

Prediction of shear wave velocity and soil type of the region with seismic records in the Iranian plateau using Horizontal-to vertical spectrum ratio of earthquake

Iman Khazaei¹, Mohammad Shamekhi Amiri², Amir Bazrafshan Moghadam²

1- Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT

Earthquake is a destructive and unpredictable phenomenon that causes a lot of human and financial losses. An overall assessment of the damage to structures and facilities due to earthquakes shows that site conditions have had a significant impact on the distributions of damage. Therefore, identifying the effect of site and soil type in the design and construction of earthquake resistant structures is essential. Due to the fact that soil type has not been determined in many regions of the Iranian plateau, in this study, A relation is presented to determine the shear wave velocity using Horizontal-to-vertical spectrum ratio method (H/V) and the Gene expression programming (GEP). In this study, a suite of 480 records is used. Input factors in this research are moment magnitude, site to source distance, Horizontal-to-vertical spectrum ratio and the time of the maximum amount of H/V ratio. After preparing the input values from the earthquake catalog, finally, GEP method is used to obtain the prediction relationship. The advantage of this algorithm is that a fixed regression model is not used and the model is calculated intelligently. Finally, the results show that the model has a fitness of 911.57 and the shear wave velocity values provided by the relation correspond to 73% with the actual values.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 May 2021

Revise Date: 11 October 2021

Accept Date: 09 December 2021

Keywords:

Horizontal-to-vertical
spectrum ratio

Shear wave velocity

GEP

Soil type

Iranian plateau

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.281059.2456>

*Corresponding author: Mohammad Shamekhi Amiri

Email address: shamekhi@shahroodut.ac.ir

پیش بینی سرعت موج برشی و نوع خاک منطقه دارای شتابنگاشت ثبت شده در فلات ایران با استفاده از نسبت‌های طیفی مؤلفه‌ی قائم و افقی زمین لرزه

ایمان خزاعی^۱، محمد شامخی امیری^{۲*}، امیر بذرافشان مقدم^۲

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

زلزله از پدیده‌های مخرب و غیرقابل پیش بینی است که خسارات جانی و مالی بسیاری در پی دارد. ارزیابی کلی از خسارات وارده به سازه‌ها و تاسیسات در زلزله‌ها نشان می‌دهد که شرایط ساختگاهی تاثیر قابل توجهی بر نحوه توزیع خرابی‌ها داشته است. لذا شناسایی اثر ساختگاه و نوع خاک در طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم، امری ضروری به شمار می‌آید. با توجه به اینکه نوع خاک در بسیاری از مناطق فلات ایران تعیین نشده است، در این پژوهش، پیش‌بینی رابطه‌ای برای تعیین سرعت موج برشی و تعیین نوع خاک منطقه با استفاده از روش نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) و الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) مدنظر قرار گرفته است. عوامل مؤثر در این پیش‌بینی، بزرگای زلزله، فاصله‌ی منبع زلزله تا ساختگاه، نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) و پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر در نظر گرفته شده‌اند. در این تحقیق، داده‌های ۴۸۰ شتابنگاشت مورد استفاده قرار گرفت. اصلاحات مورد نیاز روی این داده‌ها صورت گرفته و سپس پارامترهای مورد نظر برای تعیین رابطه‌ی سرعت موج برشی از آن استخراج شده است. پس از آماده سازی مقادیر ورودی الگوریتم از کاتالوگ زلزله، در نهایت برای به دست آوردن رابطه‌ی پیش‌بینی از روش هوشمند الگوریتم توسعه‌ی ژنی استفاده شده است. مزیت این الگوریتم در این است که از مدل رگرسیونی ثابتی استفاده نشده است و مدل به صورت هوشمند محاسبه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که مدل دارای برازندگی ۹۱۱/۵۷ بوده و مقادیر پیش‌بینی شده مطابقت ۷۳ درصدی با وضعیت موجود خاک مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ دارند. از تعداد ۴۸۰ رکورد مورد استفاده، روش ارائه شده توانست نوع خاک ۳۵۰ ایستگاه را به درستی پیش بینی نماید. همچنین مقایسه با سایر روشهای طبقه بندی نشان داد که کمترین تطابق هم دارای دقت بیش از ۵۵ درصدی است. بنابراین در مواردی که هیچگونه اطلاعاتی در مورد ساختگاه وجود نداشته و فقط شتابنگاشت ثبت شده در دسترس است، می‌توان از این روش استفاده کرد.

