

## بررسی پدیده تشدید در طبقه بندی لرزه ای ساختمان ها

شیمای جلال نژاد خراسانی<sup>۱\*</sup>، آرش رزمخواه<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

\*shima.jalalnezhad@gmail.com

ارسال: مرداد ماه ۱۴۰۰ پذیرش: مهر ماه ۱۴۰۰

### چکیده

به دلیل محدودیت معیارهای قدیمی در توصیف ویژگی های لرزه ای ساختمان های مختلف، در این مقاله سه رویکرد جدید برای دسته بندی ساختمان ها بیان شده است. اولین روش، تغییرات شتاب شبه طیف افقی زلزله های مختلف در حالت تشدید بر حسب فاصله ساختمان تا منبع زلزله را مورد بررسی قرار می دهد. در رویکرد دوم، منحنی های نسبت طیفی افقی به قائم در حالت تشدید بر حسب دوره تناوب رسم می شود. در سومین تکنیک، بر اساس داده های شتاب نگاشت در حالت تشدید، منحنی های مربوط به پارامترهای آستانه طیفی شامل تغییر مکان آستانه طیفی و شتاب آستانه طیفی بر حسب دوره تناوب سازه تهیه می شوند. بسته به فرایند تحلیلی مورد استفاده در هر رویکرد، پس از مقایسه نتایج بر اساس منحنی های برازش داده شده از میان داده ها، طبقه بندی لرزه ای ساختمان های مختلف انجام می شود.

کلمات کلیدی: طبقه بندی ساختمان، تشدید، نسبت طیفی، سرعت موج برشی، تغییر مکان آستانه

### ۱- مقدمه

اثرات ساختمان<sup>۱</sup> نقش بسیار مهمی در توصیف جنبش های لرزه ای زمین ایفا می کند، زیرا ممکن است قبل از رسیدن موج زلزله به سطح زمین، ویژگی های خاک واقع بر روی سنگ بستر حرکت های ورودی را افزایش یا کاهش دهد [۱]. در صورت کاهش دامنه امواج ورودی، خطر قابل ملاحظه ای ساختمان و سازه های واقع بر روی سطح زمین را تهدید نمی کند. اما چنانچه اثرات ساختمان سبب افزایش دامنه امواج ورودی شود، در اصطلاح پدیده تشدید<sup>۲</sup> رخ داده است [۲]. بررسی تشدید از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و نمی توان اثر آن را در ارزیابی رفتار لرزه ای ساختمان و سازه های مرتبط با آن نادیده گرفت [۳]. یکی از کاربردهای مفهوم تشدید، دستیابی به الگویی برای طبقه بندی انواع ساختمان ها از نظر جنبه های لرزه ای وابسته به مشخصات زلزله های ورودی و رکوردهای ثبت شده توسط شتاب نگاشت های واقع بر روی سنگ بسترها می باشد [۴]. تاکنون، در بیشتر آیین نامه های موجود در جهان، پارامتر اصلی پیشنهاد شده برای طبقه بندی ساختمان ها، سرعت موج برشی بوده است [۵]. برخی از پژوهشگران [۶-۹] با مطالعه بر روی محدودیت های پارامتر سرعت موج برشی دریافتند که سرعت موج برشی صرفاً یک

<sup>1</sup> Site effects

<sup>2</sup> Amplification

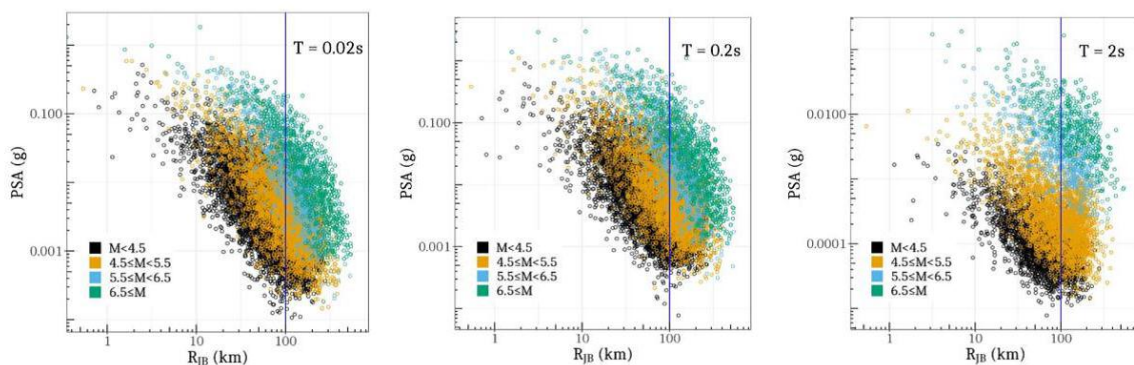
شاخص عددی است و نمی تواند بدون در نظر گرفتن ویژگی های دیگر نظیر تشدید، توصیف دقیقی از رفتار لرزه ای ساختگاه داشته باشد. معیارهای دیگری نیز پیشنهاد شده است که اطلاعات مربوط به سرعت موج برشی و ضخامت کلی لایه خاک را در طبقه بندی ساختگاه ها در نظر می گیرند [۱۰-۱۲]. مطالعات اخیر نیز با هدف توسعه طرح های جدید برای افزایش دقت طبقه بندی لرزه ای ساختگاه ها ارائه شده است [۱۳-۱۴]. تعریف معیارهای جدید برای طبقه بندی ساختگاه همواره پژوهشگران را با چالش روبرو کرده است [۱۵]. بنابراین، هدف از این مقاله، مرور چند رویکرد نوین برای طبقه بندی لرزه ای ساختگاه های مختلف با در نظر گرفتن تشدید ناشی از اثرات ساختگاه است.

## ۲- روش پژوهش

پژوهش حاضر، بر روی مفاهیم مؤثر بر دسته بندی انواع ساختگاه های متشکل از سنگ و خاک بر اساس مشخصات ژئوتکنیکی لایه ها در کنار پارامترهای لرزه ای چند زلزله تمرکز نموده است. به طور کلی، روش های نوین قابل استفاده برای طبقه بندی ساختگاه بر اساس مفهوم تشدید را می توان شامل دسته بندی طیفی توابع تشدید ساختگاه، استفاده از منحنی های نسبت طیفی افقی به قائم و استفاده از پارامترهای طیفی آستانه دانست. پارامترهای لرزه ای قابل ارزیابی برای هر یک از تکنیک های طبقه بندی به شرح ذیل بیان می شود.

### ۲-۱- دسته بندی طیفی توابع تشدید ساختگاه

یک رویکرد جدید برای طبقه بندی ساختگاه های مختلف است که با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر دسته بندی طیفی توابع تشدید، رابطه ای ریاضی برای پیش بینی جنبش زمین ارائه می دهد. به عبارت دیگر، هدف این رویکرد دستیابی به یک شیوه ساده و در عین حال قدرتمند، برای طبقه بندی ساختگاه های مختلف است. بدین منظور، تغییرات شتاب شبه طیف<sup>۱</sup> افقی (PSA) زمین لرزه های متعدد با بزرگای مختلف بر حسب فاصله ساختگاه تا منبع زلزله ( $R_{JB}$ ) مورد بررسی قرار می گیرد. سپس، به ازای مقادیر متعدد دوره تناوب، داده های لرزه ای با یکدیگر مقایسه می شوند تا بتوان از تفاوت منحنی ها به منظور طبقه بندی لرزه ای ساختگاه های مختلف بهره گرفت. معیار فاصله  $R_{JB}$  به صورت کوتاهترین فاصله افقی از یک ساختگاه تا تصویر مؤلفه قائم صفحه گسیختگی حاصل از زمین لرزه تعریف می شود و به طور گسترده برای تحلیل مدل های جنبش زمین مورد استفاده قرار می گیرد. مقیاس بندی فاصله<sup>۲</sup> برای محدوده داده های شتاب شبه طیفی افقی بر حسب معیار فاصله ساختگاه تا منبع زلزله به ازای دوره تناوب ۰/۰۲، ۰/۲ و ۲ ثانیه در شکل ۱ رسم شده است [۱۶].



