر میانگین مربعات شتاب دارد شدت آریاز (آرتورو آریاز مهندس اهل شیلی، ۱۹۷۰) است. شدت آریاز یک پارامتر حرکت زمین است که پتانسیل مخرب بودن یک زلزله

#### ۳. جذر میانگین مربعات شتاب

پارامتر منفردی که اثرات دامنه و محتوای فرکانسی رکورد یک حرکت نیرومند را در بر می‌گیرد، جذر میانگین مربعات شتاب است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵].

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt} = \sqrt{\lambda_0} \quad (1)$$

که  $T_d$  مدت حرکت شدید و  $\lambda_0$  شدت متوسط (یا متوسط مربعات شتاب) است. از آنجایی که انتگرال در معادله‌ی ۱ تحت تأثیر زیاد شتاب‌های بزرگ با فرکانس بالا نیست (که فقط روی یک پریود کوتاه رخ می‌دهد)

را بر اساس انتگرال مربع تاریخچه زمانی شتاب نشان می‌دهد [۵] و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

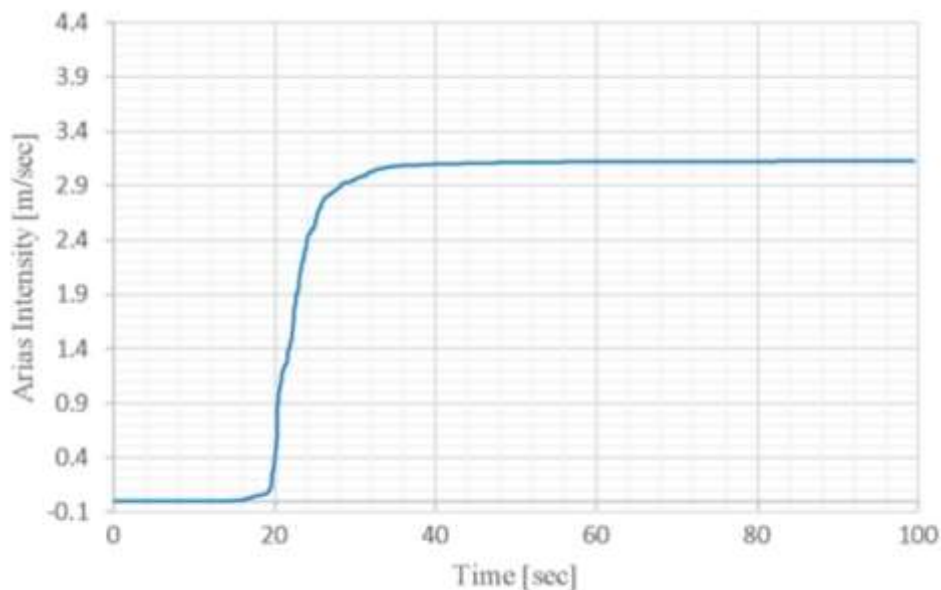
$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt = \frac{\pi}{2g} I_0 \quad (2)$$

انتگرال‌گیری (جمع کردن) مربعات دامنه در طول زمان با انرژی ارتباط دارد. در جذر میانگین مربعات شتاب از مجموع (انتگرال) مربعات شتاب، میانگین (با تقسیم بر  $T_d$ ) و جذر گرفته می‌شود. در حالی که در اینجا این دو کار انجام نمی‌شود. توجه شود که بعد شدت آریاز بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. شدت آریاز به عنوان یک اندازه شدت موثر برای تخمین خسارات زلزله شناخته می‌شود [۵ و ۶]. این حقیقت که شدت آریاز مستقل از دوره تناوب سیستم‌های مهندسی است کاربرد آن را در طیف وسیعی از مسائل مهندسی از جمله پاسخ دینامیکی سازه‌ها، پایداری لرزه‌ای شیب و روانگرایی افزایش می‌دهد [۵]. مقدار بیشینه شدت آریاز برای مولفه شمالی-جنوبی سرپل 3.13 m/sec محاسبه شده است.

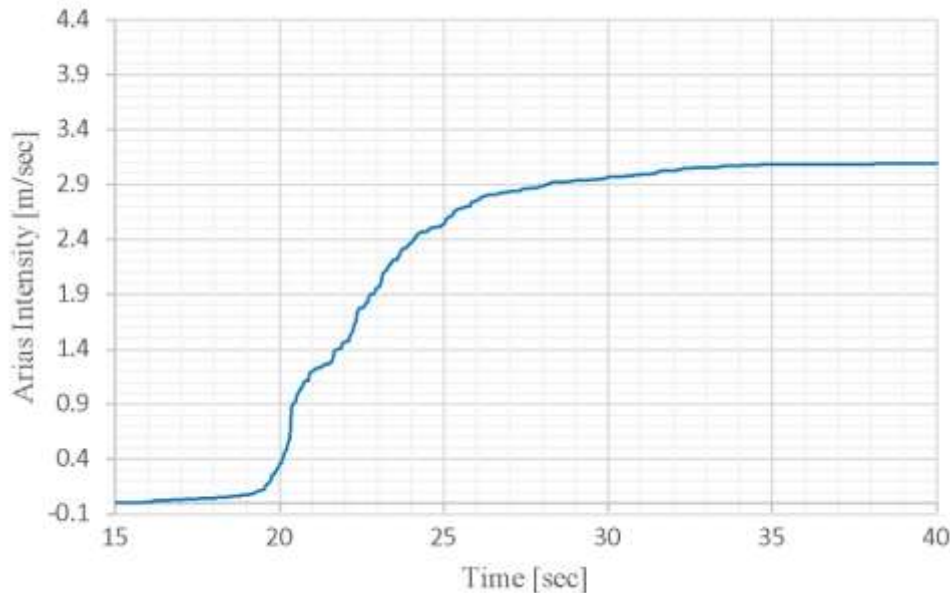
در ادامه به نتایج حاصل از شدت آریاز در مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل پرداخته می‌شود. با دقت در شکل

۴ ملاحظه می‌شود که جهشی در نمودار شدت آریاز مولفه شمالی-جنوبی سرپل در ثانیه ۲۰ رخ می‌دهد، این لحظه‌ایست که خرابی شروع می‌شود. طول این جهش حدود ۵ ثانیه بوده و عملاً قبل از ثانیه ۳۰ به اشباع می‌رسد. حتماً مهم‌ترین اتفاق مربوط به تاریخچه شتاب در همین بازه رخ داده است. از روی نمودار شدت نیز می‌توان مدت تداوم را مشخص نمود، از زمانی جهش و خرابی‌ها شروع شده تا زمانی که جهش پایان می‌یابد. شناسایی مدت تداوم کمک می‌کند تا در انتخاب رکورد برای تحلیل تاریخچه زمانی، تنها بخش مورد نیاز به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شود و زمان به شدت کاهش یابد، خروجی این بخش از رکورد با کل رکورد تفاوتی نخواهد داشت.