کلمات کلیدی: نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم، سرعت موج برشی، الگوریتم توسعه‌ی ژنی، نوع خاک منطقه، فلات ایران

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.281059.2456	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.281059.2456	۱۴۰۱/۰۶/۳۱	۱۴۰۰/۰۹/۱۸	۱۴۰۰/۰۹/۱۸	۱۴۰۰/۰۷/۱۹	۱۴۰۰/۰۲/۲۸
			محمد شامخی امیری shamekhi@shahroodut.ac.ir		*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

بسیاری از زلزله‌های مخرب دهه‌های اخیر (مانند زلزله مکزیکوسیتی ۱۹۸۵، یونان ۱۹۸۹، کوبه ژاپن ۱۹۹۵، منجیل ۱۹۹۰، تایوان ۱۹۹۹، بم ۲۰۰۳ و ...) پتانسیل تأثیرگذاری زمین‌شناسی سطحی و شرایط ژئوتکنیکی خاک را روی حرکات قوی زمین نشان می‌دهد که اثرات ساختگاه نام دارد و به صورت تشدید امواج زلزله و تغییر در خصوصیات عمومی امواج لرزه‌ای مانند دامنه، فرکانس و طول دوام جنبش نیرومند ظاهر می‌شود. باند فرکانسی تحت تأثیر پدیده‌ی تشدید وابسته به ضخامت و سرعت امواج لایه‌های خاک است و در صورت برابری یا نزدیکی فرکانس غالب ساختگاه با فرکانس ارتعاشی سازه خسارت بسیار بزرگی به وجود خواهد آمد. بنابراین ارزیابی اثرات ساختگاهی به واسطه‌ی شرایط زمین‌شناسی محلی یا برای بررسی‌های ریزپهنه‌بندی و پاسخ ساختگاه ضروری است [۱]. امواج زمین‌لرزه به طور چشم‌گیری می‌تواند به وسیله‌ی بخش ضخیم انسجام نیافته در رسوبات سطحی در فرکانس‌های خاص تقویت شود که نقش مهمی را در افزایش تخریب لرزه‌ای دارد [۲].

روش‌های مختلفی برای برآورد اثر ساختگاه و تعیین نوع زمین وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش نسبت طیفی استاندارد نسبت به ایستگاه مرجع و نسبت طیفی افقی به عمودی اشاره نمود [۳ و ۴]. از آنجایی که در زمین‌لرزه‌ها همواره مؤلفه‌های افقی و قائم در سطح موجود می‌باشد، استفاده از روش H/V به عنوان یکی از روش‌های مستقل از ساختگاه مرجع در تعیین اثر ساختگاهی کاربرد فراوان دارد.