شکل ۱ - تغییرات شتاب های شبه طیفی افقی زلزله بر حسب فاصله  $R_{JB}$  به ازای دوره تناوب های مختلف [۱۶]

<sup>۱</sup> Pseudo Spectral Acceleration

<sup>۲</sup> Joyner-Boore distance metric

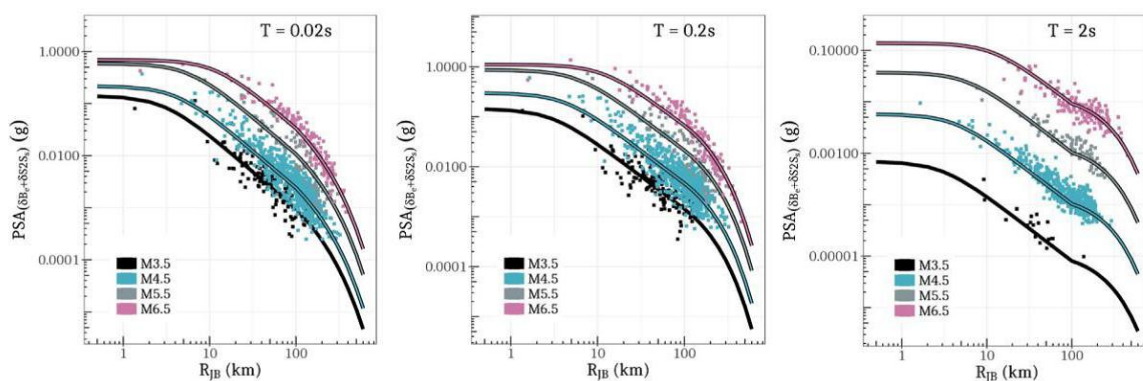
<sup>۳</sup> Distance scaling

در شکل ۱، مقدار متوسط نسبت میرایی هندسی معادل ۵٪ می‌باشد. مقیاس بندی فاصله PSA اثر منبع نزدیک<sup>۱</sup> وابسته به بزرگای زلزله را نشان می‌دهد، که برای  $M_w < 4.5$  تا فاصله ۵ کیلومتری و برای رویدادهای  $M_w \geq 6.5$  تا فاصله ۲۰ کیلومتری گسترش می‌یابد. این اثر عموماً با معرفی پارامتری به نام عمق مؤثر مطابق رابطه (۱) قابل تعیین است [۱۶، ۱۷]:

$$\ln(h) = 2.303 \left\{ \max \left[ (-0.05 + 0.15M_w), (-1.72 + 0.43M_w) \right] \right\} \quad (1)$$

که در آن،  $h$  عمق مؤثر بر حسب متر و  $M_w$  بزرگای زلزله بر حسب ریشتر است.

شکل ۱ همچنین نشان می‌دهد که شتاب شبه طیفی افقی زلزله مربوط به دوره تناوب‌های کوتاه (۰/۲ ثانیه) و متوسط (۰/۲ ثانیه) با نرخ بیشتری به ازای فواصل بزرگتر از ۱۰۰ کیلومتر کاهش می‌یابد. به کمک تحلیل‌های آماری رگرسیونی<sup>۳</sup> می‌توان داده‌های وابسته به شرایط هر زلزله منحصراً را به عنوان مقادیر شرطی<sup>۴</sup> تعریف نمود. چنانچه، تفاضل این مقادیر از داده‌های ارائه شده در شکل ۱ محاسبه شود، مقادیر بدست آمده را به عنوان داده‌های تصادفی<sup>۵</sup> شتاب شبه طیف نامگذاری می‌کنند. شکل ۲ تغییرات شتاب شبه طیفی افقی تصادفی بر حسب فاصله  $R_{JB}$  را به ازای دوره تناوب نشان می‌دهد [۱۶].



شکل ۲- تغییرات داده‌های تصادفی شتاب شبه طیفی افقی بر حسب فاصله  $R_{JB}$  به ازای دوره تناوب‌های مختلف [۱۶]

با توجه به شکل ۲، پارامتر عمق مؤثر وابسته به بزرگای زلزله، اثر منبع نزدیک بر روی شتاب شبه طیفی افقی را به ازای همه مقادیر دوره تناوب به خوبی بیان می‌کند. کاهش اثر منبع نزدیک شتاب‌های شبه طیفی مربوط به دوره تناوب‌های بالا نظیر شتاب پیک زمین<sup>۶</sup> ( $PGA$ ) وابستگی اندکی به بزرگای و فاصله دارد.

## ۲-۲- استفاده از منحنی‌های نسبت طیفی افقی به قائم

در این روش، منحنی‌های نسبت طیفی افقی به قائم<sup>۷</sup> ( $HVSR$ ) در حالت تشدید بر حسب دوره تناوب رسم می‌شود و مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای هر شکل موج ناشی از جنبش زمین، پس از دستیابی به شتاب شبه طیفی به ازای میرایی هندسی میانگین ۵٪،  $HVSR$  با تقسیم مؤلفه افقی PSA بر مؤلفه قائم متناظر با آن محاسبه می‌شود. در زمان تعیین  $HVSR$  بر اساس طیف دامنه فوریه، قبل از تقسیم طیف‌های افقی به قائم، نوعی هموارسازی لازم است. به دلیل آن که مقدار میرایی مورد استفاده در محاسبه طیف‌های پاسخ سبب همواری منحنی‌ها می‌شود، هنگامی که قرار است  $HVSR$  از طیف‌های پاسخ محاسبه می‌شود، دیگر نیازی به هموارسازی نیست. در زمان انجام محاسبات، دوره تناوب مربوط به بزرگترین پیک  $HVSR$  به عنوان نماینده دوره تناوب غالب ساختگاه در نظر گرفته می‌شود [۱۸-۱۹]. در فرایند بکارگیری این روش، اطلاعات مربوط به یک زلزله معین

<sup>1</sup> Near-source effect

<sup>2</sup> Magnitude

<sup>3</sup> Regression

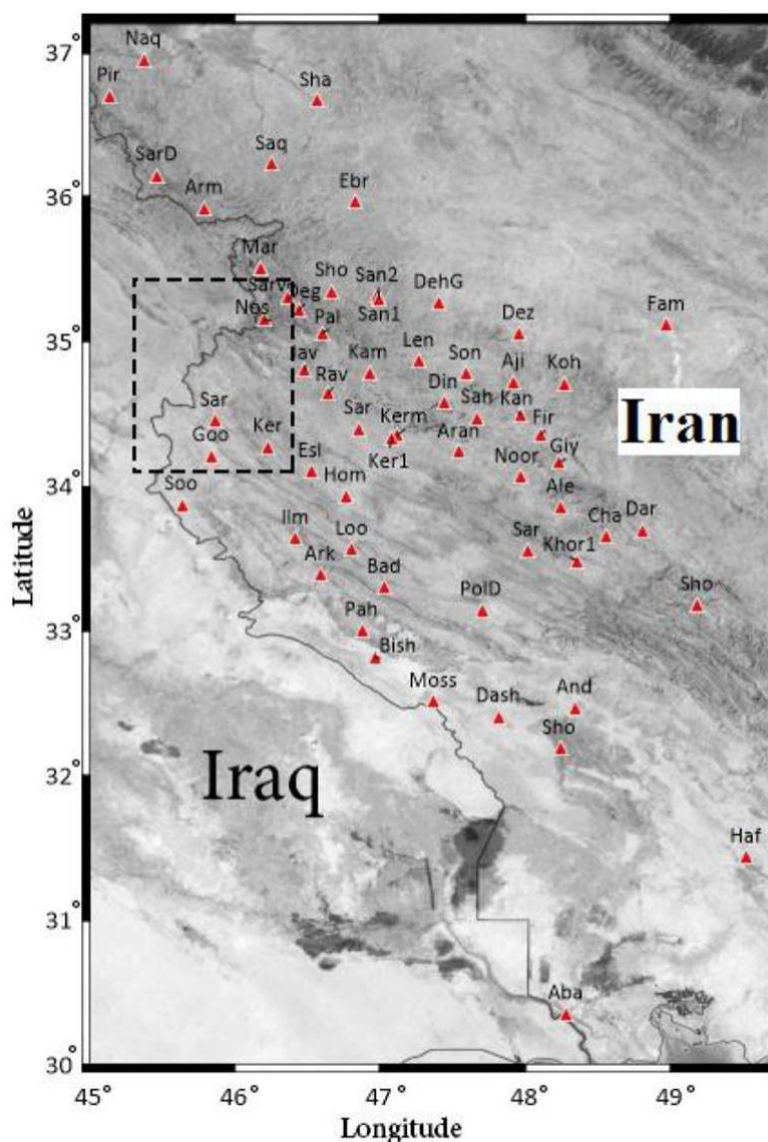
<sup>4</sup> Conditional values

<sup>5</sup> Random

<sup>6</sup> Peak ground acceleration

<sup>7</sup> Horizontal to vertical spectral ratio

به ازای ایستگاه های مختلف در نزدیکی مکان زمین لرزه مورد نظر، برداشت می شود. سپس، برای ایجاد الگوی طبقه بندی، داده های هر ایستگاه با یکدیگر مقایسه می شود و به این ترتیب، می توان ساختگاه ها را با دقت بالاتری در یک منطقه دسته بندی نمود. به عنوان نمونه، در مطالعه انجام شده توسط Yaghmaei-Sabegh and Rupakhety [۲۰] از این روش برای طبقه بندی ساختگاه در منطقه ای واقع در غرب ایران مطابق شکل ۳ استفاده نموده اند.