برای درک راحت‌تر روند تغییرات و جهش‌های موجود در تابع شدت آریاز، تابع مورد نظر در شکل ۵ در بازه ۱۵ تا ۴۰ ثانیه رسم شده است. ملاحظه می‌شود که شدیدترین جهش در ثانیه ۲۰ تا ۲۱ رخ داده است و جهش بعدی در ثانیه ۲۲ تا ۲۴ می‌باشد.



شکل ۴. شدت آریاز در بازه صفر تا ۱۰۰ ثانیه مولفه شمالی - جنوبی سرپل ذهاب



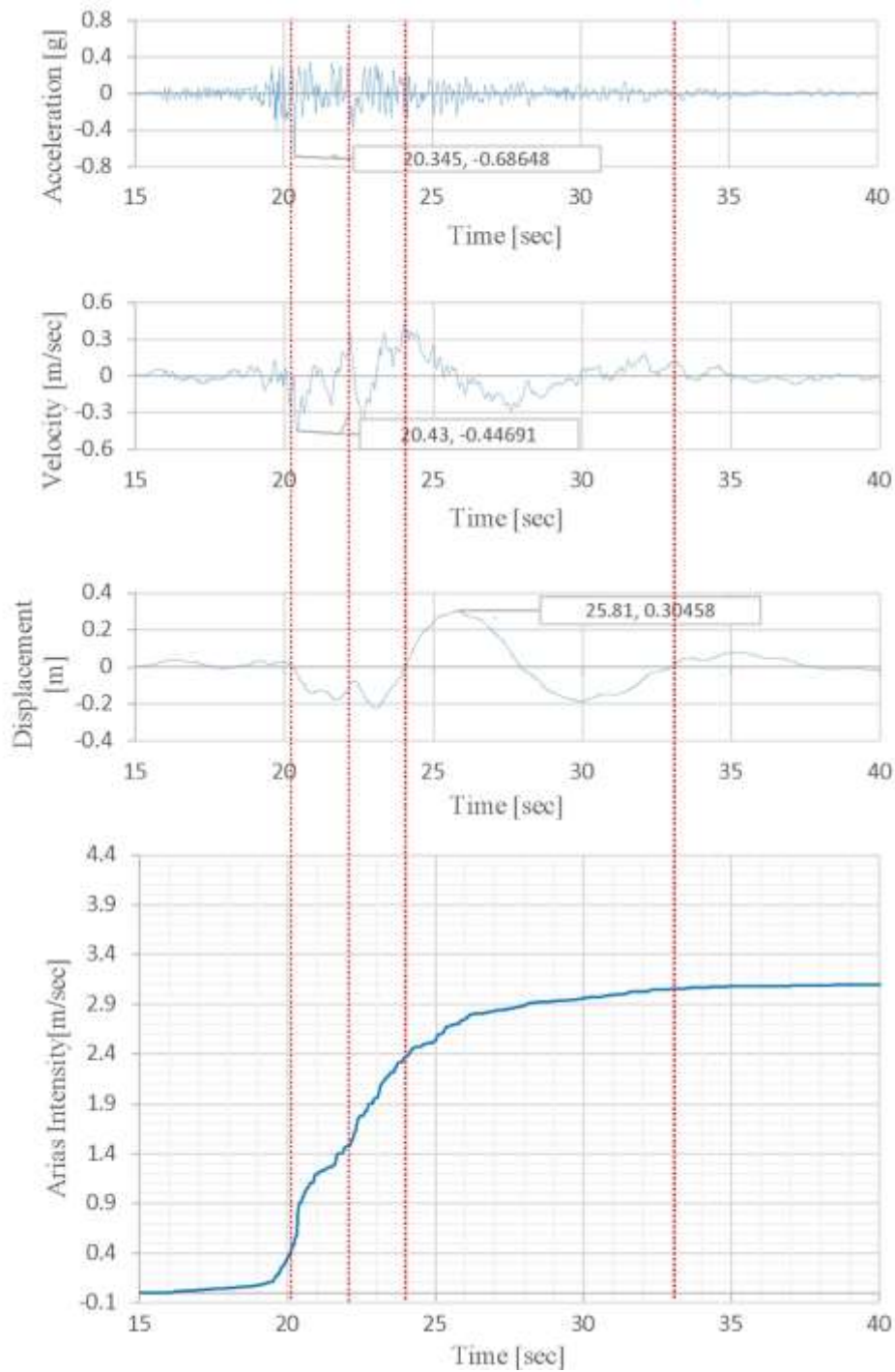
شکل ۵. شدت آریاز در بازه ۱۵ تا ۴۰ ثانیه مولفه شمالی - جنوبی سرپل ذهاب

در سازه‌های کوتاه (۱ تا ۵ طبقه) و متوسط (۶ تا ۱۰ طبقه) است را تخمین می‌زند و برای سازه‌های بلند (بلندتر از ۱۰ طبقه) چندان مناسب نیست. البته توجه شود که ممکن است برخی رکوردهای خاص و در شرایط ساختگاهی مشخص، تاریخچه شتاب زلزله به نحوی باشد که این شدت برای سازه‌های بلند نیز با دقت خوبی تناسب داشته باشد.

##### ۵. نمودار شار انرژی

شار انرژی یک زلزله در یک ایستگاه به عنوان انرژی ساطع شده در واحد سطح جبهه موج در واحد زمان تعریف می‌شود [۴]. نمودار هیوسید نمایشگر ساختار شدت آریاز می‌باشد در سال ۱۹۶۹ توسط هیوسید پیشنهاد شده است [۱۶]. نمودار شار انرژی نشان‌دهنده ساختار چگالی انرژی می‌باشد. در این خصوص به کار بومر و مارتینز-پیرا برای بحث کامل و

در شکل ۶ از ثانیه ۲۰ که محل متناظر با  $PGA^4$  (در اینجا منطبق بر  $PGV^5$  اول می‌باشد.) است، مهم‌ترین جهش در تابع شدت ملاحظه می‌شود. توجه شود که در صورت شدید بودن زلزله، در چنین لحظه‌ای مهم‌ترین خرابی‌ها رخ می‌دهد. با توجه به اینکه در تاریخچه سرعت، بیشینه قابل ملاحظه دیگری در ثانیه ۲۴ وجود دارد از آنجا که مقدار شتاب در این لحظه نسبت به  $PGA$  خیلی کمتر است ولی در تابع شدت عملاً جهش و اتفاق خاصی رخ نداده و می‌توان گفت که سرعت به تنهایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در شدت ندارد. نکته قابل توجه این است که نمودار آریاز در ثانیه ۲۵ به اشباع می‌رسد ولی در این مدت هنوز  $PGD^6$  رخ نداده است.  $PGD$  در حدود ثانیه ۲۶ رخ می‌دهد. لازم است توجه شود شدت آریاز یک نکته اساسی دارد؛ چون فلسفه شدت آریاز مترتب به مربع شتاب است در نتیجه شدت خرابی و زمانی از زلزله که متناظر خرابی