از دیگر مطالعاتی که در زمینه شناخت ساختگاه صورت می‌گیرد، تعیین و اندازه‌گیری اثر بزرگنمایی بر دامنه‌ی جنبش زمین و اعمال آن در مطالعات ریزپهنه‌بندی و توسعه‌ی روابط کاهندگی در مناطق لرزه‌خیز است که از رایج‌ترین روش‌های انجام این مطالعات، روش لرزه‌نگاری شکست مرزی کم عمق و تعیین سرعت موج برشی میانگین برای ضخامت تقریبی ۳۰ متر فوقانی رسوبات است که اصطلاحاً با نماد V_{s30} نمایش داده می‌شود. روش شناخته شده و پرکاربرد دیگر، روش تعیین نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی و عمودی رکوردهای ثبت شده از جنبش زمین است که با نماد H/V نمایش داده می‌شود. این روش ابتدا توسط ناکامورا (۱۹۸۹) برای خردلرزه‌های ثبت شده به کار گرفته شد [۴] و برای اولین بار توسط لرمو و چاوز گارسیا در سال ۱۹۹۳ با استفاده از رکورد زمین‌لرزه‌ها انجام شد [۱]. زارع و همکاران (۱۹۹۹)، ۲۶ منطقه‌ی ایران با حرکات لرزه‌ای شدید را برای مطالعه‌ی تأثیر محل با هدف شناسایی و طبقه‌بندی محل انتخاب کردند [۵]. بدین منظور برای هر محل پروفیل‌های سطحی V_s و V_p به روش تجزیه اندازه‌گیری شد و گزارش‌های ریزلرزه به دست آمد و با استفاده از روش H/V و شتاب نگاشت‌های سه مؤلفه‌ای با روش تابع گیرنده آنالیز شد. جمع‌آوری این نتایج یک طبقه‌بندی چهار دسته‌ای را براساس نسبت طیفی H/V حرکات شدید زمین پیشنهاد کرده که رابطه‌ی آن با سرعت موج S را نشان می‌دهد. مطالعات قبلی درباره‌ی اثرات ساختگاه بر روی حرکات شدید زمین در ایران، به برخی مطالعات اخیر تأثیر خاک بر گزارش‌های حرکت شدید در طول زلزله‌های بزرگ محدود می‌شود [۶-۹]. از طرف دیگر، برخی مطالعات موردی ریزپهنه‌بندی در برخی شهرهای بزرگ ایران انجام شد [۱۱ و ۱۰].

برای طبقه‌بندی ایستگاه‌های شتاب‌نگاری می‌توان از سه روش تجربی با استفاده از قشرهای خاکی که قبلاً تعیین شده است، استفاده کرد. روش اول تنها براساس تعیین پریود اوج در هر ایستگاه است. روش دوم بر مبنای شاخص طبقه‌بندی محل (SI) که توسط ژائو و همکاران (۲۰۰۶) پیشنهاد شده است [۱۲]. قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) یک شاخص محل جدید برای طبقه‌بندی کمی محل با استفاده از روش تجربی نسبت طیفی H/V (در اینجا پس از HVSR) ارائه کردند [۱۳].

انباژاگان و همکاران (۲۰۱۹) ایستگاه‌های لرزه‌ای نصب شده در کنار کمربند هیمالیا و مناطق مجاور آن را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای شدید ثبت شده و روش‌های تجربی مختلف طبقه‌بندی کردند. بدین منظور برای تمام داده‌های ثبت شده، نسبت‌های طیفی افقی به عمودی با استفاده از مقادیر شتاب طیفی شبه پاسخ (PSA) محاسبه شد [۱۴].

¹ Horizontal to vertical spectral ratio

ناکامورا (۱۹۸۹) داده‌های میکروترموور ثبت شده در محل را برای به دست آوردن دامنه‌ی طیفی یک لایه‌ی سطحی با ارزیابی نسبت طیفی افقی به عمودی (HVSR) به کار برد [۴]. نسبت طیفی افقی به عمودی توسط محققین مختلفی با مقایسه‌ی شبیه‌سازی‌ها و ثبت زلزله اعتبار سنجی شده است [۱۵-۱۸].

پژوهشگران مختلفی از جمله ناکامورا (۱۹۸۹)، بارد (۱۹۹۴) و نوگوشی و ایگاشی (۱۹۹۴) پیشنهاد کردند که حداکثر HVSR می‌تواند مشخصه‌ی فرکانس تشدید اصلی یک پوشش رسوبی باشد و به همین دلیل می‌تواند برای ارزیابی اطلاعات در مورد لایه‌بندی لرزه-ای زیرزمینی استفاده شود [۱۹-۲۳]. مؤلفه‌ی افقی حرکت زمین به علت وجود لایه‌های نرم خاک روی نیم فضا، افزایش می‌یابد اما تنها در فرکانس‌های بالا مؤلفه‌ی عمودی به همان مقدار تحت تأثیر محل قرار می‌گیرد. اثر بزرگی مؤلفه‌ی عمودی با تأثیر شکست مسیر پرتو به سمت عمود در تعادل می‌باشد. فرکانس حداکثر HVSR مستقل از منبع و زمان است و حداکثر دامنه، اندکی حساس است [۲۴-۲۶]. از این رو HVSR، اندازه‌گیری تقریبی برای تخمین ضریب تشدید ساختگاه است. یغمایی سابق و تیسانگ (۲۰۱۴، ۲۰۱۱) از شبکه‌ی عصبی مصنوعی بر منحنی HVSR برای طبقه‌بندی ساختگاه استفاده کردند [۲۷ و ۲۸]. اما ژائو و همکاران (۲۰۰۶)، دی آلساندرو و همکاران (۲۰۱۴) از گروه‌بندی منحنی‌های HVSR براساس توزیع تجمعی شکل‌های طیفی استفاده کردند و یک شاخص طبقه‌بندی ساختگاه تعریف کردند [۱۲ و ۲۹].