شکل ۳- توزیع ایستگاه های جنبش زمین (مثلث های قرمز) مورد استفاده در تحلیل و سطح گسل تخمین زده شده (کادر نقطه چین) [۲۰]

شکل ۳، ساختگاه های مورد بررسی مربوط به مناطقی در غرب ایران را نمایش می دهد که در تاریخ ۲۱ آبان ۱۳۹۶ زمین لرزه ای به بزرگی ۷/۳ ریشتر را تجربه کردند. کانون زمین لرزه در  $34^{\circ}7'38''$  درجه شمالی و  $45^{\circ}8'43''$  درجه شرقی، در نزدیکی مرز ایران و عراق به عمق کانونی ۱۷ کیلومتر از سطح زمین واقع بوده است. چندین شهر استان کرمانشاه از جمله سرپل ذهاب، جوانرود، کرند، قصر شیرین، اسلام آباد غرب و بسیاری از مناطق روستایی اطراف منبع تحت تأثیر این رویداد قرار گرفتند به طوری که بسیاری از ساختمان ها تا حدی آسیب دیده یا کاملاً تخریب شدند.

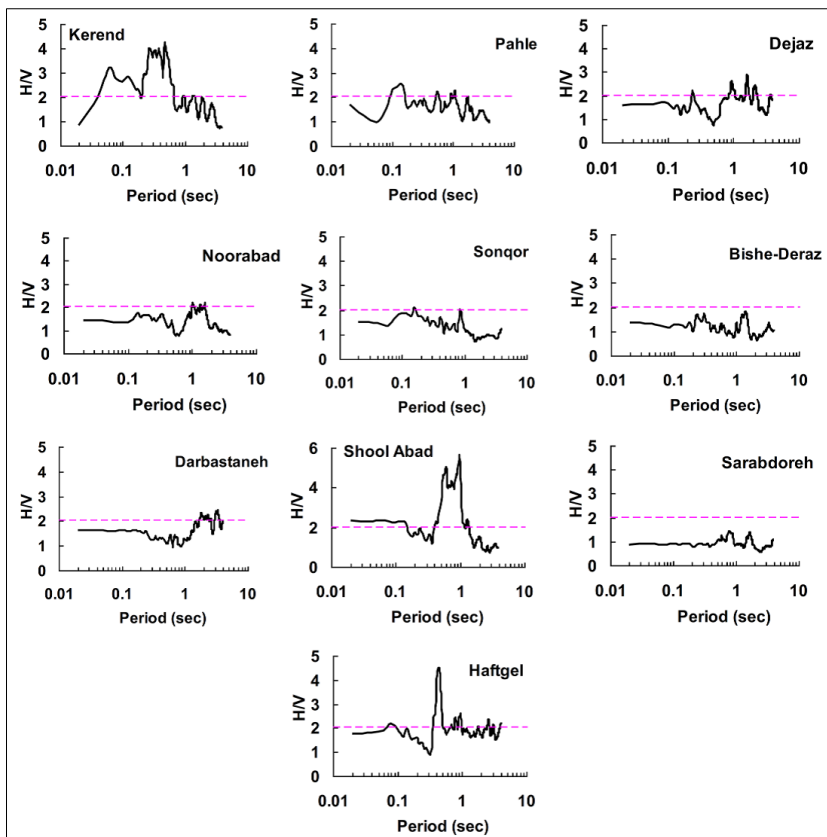
جدول ۱ - مشخصات ساختگاه های مورد بررسی از نظر معیار فاصله و سرعت موج برشی [۲۰]

No	Station name	Latitude	Longitude	Rjb (km)	Vs30(m/s)
1	Sarpolezahab	34.46	45.869	5.32	619
2	Gooresefid	34.218	45.846	31.70	403
3	Kerend	34.28	46.24	31.90	800
4	Javanrood	34.81	46.49	21.64	298
5	Loomar	33.57	46.816	126.50	413
6	Kermanshah2	34.36	47.12	84.90	Un-known
7	Eslamabadqarb	34.11	46.53	61.69	266
8	Ravansar	34.652	46.652	34.20	267
9	Homail	33.94	46.771	90.03	261
10	Arkvaz-e-Malek Shahi	33.394	46.598	135.24	325
11	Shoeisheh	35.358	46.678	71.22	Un-known
12	Dinevar1	34.583	47.446	65.46	514
13	Degaga	35.227	46.447	46.14	Un-known
14	Marivan	35.519	46.184	58.64	Un-known
15	Ilam1	33.646	46.428	103.48	Un-known
16	Badreh	33.307	47.039	162.07	466
17	Soomar	33.88	45.642	72.77	642
18	Sarabniloofar	34.405	46.859	61.35	323
19	Lenjab	34.871	47.278	92.59	Un-known
20	Kermanshah1	34.335	47.089	83.58	Un-known
21	Sarv Abad	35.311	46.37	48.01	Un-known
22	Nosood	35.161	46.204	25.63	Un-known
23	Palangan	35.068	46.605	46.12	Un-known
24	Sahne	34.48	47.68	130.06	Un-known
25	Sar Dasht	36.159	45.472	133.60	509
26	Firoozan	34.361	48.115	171.80	401
27	Kamyaran	34.791	46.929	59.726	Un-known
28	Pol Dokhtar	33.152	47.706	212.30	486
29	Aran	34.244	47.554	126.55	Un-known
30	Deh Golan	35.275	47.415	119.97	Un-known
31	Naqadeh	36.961	45.381	221.84	209
32	Dashte-e-Aabas	32.415	47.826	284.75	342
33	Shahin Dej	36.674	46.567	191.14	415
34	Chaghalvandi	33.657	48.562	238.55	616
35	Sanandaj 1	35.323	46.99	91.03	Un-known
36	Piranshahr	36.708	45.143	200.60	577
37	Dezaj	35.064	47.965	158.17	863
38	Pahle	33.009	46.884	184.81	844
39	Noor Abad	34.07	47.97	169.27	758
40	Armordeh	35.931	45.798	102.71	484
41	Mossiayan	32.519	47.377	47.37	472
42	Saqez	36.235	46.264	46.26	Un-known
43	Shoosh	32.194	48.245	48.24	319
44	Bishe-Deraz	32.825	46.974	46.97	873
45	Ebrahim-Abad	35.972	46.833	46.83	466
46	Sonqor	34.786	47.598	47.59	1477
47	Famenin	35.122	48.982	48.98	Un-known
48	Darbastaneh	33.705	48.81	48.81	1103
49	Shool Abad	33.184	49.192	49.19	1084
50	Andimeshk	32.474	48.35	48.35	Un-known
51	Aleshtar	33.86	48.254	48.25	621
52	Sarab Doreh	33.561	48.022	48.00	814
53	Giyan	34.172	48.242	48.24	731
54	Sanandaj 2	35.305	47	47.00	Un-known
55	Khoram Abad1	33.491	48.359	48.35	Un-known
56	Kangavar	34.5	47.97	47.97	Un-known
57	Haftgel	31.442	49.529	360	1046
58	Abadan	30.357	48.29	390.2	Un-known
59	Kohnoosh	34.718	48.279	48.27	Un-known
60	Ajin	34.73	47.93	47.93	Un-known

در میان داده های موجود برای جنبش زمین، رکوردهای مربوط به زلزله اصلی در ۶۰ ایستگاه با ساختگاه های متشکل از خاک یا سنگ با فاصله  $R_{JB}$  کمتر از ۳۳۰ کیلومتر در جدول ۱ جمع آوری شده است. سریل ذهاب نزدیکترین ایستگاه به کانون زمین لرزه بوده و یک پیک شتاب افقی بزرگ معادل ۶۸۶ سانتیمتر بر مجذور ثانیه را تجربه کرده است.

شکل ۴ منحنی های  $H/V$  را در ده ساختگاه متشکل از سنگ نشان می دهد. خط نقطه چین رسم شده در هر شکل، متناظر با زمان هایی است که مؤلفه افقی داده های شتاب نگاشت دو برابر مؤلفه قائم آن باشد و مطابق پیشنهاد Alessandro و همکاران [۲۱] برای ساختگاه های متشکل از سنگ و خاک، به ترتیب معادل ۲ و ۱ در نظر گرفته می شود. سه حالت مختلف تشدید در این

ایستگاه‌ها قابل مشاهده است. یک مقدار پیک قابل توجه در برخی ایستگاه‌ها مانند هفتگل (در دوره تناوب ۰/۴۲ ثانیه) مشاهده می‌شود. با این وجود، برخی از ساختگاه‌های دیگر چند تشدید در یک محدوده معین از دوره تناوب را نشان می‌دهند به طوری که یک دوره تناوب منحصر بفرد برای وقوع تشدید به خوبی قابل تعریف نیست.