شکل ۶. بررسی تطبیقی شدت آریاز با پارامترهای نشان دهنده شدت در تاریخچه زمانی مولفه شمالی- جنوبی سرپل ذهاب

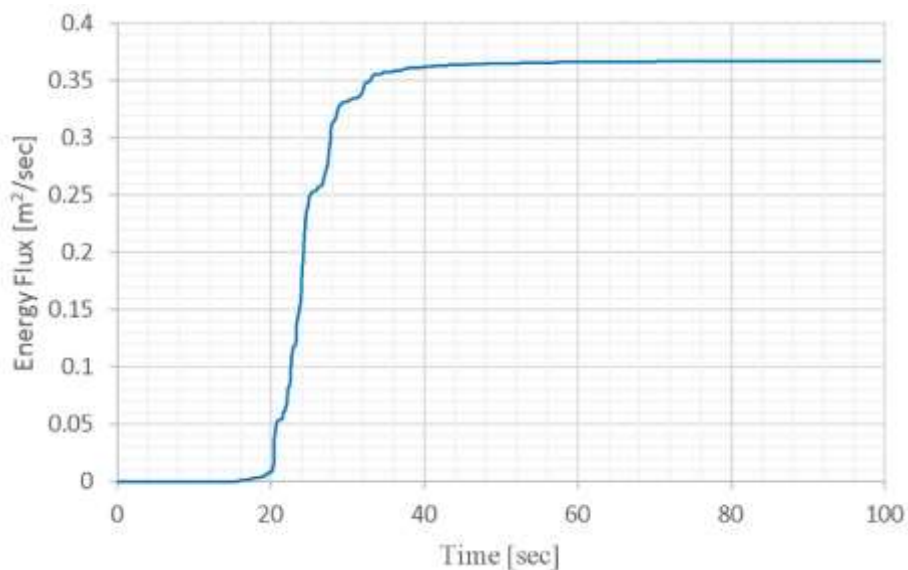
و بلند جبران می‌کند. نمودار شار انرژی مولفه شمالی - جنوبی سرپل در بازه صفر تا ۱۰۰ ثانیه در شکل ۷ و در بازه ۱۵ تا ۴۰ ثانیه در شکل ۸ ارائه شده است.

مرتبط در مورد موضوع ارجاع داده می‌شود [۱۷]. نمودار شار انرژی تا حدودی بعضی از اشکالات شدت آریاز که مبتنی بر شتاب است را برای سازه‌های متوسط

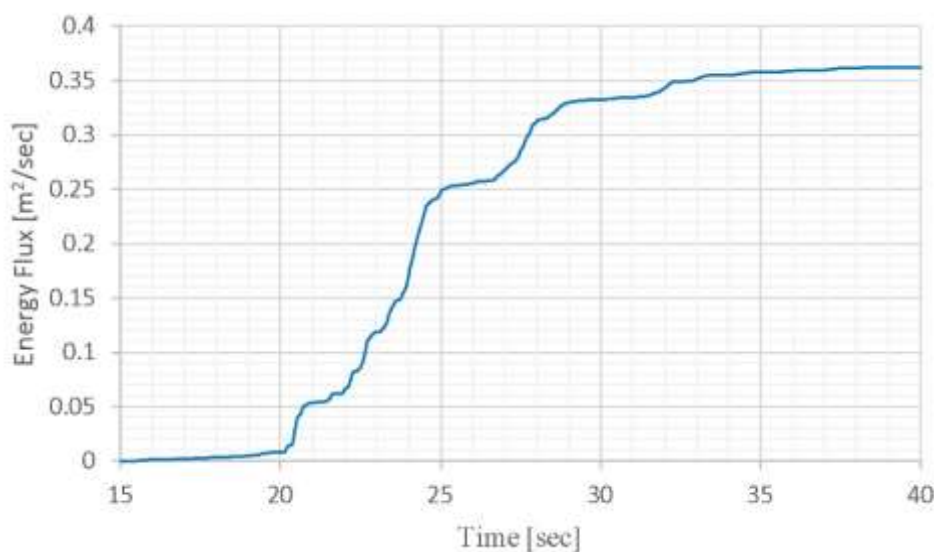


رخ می‌دهد یعنی اثرات سرعت هم دیده می‌شود. در نتیجه برای کشف زمان آسیب دیدن سازه‌های بلند و متوسط در کنار نمودار شدت آریاز، باید به نمودار شار انرژی نیز توجه شود.

مشاهده می‌شود در ثانیه ۲۰ یک انرژی به سیستم وارد می‌شود، بعد از آن در ثانیه ۲۴ یک افزایش آنی (پله) و سپس در ثانیه ۲۷ یک افزایش آنی (پله) دیگر رخ داده است نهایتاً در ثانیه ۳۳ اشباع می‌شود. مشاهده می‌شود روند اشباع شدن در نمودار شار انرژی دیرتر