مطابق با پژوهش‌های ناکامورا (۲۰۰۰) و هراک (۲۰۰۸) منحنی HVSR توسط موج حجمی کنترل می‌شود [۲۳ و ۳۰] اما مطابق با تحقیقات آرای و توکیماستو (۲۰۰۴) و لوندی و آبارلو (۲۰۱۰)، موج‌های سطحی نقش اصلی را بازی می‌کنند [۲۱ و ۳۱]. بارد و تئودولیدیس (۱۹۹۵) نتیجه گرفتند که هر دو مدل به درستی حداکثر HVSR را به عنوان نماینده‌ی فرکانس اصلی تشدید لایه رسوبی تفسیر می‌کنند [۱۹]. فرکانس تشدید اصلی را می‌توان با اندازه‌گیری نویز محیط [۲۳-۳۴] یا از طریق HVSR حاصل از داده‌های زلزله به دست آورد [۳۵].

۲- جمع‌آوری کاتالوگ زلزله

اولین گام برای ارائه رابطه پیش‌بینی سرعت موج برشی و تعیین نوع خاک منطقه، جمع‌آوری کاتالوگ رکوردهای ثبت شده است که از نظر تعداد و دقت دارای کفایت لازم باشند. در این پژوهش تلاش شده است که از بیشترین داده‌های شتاب‌نگاری موجود که از نظر مهندسی قابل استفاده و اتکا باشد، استفاده شود. کاتالوگ زلزله از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که متولی شبکه‌ی شتاب‌نگاری ایران است، به دست آمده است. برای اطمینان از رکوردهای جمع‌آوری شده، اصلاحاتی بر روی این رکوردها انجام شده است. در انتخاب رکوردها، در دسترس بودن اطلاعات زلزله، از قبیل دقت و درستی بزرگا و امکان تعیین نوع زمین در نظر گرفته شده است.

۲-۱- بزرگا (M)

اولین پارامتری که به عنوان متغیر در نظر گرفته شد، بزرگا است. بزرگا در چند نوع مختلف تعریف و ثبت می‌شود که به دلیل تنوع امواج زلزله و مؤسسات و سازمان‌هایی که وظیفه‌ی ثبت زلزله را برعهده دارند، می‌باشد. در این پژوهش از بزرگای گشتاوری (M_w) استفاده شده است. داده‌هایی هم که براساس بزرگای موج سطحی (M_s)، بزرگای موج حجمی (M_b) و یا مقیاس محلی (M_L) بود، با کمک از رابطه‌های پیشنهادی نشریه‌ی ۶۲۶ به بزرگای گشتاوری تبدیل شدند [۳۶]. هم‌چنین بزرگای ناتلی (M_N) به وسیله‌ی رابطه‌ی امامی و همکاران به M_L و سپس به بزرگای گشتاوری تبدیل شد [۳۷].

تبدیل M_s به M_w :

$$M_w = 0.66M_s + 2.11 \quad 2.8 \leq M_s \leq 6.2 \quad (1)$$

$$M_w = 0.93M_s + 0.45 \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \quad (2)$$