شکل ۴- منحنی‌های نسبت طیفی افقی به قائم در ساختگاه‌هایی با شرط  $V_{s30} > 750 \text{ m/s}$  (سنگی) [۲۰]

دوره تناوب اصلی ساختگاه در چنین مواردی به عنوان دوره تناوب بزرگترین پیک در محدوده تشدید انتخاب می‌شود. به عنوان مثال، در ایستگاه کرنند، محدوده دوره تناوب تشدید در بازه ۰/۲۸ تا ۰/۵۲ ثانیه واقع گردیده است به طوری که بزرگترین پیک تشدید در ۰/۵۲ ثانیه اتفاق افتاده است. این روش برای نورآباد، سونقر، درباستانه، دجاز و پهله نیز اعمال شده است. ایستگاه‌هایی مانند سرابدوره و بیشه دراز دارای منحنی‌های هموارتری با مقادیر HVSR کمتر از ۲ هستند. در این ساختگاه‌ها، دوره تناوب پیک به خوبی قابل تعیین نیست. به طور کلی، ساختگاه‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه به ازای مقادیر معلوم  $V_{s30}$ ، با طیف گسترده‌ای از دوره تناوب از ۰/۱۴ تا ۲/۳۸ ثانیه مشخص می‌شوند. نتیجه گیری‌های مشابهی نیز توسط Luzi و همکاران [۲۲] ارائه شده است که دامنه پیک‌های منحنی‌های HVSR در ساختگاه‌های سنگی بر اساس سرعت موج برشی بین ۲ تا ۵/۶ تغییر می‌کند.

## ۲-۳- استفاده از پارامترهای آستانه طیفی

در این تکنیک، بر اساس داده‌های برداشت شده از رکورد زمین لرزه‌های مختلف در حالت تشدید، منحنی‌های مربوط به پارامترهای آستانه طیفی شامل تغییر مکان آستانه طیفی<sup>۱</sup> (STD) و شتاب آستانه طیفی<sup>۲</sup> (STA) بر حسب دوره تناوب سازه رسم می‌شوند. سپس، با توجه به شرایط انواع سازه‌های موجود در هر ساختگاه با فرض سختی و کاربری‌های مختلف، منحنی‌ها با

<sup>۱</sup> Spectral Threshold Displacement

<sup>۲</sup> Spectral Threshold Acceleration

یکدیگر مقایسه می‌شوند تا امکان دستیابی به یک سیستم طبقه بندی ساختمانگاه فراهم گردد [۲۳]. از دیدگاه مقاومت مصالح، آسیب‌های لرزه‌ای در سازه‌ها ناشی از زمین لرزه‌های شدید، با سطح شروع تغییر شکل ایجاد شده توسط اجزای مختلف سازه‌ها مرتبط است [۲۴]. آستانه تغییر شکل برای شروع آسیب در سازه‌ها عمدتاً به نوع مصالح سازه‌ای وابسته است. نسبت تغییر مکان جانبی سازه (۲) به کمک رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\gamma = \frac{\Delta}{H} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

که در آن،  $\Delta$  تغییر مکان جانبی سقف سازه و  $H$  ارتفاع کل سازه است.

نسبت تغییر مکان جانبی را می‌توان شاخصی برای ارزیابی ظرفیت تغییر شکل سازه‌ها در نظر گرفت. مطابق پیشنهاد Mohle [۲۵] مقادیر آستانه زیر نسبت تغییر مکان جانبی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

- ساختمان‌های مصالح بنایی مسلح: ۰/۲ تا ۰/۴ درصد

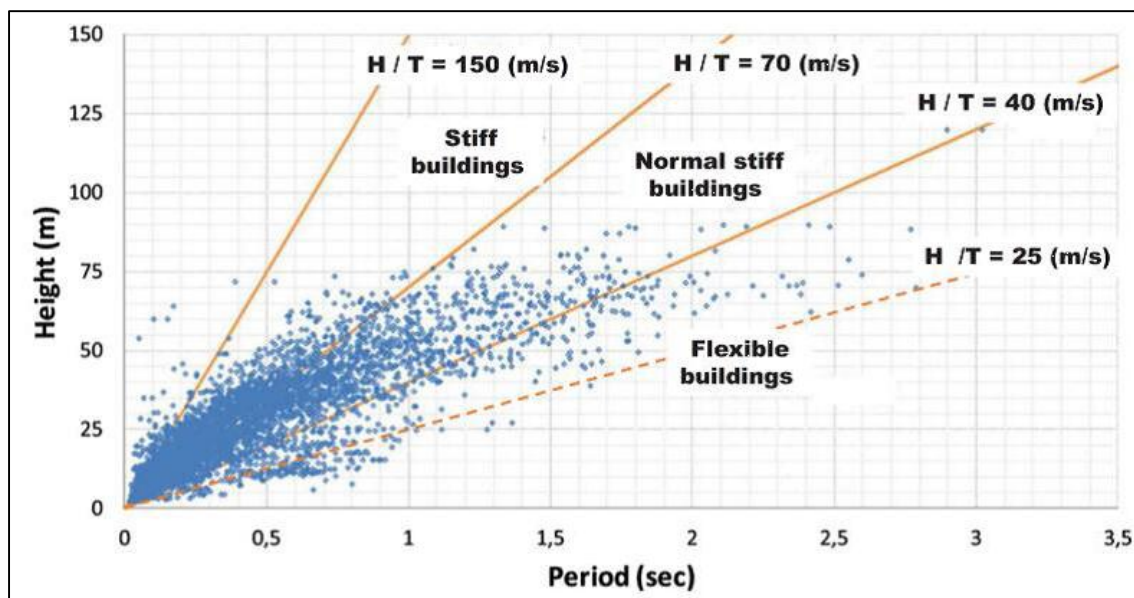
- ساختمان‌های بتن آرمه: ۰/۷ تا ۱/۰ درصد

- قاب‌های فولادی خمشی: ۱/۰ تا ۱/۵ درصد

از سوی دیگر، تعداد طبقات سازه یا ارتفاع کل سازه با دوره تناوب اصلی نوسان آن ( $T$ ) از طریق یک رابطه تجربی به صورت زیر مرتبط است [۲۳]:

$$T = \frac{N_s}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن،  $N_s$  نشان دهنده تعداد طبقات سازه و پارامتر  $\lambda$  یک فاکتور تجربی است که معمولاً برای تخمین ساده دوره تناوب اصلی سازه‌هایی دارای سیستم قاب به کار می‌رود. مطابق پیشنهاد ASCE/SEI [۲۶]، مقدار  $\lambda$  برای همه سازه‌ها تقریباً برابر ۱۰ است. با این وجود، نتایج سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که محدوده کلی مقادیر  $\lambda$  بین ۱۰ تا ۷۰ است که می‌توان مقدار آن را از داده‌های نشان داده شده در شکل ۵ استنباط کرد [۲۷].



شکل ۵- ارتباط میان دوره تناوب اصلی و ارتفاع سازه‌های بتنی [۲۷]

بر اساس شکل ۵، دوره تناوب اصلی سازه‌ها را می‌توان به صورت رابطه (۴) تعریف کرد:

$$T = \frac{H}{2.5 \lambda} \quad (4)$$

بر همین اساس، با توجه به داده‌های شکل ۵ همچنین می‌توان نتیجه گرفت:

- ساختمان‌های سخت<sup>۱</sup>:  $H/T > 70 \text{ m/s } (\lambda > 28)$
- ساختمان‌هایی با سختی معمولی<sup>۲</sup>:  $70 > H/T > 40 \text{ m/s } (28 > \lambda > 16)$
- ساختمان‌های انعطاف پذیر<sup>۳</sup>:  $H/T < 40 \text{ m/s } (\lambda < 16)$

برای شناسایی رفتار لرزه‌ای محیط خاک نیز می‌توان از پارامتر دوره تناوب استفاده کرد که معمولاً به صورت دوره تناوب بحرانی ( $T_c$ ) در نظر گرفته می‌شود. باید توجه شود که دوره تناوب بحرانی یک خاک لایه ای ارتباطی به دوره تناوب اصلی سازه ندارد و از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد:

$$T_c = 4 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}} \quad (5)$$

که در آن،  $i$  نشان دهنده لایه  $i$  ام خاک است و  $h_i$  و  $V_{Si}$  به ترتیب، بیانگر ضخامت لایه و سرعت موج برشی در لایه  $i$  ام هستند. مقدار  $n$  شامل تمام لایه‌های خاک تا رسیدن به یک بستر صلب است که با توجه به معیارهای سرعت موج برشی و تعداد ضربات در آزمون نفوذ استاندارد به ترتیب به صورت  $V_s \geq 400 \text{ m/s}$  و  $N_{SPT} \geq 50$  مشخص می‌شود [۲۳].

باید دانست سیستم‌های طبقه بندی ساختگاه معمولاً دارای دو محدودیت جدی هستند. اولاً، ویژگی‌های هیچ یک از لایه‌های خاک موجود در عمقی پایین تر از ۳۰ متر را در نظر نمی‌گیرند. ثانیاً، پارامتر  $V_{S30}$  ممکن است نتایج گمراه کننده ای را برای نهشته‌های خاک لایه ای ایجاد کند، زیرا اثر توالی لایه‌های خاک بر طبقه بندی توسط پارامتر  $V_{S30}$  در نظر گرفته نمی‌شود [۷]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، می‌توان از مفاهیم تغییر مکان طیفی و شتاب طیفی استفاده نمود.