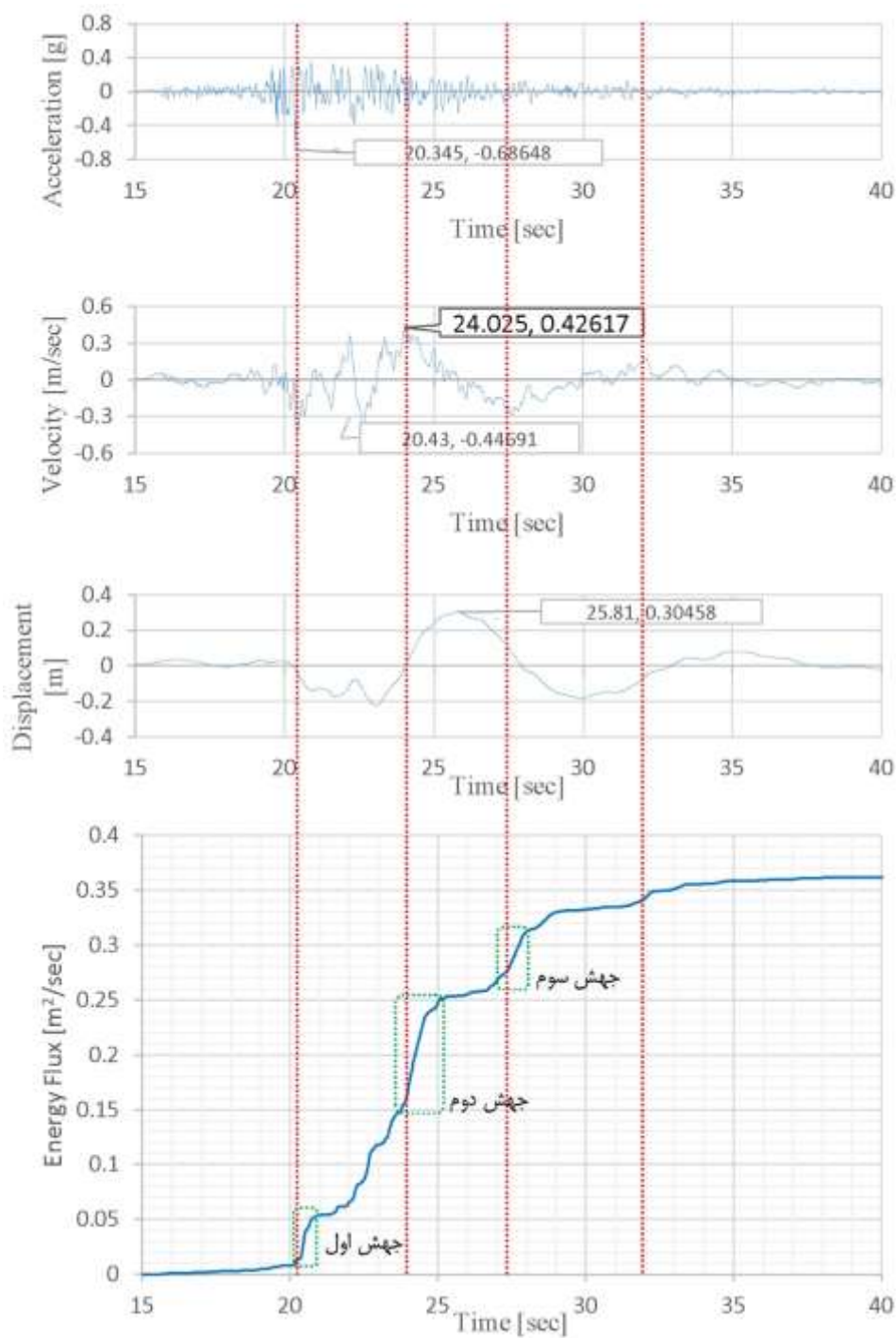
شکل ۷. شار انرژی در بازه صفر تا ۱۰۰ ثانیه مولفه شمالی- جنوبی سرپل ذهاب



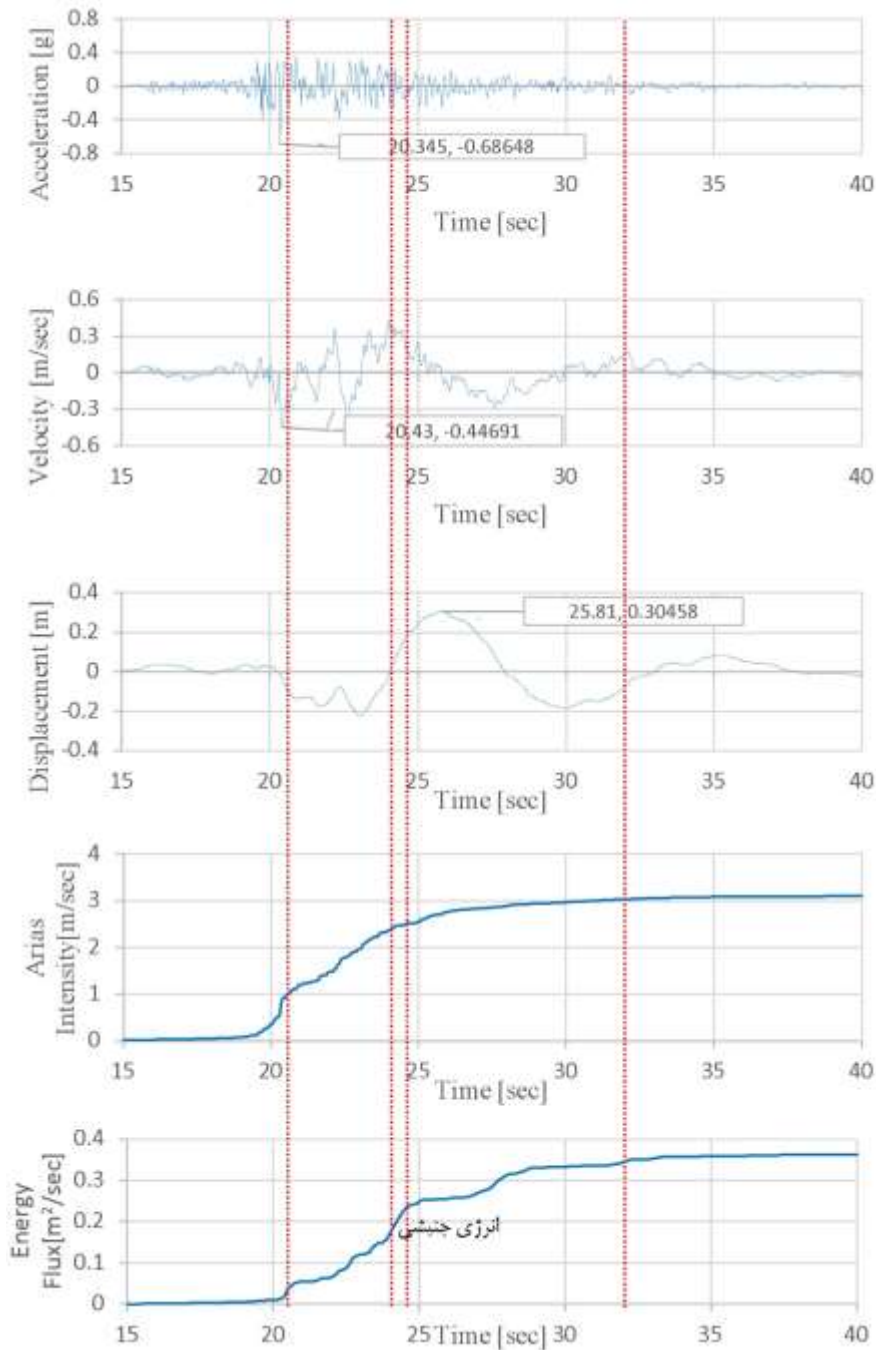
شکل ۸. شار انرژی در بازه ۱۵ تا ۴۰ ثانیه مولفه شمالی- جنوبی سرپل ذهاب