تبدیل M_b به M_w :

$$M_w = 0.85M_b + 1.03 \quad 3.5 \leq M_b \leq 6.2 \quad (3)$$

تبدیل M_L به M_w :

$$M_L = 3.73 \ln(M_w) - 0.51 \quad 4.5 \leq M_L \leq 7.5 \quad (4)$$

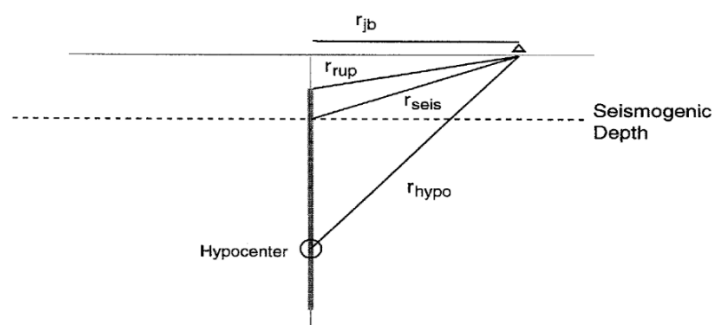
تبدیل M_N به M_L :

$$M_N = 0.9177M_L + 0.6159 \quad 1 \leq M_L \leq 6.2 \quad (5)$$

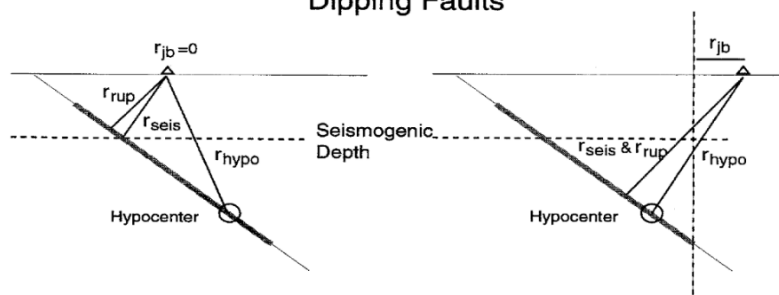
۲-۲- فاصله (R)

فاصله، دومین پارامتر مهم و تاثیرگذار در جمع‌آوری کاتالوگ زلزله است که مشخص کننده‌ی طول مسیر پیموده شده‌ی امواج از منبع لرزه‌زا تا سایت مورد نظر است. از سوی پژوهشگران، تعاریف مختلفی برای فاصله‌ی میان چشمه‌ی لرزه‌زا نسبت به ساختگاه ارائه شده است که می‌توان به نزدیک‌ترین فاصله‌ی افقی به تصویر قائم گسیختگی (r_{jb})، نزدیک‌ترین فاصله به سطح گسیختگی (r_{rup})، نزدیک‌ترین فاصله به سطح گسیختگی لرزه‌زا (r_{seis}) و فاصله از کانون زمین‌لرزه (r_{hypo}) اشاره کرد. در این پژوهش، فاصله‌ی کانونی (R) یا وتر مثلث قائم الزاویه‌ای که یکی از اضلاع عمق کانونی و ضلع دیگر فاصله‌ی رو مرکزی تشکیل داده است، به عنوان فاصله در نظر گرفته شد.

Vertical Faults



Dipping Faults



شکل ۱: مقایسه‌ی انواع فواصل تعریف شده‌ی چشمه‌ی لرزه‌زا نسبت به ساختگاه [۳۸]

۲-۳- نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V)

برای ارزیابی شرایط ساختگاهی استفاده از دو روش تجربی و عددی مرسوم است. در روش تجربی، اثرات ساختگاه با استفاده از داده‌های زلزله، انفجار و میکروترومور بررسی می‌شوند که بهترین روش استفاده از داده‌های جنبش شدید به وسیله‌ی زلزله‌های محلی است. روش‌های تعیین اثر ساختگاهی بر اساس روش‌های تجربی در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: روش وابسته به ساختگاه مرجع و روش مستقل از ساختگاه مرجع.

روش نسبت طیفی H/V ، مستقل از ساختگاه مرجع می‌باشد. این روش که شبه طیف انتقال و همچنین تابع دریافت نامیده می‌شود، ابزار قابل قبولی برای تخمین اثر زمین‌شناسی سطحی یا اثر لایه‌ی خاک رسوبات بدون نیاز به سایر اطلاعات زمین‌شناسی است. این شیوه به دلیل سادگی و سرعت حصول اطلاعات در خصوص ویژگی‌های دینامیک زمین و سازه مورد توجه قرار گرفته است. به منظور برآورد تابع پاسخ لرزه ای طیفی^۲ با استفاده از یک تک‌نگاشت سه مؤلفه‌ای بدون در اختیار داشتن ایستگاه سنگی مرجع، نسبت‌های طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم یک شتاب‌نگاشت برآورد می‌شود.