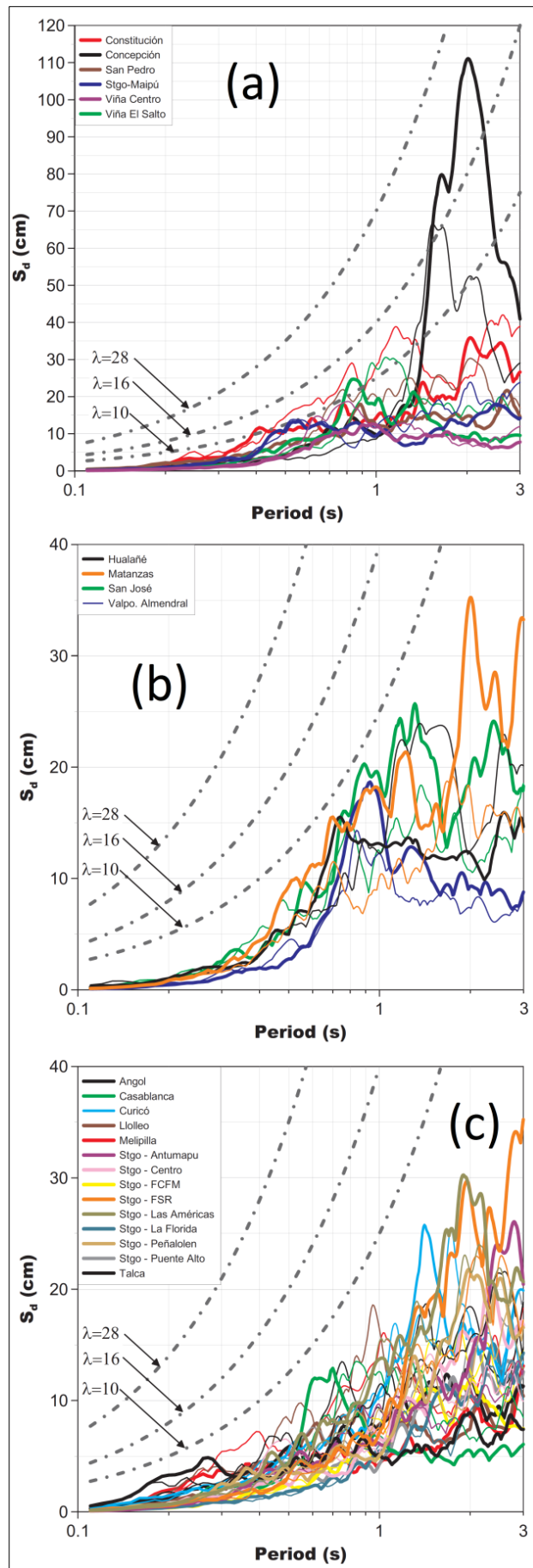
شکل ۶ تغییر مکان‌های طیفی به دست آمده از رکوردهای شتاب را نشان می‌دهد که بر اساس میزان آسیب مورد انتظار به دلیل تجاوز از مقدار تغییر شکل آستانه، گروه بندی شده‌اند. شکل ۶ (a) ایستگاه‌های لرزه‌ای مورد بررسی در شهرهای Concepcion، Constitución، Viña del Mar و Maipú را نشان می‌دهد، که در آن‌ها تغییر مکان‌های طیفی از مقادیر آستانه تعیین شده برای سازه‌های انعطاف پذیر بیشتر بوده است ( $\lambda = 10$ ). علاوه بر آن، داده‌های ایستگاه Concepcion از محدوده سازه‌های سخت تر نیز فراتر رفته است ( $\lambda = 16$ ). شکل ۶ (b) ایستگاه‌های لرزه‌ای چندین شهر را نشان می‌دهد که در آن‌ها تغییر مکان طیفی با وجود نزدیکی به حد تغییر مکان، کمتر از آن شده است. در شکل ۶ (c) همه ایستگاه‌هایی گروه بندی شده‌اند که هیچ محدودیتی از نظر تغییر مکان‌ها در آنها وجود نداشته است. شواهدی که از زمین لرزه Maule کشور شیلی در سال ۲۰۱۰ به جا مانده نشان می‌دهد مناطقی که دچار بیشترین آسیب شده‌اند، در شهرهای مذکور واقع بوده‌اند که این امر با نتایج نشان داده شده در شکل ۶ (a) مطابقت خوبی دارد. به طور مشابه، مطابق شکل‌های ۶ (b-c)، خسارت کمتر در شهرهایی مشاهده شد که تغییر مکان طیفی در آن‌ها از حد آستانه تجاوز نکرده است. به همین ترتیب، می‌توان در شکل ۷، طیف‌های پاسخ شبه شتاب برای رکوردهای زلزله Maule را نمایش داد. بررسی داده‌های این نمودارها نیز، نتایج حاصل از مشاهدات قبلی را تأیید می‌کند. به عنوان نمونه، با وجود آن که طیف مربوط به ساختگاه Angol که بالاترین PGA (معادل ۰/۹۴g) و بیشترین تشدید در منحنی  $S_a$  را ارائه داده است، هیچ خسارت قابل توجهی در این مکان مشاهده نشده است.

<sup>1</sup> Stiff buildings

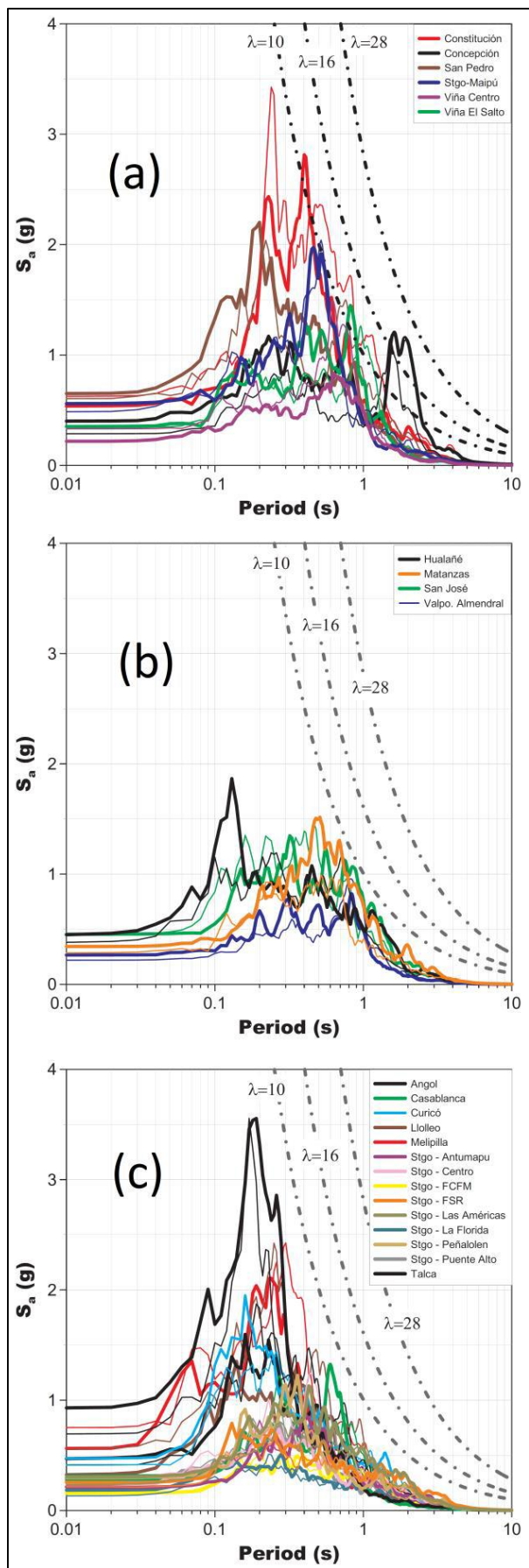
<sup>2</sup> Normally stiff buildings

<sup>3</sup> Flexible buildings





شکل ۶- طیف های پاسخ تغییر مکان زلزله Maule و تغییر شکل آستانه طیفی [۲۳]