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در نمودار شار انرژی سه جهش وجود دارد. یکی در حدود ۲۰/۵ ثانیه تا ۲۱ ثانیه، یکی در ۲۴ تا ۲۵ ثانیه و دیگری در ۲۷/۵ تا ۲۸ ثانیه رخ داده است. جهش اول در موقعیت PGA و همچنین PGV ارائه شده در نرم‌افزار ساینموسینگنال است، جهش دوم در موقعیتی است که می‌توانست PGV باشد، طول جهش دوم از جهش اول بیشتر هم است، جهش اول از صفر تا ۰/۰۵ است ولی جهش دوم از ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ است یعنی جهش دوم دو برابر جهش اول انرژی دارد. منطقی است زمانی که سرعت بیشینه می‌شود یک دفعه یک انرژی فوق العاده به سیستم وارد شود و در همین جاست که تخریب‌های مهم رخ می‌دهد، در این نقطه از زمان مقدار جابه‌جایی صفر است، چون سرعت مشتق جابه‌جایی است. جهش سوم در یک نقطه حداکثری دیگر در قعر منحنی تاریخچه زمانی سرعت است. در جایی که مقدار سرعت حداکثر است انتظار می‌رود جابه‌جایی صفر باشد که با انتقال این نقاط بر روی منحنی تاریخچه زمانی جابه‌جایی این امر تایید می‌شود، در این نقطه از زمان شتاب قابل توجهی وجود ندارد. موارد فوق به خوبی نشان می‌دهند هرگاه جهش‌های نمودار شار انرژی مشخص شود، نقاط شروع جهش‌ها متناظر است با

جاهایی که سرعت بیشینه است و از رابطه مشتق و انتگرال انتظار می‌رود در این نقاط جابه‌جایی صفر باشد. دو مطلب وجود دارد یکی مقدار تغییرات انرژی به تغییرات زمان یا همان شیب منحنی شار انرژی  $\frac{\Delta E}{\Delta t}$  و دیگری میزان تغییرات انرژی  $\Delta E$  است. درست است که شیب منحنی  $\frac{\Delta E}{\Delta t}$  در جهش اول بیشتر است ولی تغییرات انرژی موضعی  $\Delta E$  در جهش دوم بیشتر است. در نتیجه اینکه گفته شود در ثانیه ۲۰/۴۳ مقدار سرعت ۰/۴۴ متر بر ثانیه است ولی در ۲۴/۰۲ ثانیه مقدار سرعت ۰/۴۲ متر بر ثانیه است و در نتیجه در ثانیه ۲۰/۴۳ PGV رخ داده است خیلی منطقی نیست. جهش دوم خیلی بیشتر با شکل PGV همخوانی دارد چون مقدار انرژی که زلزله به سیستم وارد می‌کند بیشتر است. پس می‌توان در هر دو نقطه PGV در نظر گرفت. در شکل ۱۰ یک بررسی تطبیقی بین شدت آریاز و شار انرژی با پارامترهای نشان دهنده شدت در تاریخچه زمانی مولفه شمالی-جنوبی سرپل انجام شده است. توجه شود که سرعت قابل‌ملاحظه هرچند منجر به انرژی جنبشی قابل‌ملاحظه‌ای می‌شود ولی با مقایسه شدت آریاز و شار انرژی در محل سرعت‌های بیشینه ملاحظه می‌شود که شدت عملاً تابعی از شتاب است و نه سرعت.



شکل ۹. بررسی تطبیقی شار انرژی با پارامترهای نشان دهنده شدت در تاریخچه زمانی مولفه شمالی- جنوبی سرپل ذهاب



شکل ۱۰. بررسی تطبیقی شدت آریاز و شار انرژی با پارامترهای نشان دهنده شدت در تاریخچه زمانی مولفه شمالی- جنوبی سرپل ذهاب

پیشنهاد شده است. مقدار این پارامتر برای مولفه

شمالی- جنوبی سرپل 0.68 g می‌باشد.

### ۶. پارامتر A95

پارامتر A95 شتاب متناظر با حصول ۹۵٪ از شدت

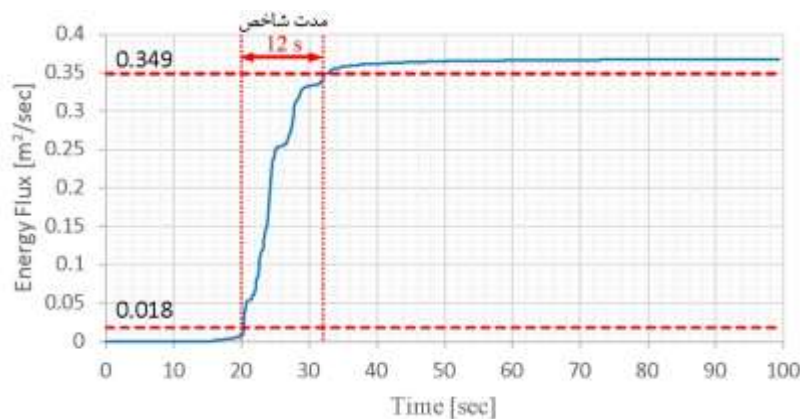
کل آریاز است و در سال ۱۹۸۷ توسط سارما و ینگ

## ۷. مدت (تداوم)

مدت حرکت شدید زمین (تداوم)، اثر قابل ملاحظه‌ای بر خرابی‌های زلزله دارد. یک حرکت با مدت کوتاه حتی اگر دامنه‌ی بزرگی داشته باشد، ممکن است تعداد کافی سیکل بار، جهت رسیدن سازه به گسیختگی ایجاد نکند. از طرف دیگر یک حرکت با دامنه‌ی متوسط اما مدت طولانی، سیکل‌های بارگذاری کافی برای ایجاد خرابی در سازه تولید خواهد کرد. مدت یک حرکت نیرومند زمین، به زمان لازم برای آزاد شدن انرژی کرنشی جمع شده از طریق شکست در امتداد گسل، بستگی دارد. با افزایش طول یا سطح گسیختگی گسل، زمان لازم برای گسیختگی افزایش می‌یابد [۱]. به عنوان یک نتیجه، زمان حرکات نیرومند با افزایش بزرگای زلزله افزایش می‌یابد. مدت حرکات زمین متناسب با ریشه‌ی سوم گشتاور لرزه‌ای است. شتاب‌نگاشت زلزله، شامل تمام شتاب‌ها از زمان شروع تا زمان بازگشت حرکات زمین به سطح اولیه خود

است. برای کاربرد مهندسی، تنها بخش حرکات شدید یک شتاب‌نگاشت مورد توجه است. روش‌های مختلفی برای ارزیابی مدت حرکات شدید یک شتاب‌نگاشت مطرح شده است.