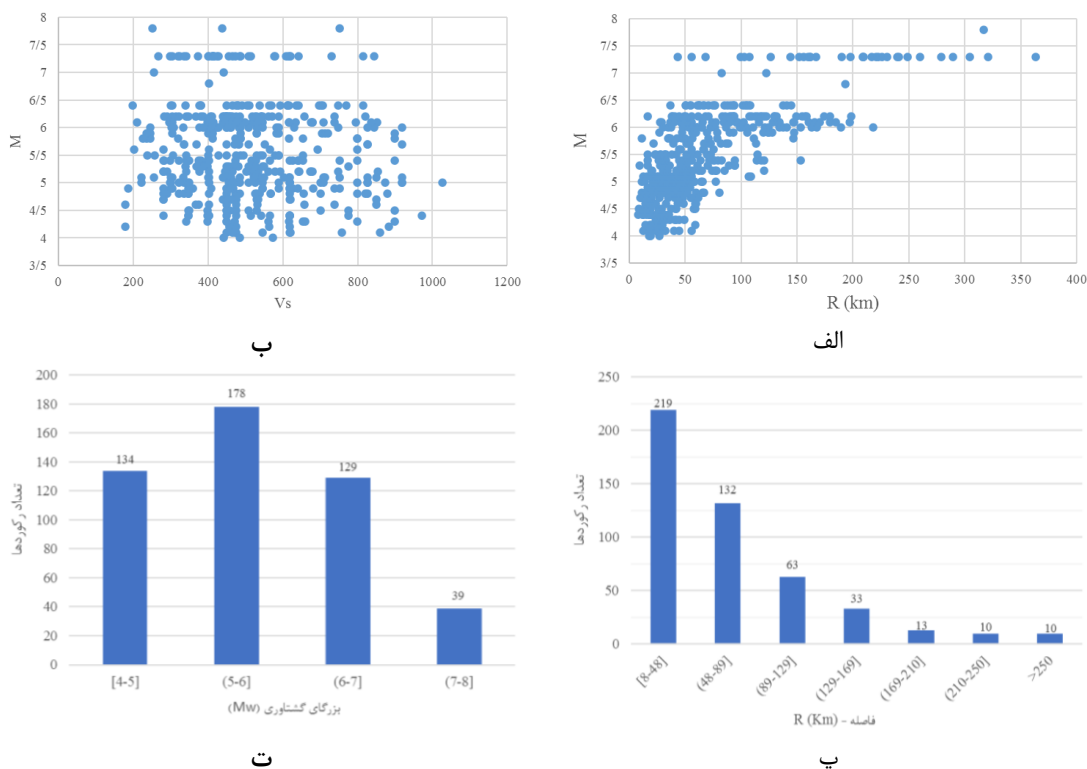
این روش برای اولین بار توسط نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۷۱) معرفی گردید و سپس توسط ناکامورا در سال ۱۹۸۶ به منظور بررسی اثر ساختگاهی با استفاده از امواج میکروترومرور به جامعه مهندسی معرفی گردید. در تحلیل ناکامورا (۱۹۸۹) امواج نوفه‌های محیطی از هر دو نوع حجمی و سطحی تشکیل شده بودند و فرض شده بود که چشمه‌های سطحی تولید امواج سطحی می‌نمایند که هر دو مؤلفه افقی و قائم به صورت یکسان تحت تاثیر قرار می‌دهد [۴].

در این روش فرض می‌شود که مؤلفه‌ی قائم (V) تحت تاثیر آبرفت نمی‌باشد و فقط تابع فرکانسی محیط سنگی است، حال آن‌که مؤلفه‌ی افقی (L,T) تحت تاثیر اثر ساختگاه واقع شده و پس از عبور از لایه‌های خاک دچار تشدید یا کاهش دامنه می‌گردند. در نتیجه با توجه به یکسان بودن چشمه‌ی زمین‌لرزه و اثر مسیر انتشار موج نسبت H/V ، طیف فوریه‌ی مؤلفه‌ی افقی به مؤلفه‌ی قائم در یک ایستگاه بوده و می‌تواند بیانگر تاثیر لایه‌های رسوبی باشد. بدین ترتیب برای هر نقطه و به تنهایی و با ثبت سه مؤلفه‌ی حرکت زمین می‌توان تابع انتقال خاک را به دست آورد. پس از ناکامورا، لرمو و چاوزگارسیا (۱۹۹۳) این روش را برای حرکات قوی و ضعیف زمین به کار بردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج این روش با روش ایستگاه مرجع هم‌خوانی بسیار خوبی نشان می‌دهد [۱].