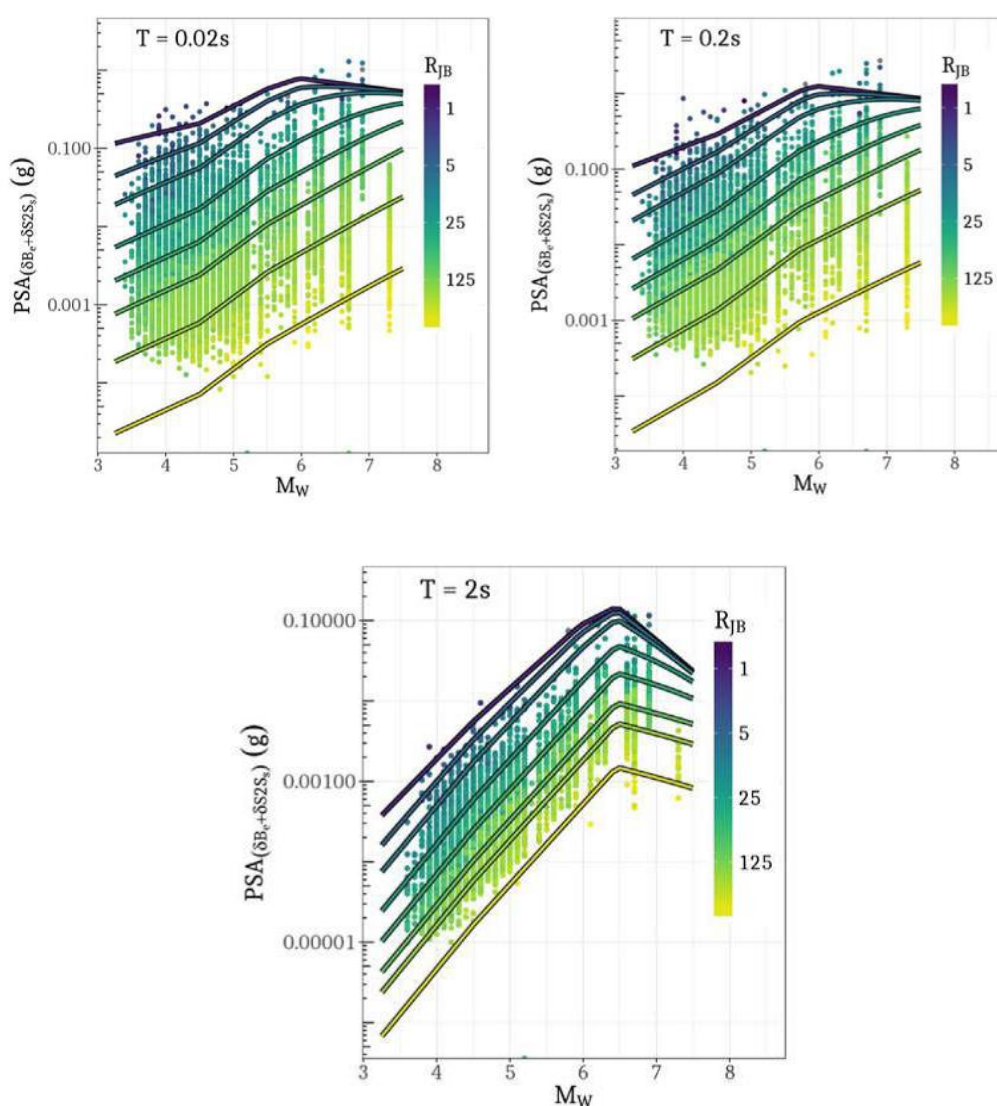
شکل ۷- طیف های پاسخ شبه شتاب زلزله Maule و شتاب آستانه طیفی [۳۳]

## ۳- جداسازی داده‌ها

با توجه به گستردگی داده های لرزه ای، با برازش بهترین منحنی های نیمه تجربی میان پارامترها می توان روی پراکندگی یا همبستگی داده ها کنترل بهتری انجام داد و آن‌ها را بر اساس عوامل مؤثر بر رفتار لرزه ای هر ساختگاه دسته بندی کرد. به این عملیات، جداسازی داده ها<sup>۱</sup> گفته می شود [۲۸]. برای هر یک از روش های دسته بندی پارامترهای لرزه ای، می توان جداسازی را به شرح ذیل انجام داد.

## ۳-۱- دسته بندی طیفی توابع تشدید

شکل ۸ منحنی های جداساز بر اساس نمودارهای مقیاس بندی بزرگای زلزله را در مقابل مقادیر مشاهده شده پیک شتاب زمین می دهد که به ازای اثرات تصادفی داده های زلزله تصحیح شده اند. با وجود دو نقطه شکست، یکی در  $M_w = 4.5$  و دیگری در  $M_w = 5.5-6.5$  بسته به دوره تناوب، مقیاس بندی بزرگا به ازای  $T = 2$  s برای همه رویدادها با شرط  $M_w < 6.5$  ثابت است.

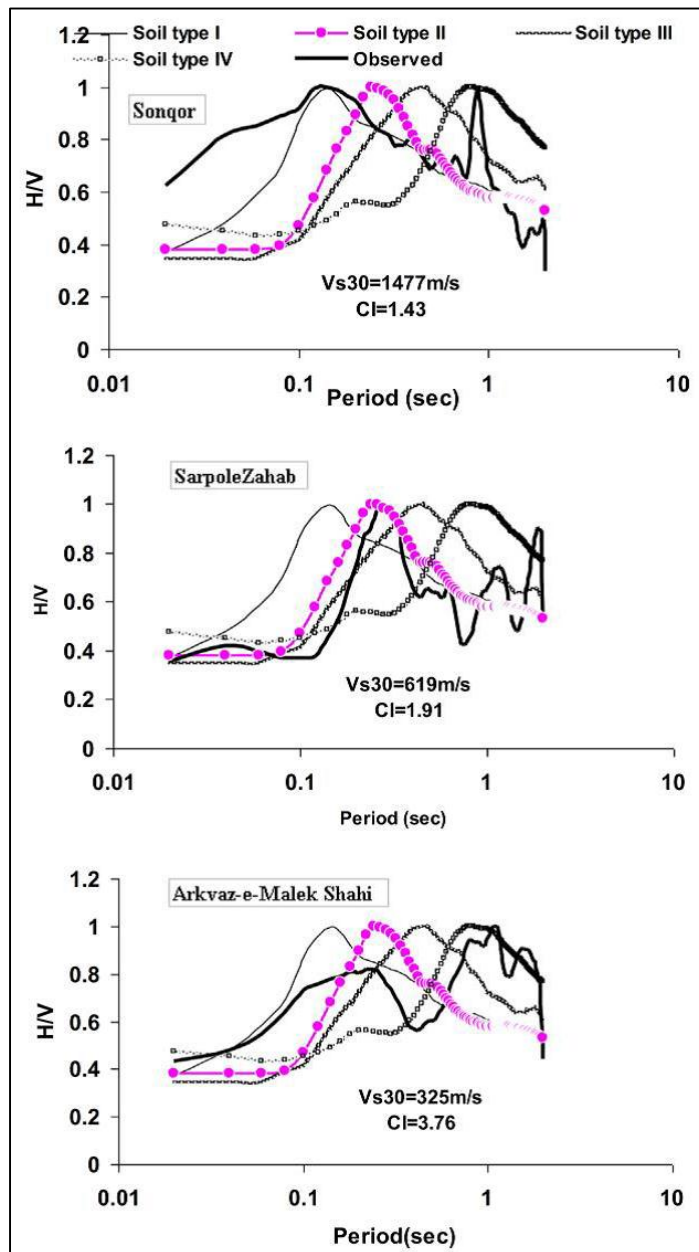


شکل ۸- مقیاس بندی بزرگای زلزله به ازای دوره تناوب ۰/۰۲، ۰/۲ و ۲ ثانیه [۱۶]

<sup>1</sup> Data separation

## ۳-۲- دسته بندی نسبت های طیفی

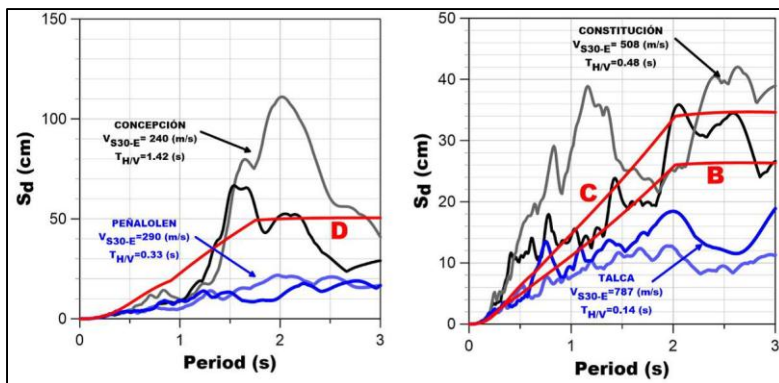
نتایج مربوط به سه ایستگاه با طیف گسترده ای از تغییرات در مقدار سرعت موج برشی لایه شامل سنقر، سرپل ذهاب و ارکواز-ملک شاهی، در شکل ۹ ارائه شده است. مقدار  $V_{S30}$  برای این ساختگاه ها به ترتیب معادل ۱۴۷۷، ۶۱۹ و ۳۲۵ متر بر ثانیه اندازه گیری شده است. شکل ۹ منحنی های نرمالیزه هموار شده HVSR را در ایستگاه های انتخاب شده همراه با چهار نوع تیپ بندی خاک نشان می دهد.