- مدت پایه<sup>۷</sup> به عنوان زمان میان اولین و آخرین تجاوز از یک مقدار شتاب‌آستانه (مثلاً 0.05 PGA) تعریف می‌شود.
  - مدت یکنواخت<sup>۸</sup> که عبارت‌است از کل زمانی که شتاب از آستانه‌ی مشخصی (0.05 PGA) بزرگ‌تر شود.
  - مدت شاخص<sup>۹</sup> تعریف دیگری است براساس فاصله‌ی زمانی بین نقاطی که ۵٪ و ۹۵٪ انرژی کل ثبت می‌شود. مقدار مدت شاخص بر روی نمودار شار انرژی مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل در شکل ۱۱ ترسیم شده است.
- مدت مؤثر<sup>۱۰</sup> که براساس مفهوم مدت شاخص بوده ولی هر دو فاز آغاز و انتهای جنبش نیرومند با معیارهای مطلق سنجیده می‌شوند.



شکل ۱۱. مدت شاخص بر روی نمودار شار انرژی مربوط به مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب

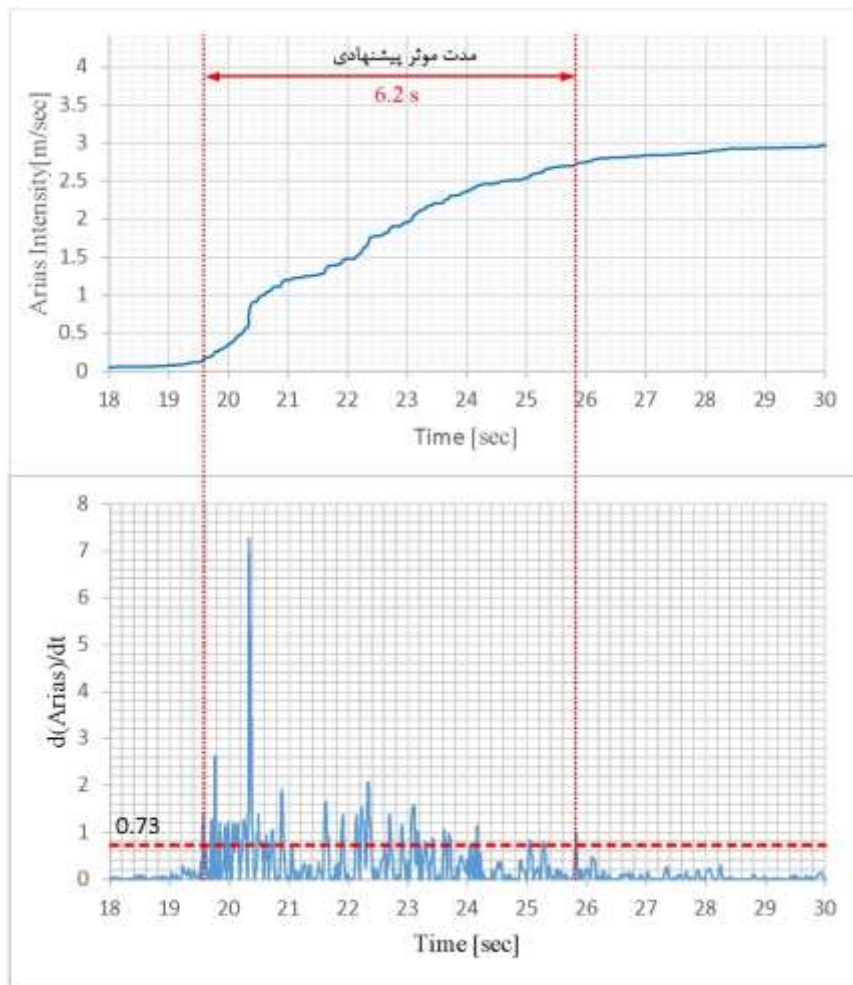
## ۸. مدت مؤثر پیشنهادی

در این پژوهش ذیل تعریف مدت مؤثر، یک تعریف جدید تحت عنوان مدت مؤثر پیشنهادی ارائه شده

است. به این منظور لازم است ابتدا روند تغییرات (مشتق) شدت آریاز و شار انرژی بررسی شود. روی نمودار مشتق شدت آریاز و شار انرژی، یک خط افقی

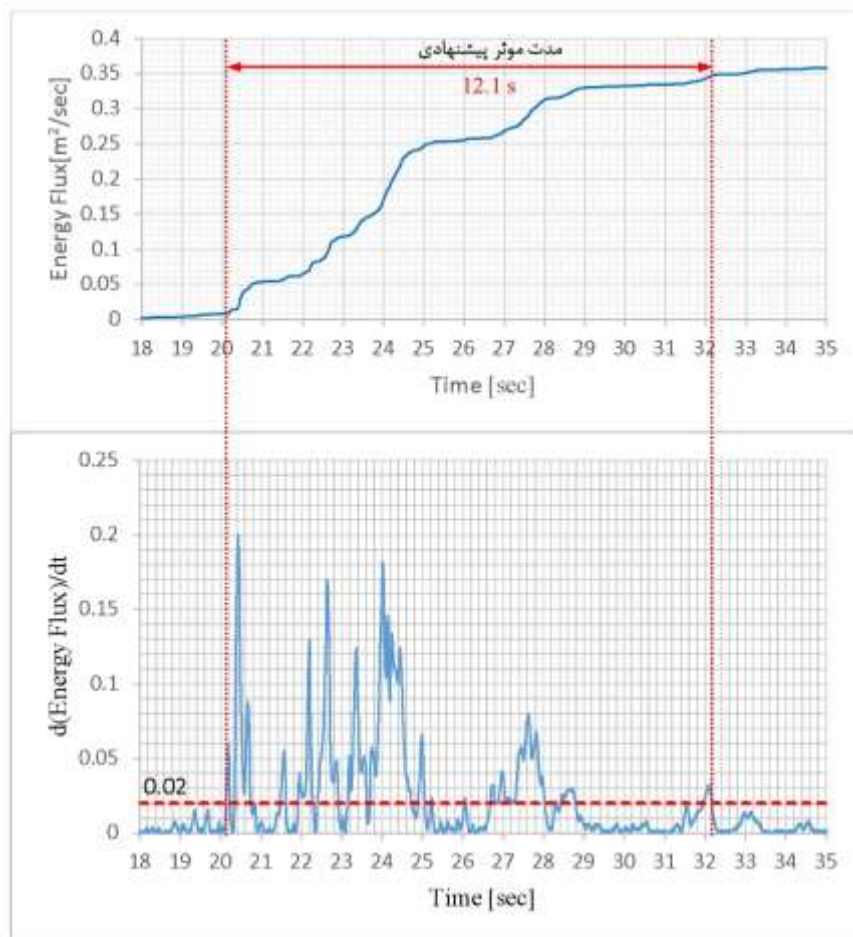
باشد. مدت موثر پیشنهادی بر روی نمودار شدت آریاز و مشتق شدت آریاز مربوط به مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب در شکل ۱۲ و مدت موثر پیشنهادی بر روی نمودار شار انرژی و مشتق شار انرژی مربوط به مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب در شکل ۱۳ ترسیم شده است.