۴-۲- کاتالوگ نهایی

پس از جمع‌آوری رکوردهای ثبت شده، ابتدا داده‌ها منظم و شرایط ساختگاهی ایستگاه زلزله تعیین و تصحیح می‌شود، در مرحله‌ی بعد به دلیل وجود انواع بزرگا، بزرگاها یکسان می‌شود و فاصله‌ی کانونی رکوردهای زلزله به دست می‌آید. در نهایت و پس از پردازش رکوردها، کاتالوگ انتخابی شامل اطلاعات ۴۸۰ رکورد زلزله برای کل ایران جمع‌آوری شده و مورد پردازش نهایی قرار گرفته است. در شکل ۲ کاتالوگ نهایی این پژوهش نشان داده شده است. شکل ۲-الف زلزله‌ها برحسب بزرگا و فاصله را نشان می‌دهد و همانگونه که در شکل مشخص شده اکثریت داده‌ها در فاصله کمتر از ۱۵۰ کیلومتر می‌باشند، بجز تعداد کمی از زلزله‌های با بزرگای بیشتر از ۶ در مقیاس بزرگای گشتاوری. در شکل ۲-ب پراکندگی بزرگا نسبت به سرعت موج برشی خاک مشاهده می‌گردد. شکل ۲-پ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله، تعداد داده‌های کمتری مورد استفاده قرار گرفته اند. شکل ۲-ت هم اکثریت داده‌ها را در فاصله ۵ تا ۶ بزرگای گشتاوری نشان می‌دهد و همچنین تعداد محدود داده‌های با بزرگای بیشتر از ۷ را بیان می‌دارد.