شکل ۹- منحنی های جداساز برای نسبت های طیفی افقی به قائم برای چند ایستگاه [۲۰]

## ۳-۳- دسته بندی پارامترهای طیفی آستانه

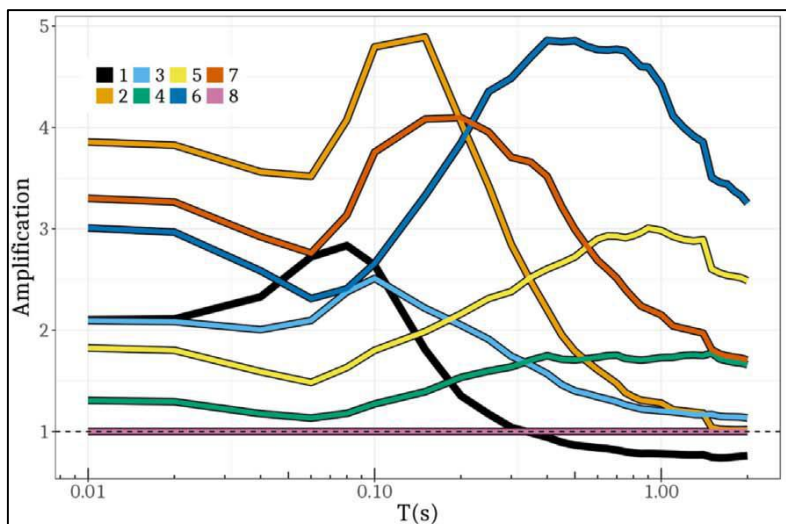
طیف تغییر مکان الاستیک برای ساختگاه های مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می شود که از نظر تغییر مکان، رویکرد پیشنهاد شده برای طبقه بندی خاک بر این اساس، بهتر از معیارهای طبقه بندی است که در آن ها دوره تناوب غالب محیط خاک در نظر گرفته نمی شود.



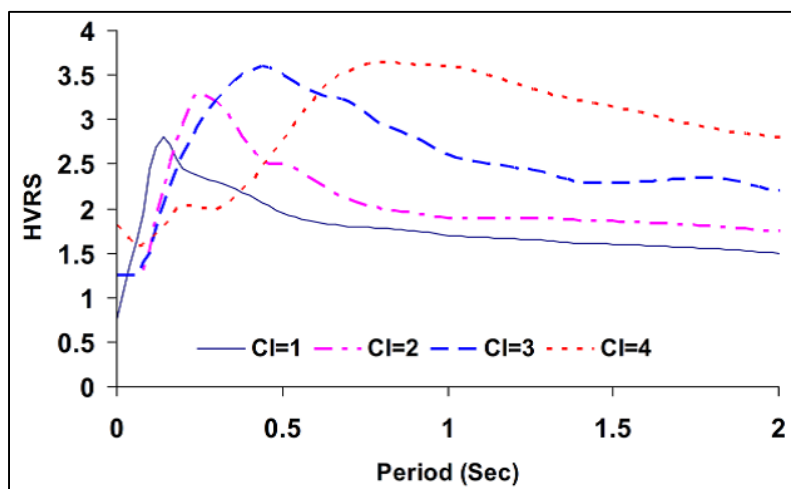
شکل ۱۰- طیف های تغییر مکان الاستیک در چهار ساختمان مختلف [۲۳]

#### ۴- خروجی روش ها و تفسیر نتایج

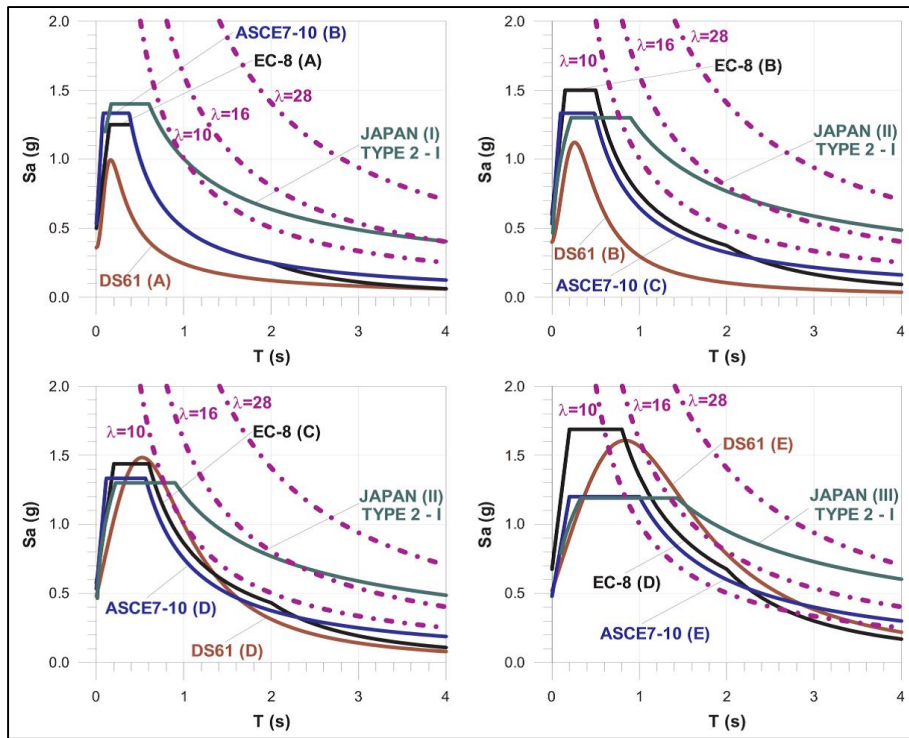
پس از جداسازی داده ها، می توان نحوه تغییرات پارامترهای مختلف بر حسب یکدیگر را برای هر یک از روش های طبقه بندی ساختمانها مورد بررسی قرار داد. شکل های ۱۱ تا ۱۳، منحنی های نهایی برازش دهنده را به ترتیب بر اساس شاخص های مورد نظر شامل تغییرات تابع تشدید بر حسب دوره تناوب، تغییرات نسبت طیفی بر حسب دوره تناوب و تغییرات تغییر مکان طیفی آستانه بر حسب دوره تناوب نشان می دهند.



شکل ۱۱- تعریف هشت طبقه لرزه ای بر اساس تغییرات تابع تشدید بر حسب دوره تناوب [۱۶]



شکل ۱۲- تعریف چهار طبقه لرزه ای بر اساس تغییرات نسبت طیفی بر حسب دوره تناوب [۲۰]



شکل ۱۳ - تعریف شش طبقه لرزه ای بر اساس تغییرات تغییر مکان طیفی آستانه بر حسب دوره تناوب [۲۳]

با واکاوی خروجی‌های بدست آمده مطابق شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ می‌توان دریافت که امکان تعریف هشت طبقه لرزه‌ای برای ساختگاه‌های مختلف بر اساس تغییرات تابع تشدید بر حسب دوره تناوب طبقه وجود دارد. به علاوه، منحنی‌های برازش دهنده برای بیان تغییرات نسبت طیفی بر حسب دوره تناوب زلزله به گونه ای است که می‌توان چهار گروه برای طبقه‌بندی لرزه‌ای ایستگاه‌های واقع در محدوده یک ساختگاه معین در نظر گرفت. همچنین، تغییرات تغییر مکان طیفی آستانه بر حسب دوره تناوب نشان می‌دهند که اتخاذ شش دسته برای گروه بندی ساختگاه‌ها از نظر میزان آسیب دیدگی سازه‌های واقع در هر ایستگاه به خوبی رفتار لرزه ای هر ساختگاه را منعکس می‌کند. جدول‌های ۲ تا ۴، جزئیات هر یک از روش‌های دسته بندی مورد استفاده در این پژوهش را ارائه می‌دهند.

جدول ۲ - طبقه بندی ساختگاه بر اساس دوره تناوب تشدید و سرعت‌های موج برشی [۱۶]

Site cluster	$T_G$ (s)	$V_{s30}$ (m/s)	$V_{s10}$ (m/s)	$H_{800}$ (m)
C5	> 1 s	300–450 m/s	200–300 m/s	> 50 m
C4		450–600 m/s	300–400 m/s	30–100 m
C6	0.4–1 s	200–300 m/s	< 200 m/s	> 50 m
C7	0.2–0.4 s	200–450 m/s	150–350m/s	30–100 m
C3	0.1–0.2 s	450–600 m/s	200–400 m/s	10–30 m
C2		300–600 m/s	150–350 m/s	
C1	< 0.1 s	450–800 m/s	200–600 m/s	5–20 m
C8	–	> 600 m/s	> 600 m/s	< 5 m

جدول ۳ - طبقه ساختگاه بر اساس منحنی‌های نسبت طیفی به ازای دوره تناوب تشدید [۲۰]

Classification Index for site class	Site characteristic
$1 \leq CI < 2$	Rock
$2 \leq CI < 3$	Stiff soil and soft rock
$3 \leq CI < 4$	Stiff soil
$4 \leq CI$	Soft soil

جدول ۴ - طبقه بندی بر اساس سرعت موج برشی، دوره تناوب تشدید و ویژگی های سازه [۲۳]

Site Class	General soil description	$V_{S30-E}$ (m/s)	$T_{H/V}$ (s)	structural request
A	Rock	$\geq 800$	/	
B	Very dense soils	$\geq 500$	$< 0.30$ (or flat)	
C	Dense, firm soils	$\geq 300$	$< 0.50$ (or flat)	
D	Medium-dense or medium-firm soils	$\geq 180$	$< 0.80$	
E	Soft soils	$< 180$	/	RC structures a) $T_{F \text{ structure}} < 1.5 \text{ s}$ $\lambda \geq 16$ b) $T_{F \text{ structure}} \geq 1.5 \text{ s}$ $\lambda \geq 28$
F	Special soils	-		