به میزان ۱۰٪ پیک نمودار ترسیم می‌شود، از محل برخورد منحنی مشتق با این خط افقی، در اولین و آخرین تقاطع خطوط عمودی ترسیم می‌شود که نشان دهنده بازه زمان مدت موثر پیشنهادی است. با افزایش حد پایین از ۵٪ به ۱۰٪ به مقدار قابل ملاحظه‌ای مدت زمان رکورد کاهش پیدا می‌کند بدون آنکه عملاً تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج دینامیکی غیرخطی داشته



شکل ۱۲. مدت موثر پیشنهادی بر روی نمودار شدت آریاز و مشتق شدت آریاز مربوط به مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب

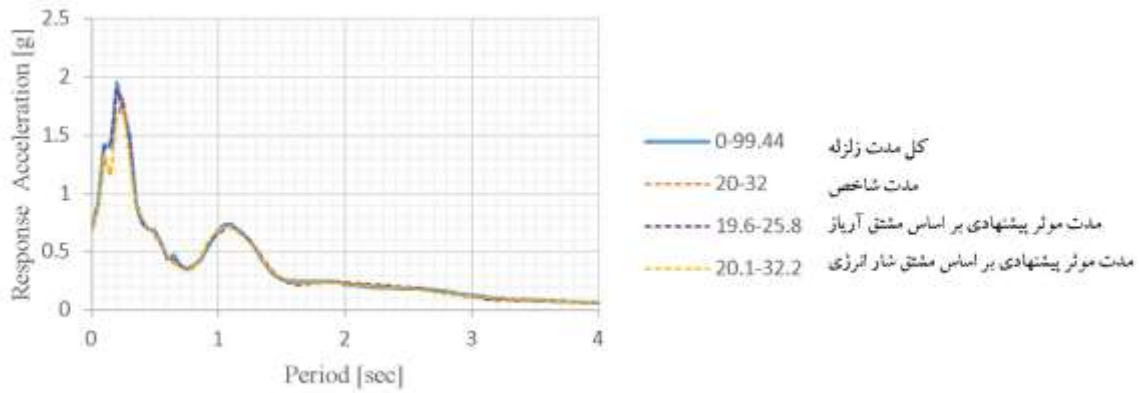




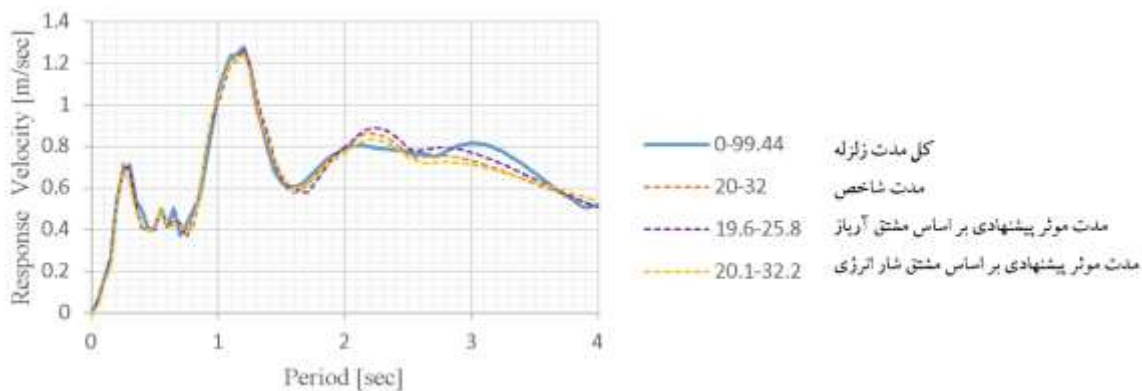
شکل ۱۳. مدت موثر پیشنهادی بر روی نمودار شار انرژی و مشتق شار انرژی مربوط به مولفه شمالی-جنوبی زلزله سرپل ذهاب

در این مورد روش مبتنی بر تغییرات (مشتق آریاز) مناسب‌ترین نتیجه را به دست داده است. بدین ترتیب که مدت زمان انجام تحلیل‌های دینامیکی نسبت به کل رکورد را تا حدود ۱۵ برابر کاهش می‌دهد. البته مشاهده می‌شود که ایده ۵٪ تا ۹۵٪ نیز نتایج مناسبی داشته است.

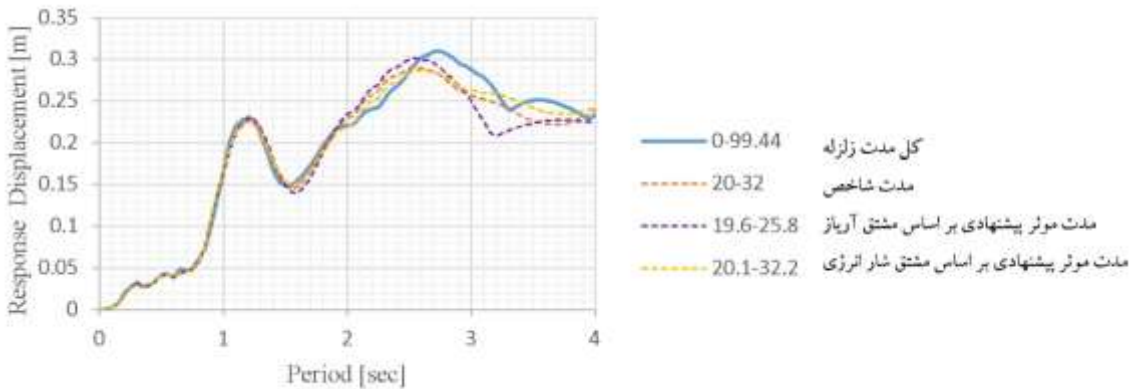
در ادامه برای کل تاریخچه زمانی زلزله سرپل ذهاب، تاریخچه مربوط به مدت زمان شاخص، تاریخچه مربوط به مدت زمان موثر پیشنهادی بر اساس نمودار شدت آریاز و مدت زمان موثر پیشنهادی بر اساس نمودار شار انرژی، نمودار طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابه‌جایی به ترتیب در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ ترسیم شده است. نمودارهای ترسیم شده در این شکل‌ها نشان می‌دهند