در جدول ۲، ساختگاه ها بر حسب پارامترهای دوره تناوب غالب زمین ( $T_G$ )، سرعت های موج برشی انتشار یافته در ۳۰ متر و ۱۰ متر بالایی نهشته خاک ( $V_{S30}$ ,  $V_{S10}$ ) و عمق مورد نیاز تا دستیابی به یک سنگ بستر دارای سرعت موج برشی ۳۰۰ متر بر ثانیه به هشت دسته C1 تا C8 طبقه بندی شده اند. در جدول ۳، با توجه به محدوده مقدار شاخص طبقه بندی (CI) بر اساس منحنی های HVSr، ساختگاه را می توان به صورت «سنگ»، «خاک سخت و سنگ سست»، «خاک سخت» و «خاک سست» دسته بندی نمود. در جدول ۴، با توجه به نوع سازه، مقدار سرعت موج برشی انتشار یافته در ۳۰ متر بالایی نهشته خاک بدون در نظر گرفتن توالی لایه های خاک ( $V_{S30-E}$ ) و دوره تناوب وقوع تشدید در منحنی متناظر با نسبت مؤلفه افقی به قائم شتاب، ساختگاه به شش طبقه تقسیم می شود.

#### ۵- نتیجه گیری

استفاده از مفاهیم تشدید در طبقه بندی لرزه ای ساختگاه ها در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مسیر، از سه رویکرد شامل «دسته بندی طیفی»، «دسته بندی نسبت طیفی» و «دسته بندی طیفی آستانه» بهره گرفته شد. با بررسی دقیق هر یک از روش ها می توان موارد زیر را به عنوان نتایج کلیدی تحقیق بیان نمود:

- دسته بندی طیفی سبب دستیابی به یک شیوه ساده و در عین حال قدرتمند برای طبقه بندی ساختگاه های مختلف می شود. با این وجود، نیاز به اختیار داشتن دامنه وسیعی از داده های لرزه ای و پارامترهای پاسخ های موجود به عنوان محدودیت روش مذکور در نظر گرفته می شود.
- مزیت روش دسته بندی نسبت طیفی آن است که به کمک آن می توان میان خصوصیات لرزه ای ایستگاه های واقع در حوزه نزدیک به منبع زلزله تمایز ایجاد کرد. در مقابل، با استفاده از این رویکرد می توان تنها چهار دسته لرزه ای برای ساختگاه در نظر گرفت که از این حیث، یک محدودیت نسبت به سایر روش ها برای آن محسوب می شود.
- در رویکرد دسته بندی طیفی آستانه، امکان تعیین میزان خسارت ناشی از زمین لرزه های بزرگ بر اساس ویژگی ها و شرایط محلی نهشته های خاک وجود دارد. با این وجود، برای بهره گیری از روش دسته بندی طیفی، باید حتماً تعداد زیادی از داده های تغییرمکان و شتاب طیفی برای رکوردهای زلزله های مختلف در دسترس باشد.

#### ۶- مراجع

1. Tian, B., Du, Y., You, Z., Ruohan, Z. (2019). Measuring the sediment thickness in urban areas using revised H/V spectral ratio method. Eng. Geol. 260, 105223.
2. Yilar, E., Baise, L. G., Ebel, J. E. (2017). Using H/V measurements to determine depth to bedrock and  $V_{s30}$  in Boston, Massachusetts. Eng. Geol. 217, 12-22.

3. Derras B., Bard P. Y., Cotton F. (2016). Site-condition proxies, ground motion variability, and data-driven GMPEs: Insights from the NGA-West2 and RESOURCE data sets. *Earthq. Spectra*;32:2027–56.
4. Stafford P. J., Rodriguez-Marek A., Edwards B., Kruiver P. P., Bommer J. J. (2017). Scenario dependence of linear site-effect factors for short-period response spectral ordinates. *Bull Seismol Soc Am*;107:2859–72.
5. Cauzzi C. and Faccioli E. (2017). Anatomy of sigma of a global predictive model for ground motions and response spectra. *Bull Earthq Eng.*,1–19.
6. Héloïse C, Bard P-Y, Duval A-M, Bertrand E. (2012). Site effect assessment using KiK-net data: Part 2—site amplification prediction equation based on  $f_0$  and  $V_{sz}$ . *Bull Earthq Eng.*;10:451–89.
7. Yousefi Yeganeh, B., Loon, Feiznia S., van Loon, A. (2012). Sedimentary environment and palaeogeography of the Palaeocene–Middle Eocene Kashkan Formation, Zagros fold-thrust belt, SW Iran. *Geologos* 18 (1), 13–36.
8. Stewart, J.P., Afshari, K., Goulet, K. (2017). Non-ergodic site response in seismic hazard analysis earthquake spectra. 33 (4), 1385–1414.
9. Tavani, S., Parente, M., Puzone, F., Corradetti, A., Gharabeigli, G.H., Valinejad, M., Morsalnejad, D., Mazzoli, S. (2018). The seismogenic fault system of the 2017 Mw 7.3 Iran–Iraq earthquake: constraints from surface and subsurface data, cross-section balancing, and restoration. *Solid Earth* 9, 821–831.
10. Abrahamson N., Silva W., Kamai R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthq Spectra*;30(3):1025–55.
11. Ullah, I. and Prado, R. L. (2017). Soft sediment thickness and shear-wave velocity estimation from the H/V technique up to bedrock at meteorite impact crater site, Sao Paulo city, Brazil. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 94, 215–222.
12. Wiszniowski, J., Plesiewicz, B.M., Trojanowski, J. (2014). Application of real time recurrent neural network for detection of small natural earthquakes in Poland. *Acta Geophys.* 62 (3), 469–485.
13. Parihar, A. and Anbazhagan, P. (2020). Site Response Study and Amplification Factor for Shallow Bedrock Sites. *Indian Geotech J.*, <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00410-w>.
14. Bahrampouri, M., Rodriguez-Marek, A., Bommer, J. J. (2018). Mapping the uncertainty in modulus reduction and damping curves onto the uncertainty of site amplification functions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.022>
15. Witten, I.H., Frank, E., Hall, M.A., Pal, C.J. (2016). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann, Burlington, Massachusetts.
16. Kotha, S. R., Cotton, F., Bindi, D. (2018). A new approach to site classification: Mixed-effects Ground Motion Prediction Equation with spectral clustering of site amplification functions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.051>.
17. Yenier E. and Atkinson G. M. (2015). An equivalent point-source model for stochastic simulation of earthquake ground motions in California. *Bull Seismol Soc Am*,105:1435–55.
18. Paolucci, E., Lunedei, E., Albarello, D. (2017). Application of principle component analysis (PCA) to HVSR data aimed at the seismic characteristic of earthquake prone areas. *Geophys. J. Int.* 211 (1), 650–662.
19. Chávez-García, F.J., Kang, T. S. (2014). Lateral heterogeneities and microtremors: Limitations of HVSR and SPAC based studies for site response. *Eng. Geol.* 174, 1–10.
20. Yaghmaei-Sabegh, S. and Rupakhety, R. (2020). A new method of seismic site classification using HVSR curves: A case study of the 12 November 2017 Mw 7.3 Ezgeleh earthquake in Iran. *Engineering Geology*. 270(105574), 1-12.
21. Alessandro, C., Bonilla, L.F., Boore, D.M., Rovelli, A., Scotti, O. (2012). Predominant period site classification for response spectra prediction equations in Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102 (2), 680–695.
22. Luzi, L., Puglia, R., Pacor, F., Gallipoli, M.R., Bindi, D., Mucciarelli, M. (2011). Proposal for a soil classification based on parameters alternative or complementary to  $V_s$ . *Bull. Earthq. Eng.* 9, 1877–1898.
23. Verdugo, R., Ochoa-Cornejo, F., Gonzalez, J., Valladares, G. (2018). Site effect and site classification in areas with large earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.02.002>.



24. Verdugo R. and Peters G. (2017). Seismic soil classification and elastic response spectra. In: Proceedings of the 16th world conference on earthquake engineering, 16WCEE Santiago Chile.
25. Moehle J. (1996). Displacement based design of RC structures. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering.
26. ASCE/SEI. (2013). Minimum design loads for buildings and other structures [Third Printing, Revised commentary]. American Society of Civil Engineers.
27. Lagos R, Kupfer M, Lindenberg J, Bonelli P, Saragoni R, Guendelman T, Massone L, Boroschek R, Yañez F. (2012). Seismic performance of high-rise concrete buildings In Chile. *Int J High-Rise Build*; 1(3):181–94.
28. Ma, N., Wang, G., Kamai, T., Doi, I., Chigira, M. (2019). Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan. *Eng. Geol.* 249 (31), 218–234.