شکل ۱۴. نمودار طیف پاسخ شتاب برای تاریخچه کل مدت زلزله، مدت شاخص، مدت موثر پیشنهادی بر اساس مشتق آریاز و مدت موثر پیشنهادی بر اساس مشتق شار انرژی



شکل ۱۵. نمودار طیف پاسخ سرعت برای تاریخچه کل مدت زلزله، مدت شاخص، مدت موثر پیشنهادی بر اساس مشتق آریاز و مدت موثر پیشنهادی بر اساس مشتق شار انرژی



شکل ۱۶. نمودار طیف پاسخ جابه جایی برای تاریخچه کل مدت زلزله، مدت شاخص، مدت موثر پیشنهادی بر اساس مشتق آریاز و مدت موثر پیشنهادی بر اساس مشتق شار انرژی

## ۹. جمع بندی و نتیجه گیری

روش ساده و تخمین مناسبی از شدت و توزیع آن در طول رکورد ارائه گردیده است، همچنین با استفاده از مشتق شدت آریاز و شار انرژی روشی برای تعیین مدت

در این مقاله با مطالعه تطبیقی تاریخچه زمانی شتاب، سرعت، جابه جایی و منحنی شدت آریاز و شار انرژی،



موثر پیشنهاد شده است که ضمن تعیین مدت زمان کوتاهی در مقایسه با کل تاریخچه، پاسخ‌های مشابهی در طیف‌های پاسخ حاصل شود. با این روش می‌توان محدوده زمانی اصلی تاریخچه را برای تحلیل‌های دینامیکی تعیین و صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان و هزینه ایجاد نمود. با توجه به اینکه معمولاً مهندسان بیشتر از شدت به مقادیر بیشینه تاریخچه‌ها و طیف پاسخ آن‌ها توجه دارند، روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند مکمل مناسبی برای مهندسان طراح لرزه‌ای باشد. همانطور که در فرآیند تحلیل و طراحی سازه‌ها، مهارت‌های محاسبات دستی در تخمین اولیه و نیز کنترل صحت نتایج طرح از اهمیت خاصی

برخوردار است هنگامی که قرار است تحلیل‌های دینامیکی انجام شود، درک عمیق از تاریخچه زمانی رکوردها و تعیین بازه زمانی اصلی رکورد که اصل انرژی به سازه منتقل می‌شود مهارت بسیار ارزشمندی خواهد بود. به نظر می‌رسد بر اساس ماهیت رکورد زلزله به راحتی بتوان با انتخاب بخش اصلی و اثرگذار رکوردهای طولانی و کاهش تاریخچه زمانی تحریک، تا چندین برابر مدت زمان تحلیل دینامیکی سازه‌های بلند را کاهش داد که اثر چشمگیری در کاهش هزینه‌های طراحی خواهد داشت. در خصوص رکورد مورد استفاده در این مقاله این مدت زمان تا ۱۵ برابر قابل کاهش می‌باشد.

#### ۱۰. منابع

- [1] Tabeshpour, M. R., & Noorifard, A. (2023). Visual understanding and interpretation of earthquake signal (Case study of Sarpol-e-Zahab earthquake), Banayeh Danesh Press, Tehran, Iran, (In Persian).
- [2] Standard No 2800. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, (2015). 4th Edition, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran (In Persian).
- [3] Tabeshpour, M. R. (2015). Nonlinear analysis of structures, Fadak Press, Tehran, Iran, (In Persian).
- [4] Sarma, S. K. "Energy flux of strong earthquakes." *Tectonophysics* 11, no. 3 (1971): 159-173.
- [5] Travasarou, Thaleia, Jonathan D. Bray, and Norman A. Abrahamson. "Empirical attenuation relationship for Arias intensity." *Earthquake engineering & structural dynamics* 32, no. 7 (2003): 1133-1155.
- [6] Foulser-Piggott, Roxane, and Peter J. Stafford. "A predictive model for Arias intensity at multiple sites and consideration of spatial correlations." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41, no. 3 (2012): 431-451.
- [7] Baltay, Annemarie S., Thomas C. Hanks, and Norman A. Abrahamson. "Earthquake stress drop and Arias intensity." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124, no. 4 (2019): 3838-3852.
- [8] Kempton, Justin J., and Jonathan P. Stewart. "Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects." *Earthquake spectra* 22, no. 4 (2006): 985-1013.
- [9] Raghunandan, Meera, and Abbie B. Liel. "Effect of ground motion duration on earthquake-induced structural collapse." *Structural Safety* 41 (2013): 119-133.

- [10] Barbosa, Andre R., Filipe LA Ribeiro, and Luis AC Neves. "Influence of earthquake ground-motion duration on damage estimation: application to steel moment resisting frames." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 46, no. 1 (2017): 27-49.
- [11] Meimandi-Parizi, Ali, Masoud Daryoushi, Abbas Mahdavian, and Hamid Saffari. "Ground-motion models for the prediction of significant duration using strong-motion data from Iran." *Bulletin of the Seismological Society of America* 110, no. 1 (2020): 319-330.
- [12] Manesh, Mansoureh Rezaee, and Hamid Saffari. "Empirical equations for the prediction of the bracketed and uniform duration of earthquake ground motion using the Iran database." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 137 (2020): 106306.
- [13] Zafarani, H., and M. R. Soghrat. "Ground motion models for non-spectral intensity measures based on the Iranian database." *Journal of Earthquake Engineering* 27, no. 13 (2023): 3786-3806.
- [14] SeismoSignal, "SeismoSignal–Software: a computer program for signal processing and analysis of accelerogram," 2021, <https://www.seismosoft.com>.
- [15] Tabeshpour, M. R., (2017), Random vibrations and spectral analysis of structures, Banayeh Danesh Press, Tehran, Iran, (In Persian).
- [16] Husid, Raúl. "Características de terremotos. Análisis general." *Revista IDIEM* 8, no. 1 (1969): ág-21.
- [17] Bommer, Julian J., and Alejandro Martínez-Pereira. "The effective duration of earthquake strong motion." *Journal of earthquake engineering* 3, no. 02 (1999): 127-172.
- [18] Sarma, S. K., and K. S. Yang. "An evaluation of strong motion records and a new parameter A95." *Earthquake engineering & structural dynamics* 15, no. 1 (1987): 119-132.

پی نوشت

- 
- <sup>1</sup> SeismoSignal  
<sup>2</sup> Arias intensity  
<sup>3</sup> RMS (Root Mean Square)  
<sup>4</sup> Peak Ground Acceleration  
<sup>5</sup> Peak Ground Velocity  
<sup>6</sup> Peak Ground Displacement  
<sup>7</sup> Bracketed Duration  
<sup>8</sup> Uniform Duration  
<sup>9</sup> Significant Duration  
<sup>10</sup> Effective Duration