² Spectral Seismic Response Function

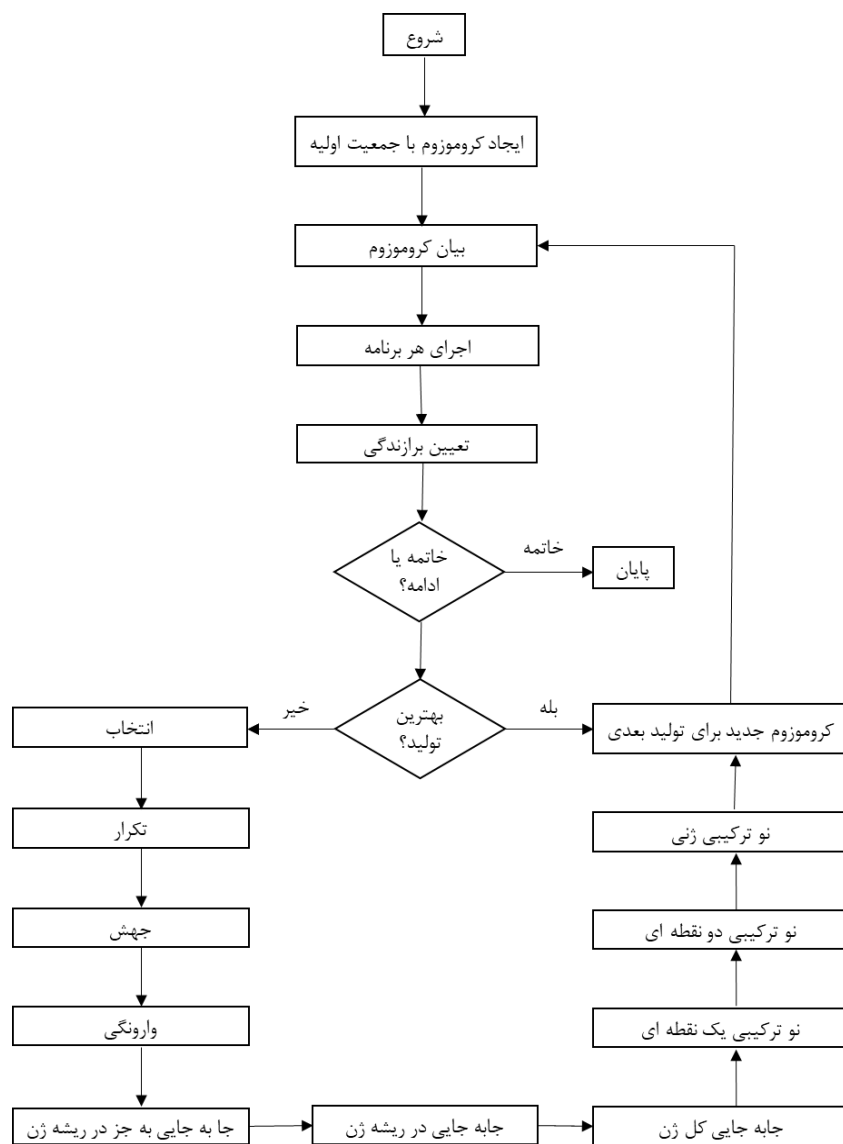


شکل ۲: کاتالوگ نهایی پژوهش. الف) پراکنندگی بزرگا بر حسب فاصله، ب) پراکنندگی بزرگا بر حسب سرعت موج برشی، پ) تعداد رکوردها در فواصل مختلف ت) تعداد رکوردها در بازه های مختلف بزرگا

۳- الگوریتم توسعه‌ی ژنی

پس از الگوریتم‌های ژنتیکی و برنامه‌نویسی ژنتیکی که به ترتیب در دهه‌ی ۶۰ میلادی و سال ۱۹۸۵ ابداع شده اند، در سال ۱۹۹۹ الگوریتم توسعه‌ی ژنی که توسعه‌ی طبیعی از الگوریتم ژنتیکی و برنامه‌نویسی است، توسط فریرا ارائه شد [۳۹]. تمام این الگوریتم‌ها از جمعیتی استفاده می‌کنند، که انتخاب آنها با توجه به برازندگی بوده و با استفاده از یک یا چند اپراتور ژنتیکی، تنوع ژنتیکی را ایجاد می‌کنند [۳۹]. تفاوت اساسی میان مشخصه‌های طبیعی این سه الگوریتم وجود دارد. در الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌ها به صورت رشته‌هایی با طول ثابت هستند اما در برنامه‌نویسی ژنتیکی به صورت رشته‌هایی غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال مختلف می‌باشند (درخت تجزیه). در الگوریتم توسعه‌ی ژنی کروموزوم‌ها به عنوان رشته‌های نمادین با طول ثابت هستند که سپس به عنوان نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال مختلف (درخت توسعه) بیان شده‌اند [۴۰]. الگوریتم توسعه‌ی ژنی از همان نوع نمودارهای مورد استفاده برنامه‌نویسی ژنتیکی استفاده می‌کند اما نهادهای تولید شده به وسیله الگوریتم توسعه‌ی ژنی (درخت توسعه) عبارت یک ژنوم هستند. ژنوم یا کروموزوم در الگوریتم توسعه‌ی ژنی، شامل رشته‌ای نمادین و خطی، با طول ثابت می‌باشد. هر ژنوم از یک یا چند ژن تشکیل شده و با وجود طول ثابت، کد کروموزوم در الگوریتم توسعه‌ی ژنی مربوط به درختان توسعه با اندازه‌ها و اشکال مختلف است [۳۹]. در الگوریتم توسعه‌ی ژنی عناصر اصلی علاوه بر کروموزوم‌ها شامل درختان توسعه هستند، که عبارت از اطلاعات ژنتیکی کد شده در کروموزوم‌ها هستند. کد ژنتیکی نیز عبارت است از رابطه‌ی یک به یک بین نهادهای کروموزوم و توابع و یا ترمینال‌ها. این سازمان متشکل از توابع و ترمینال‌ها در درختان توسعه و نوع تعامل میان زیر درخت توسعه‌ها را قوانین بسیار ساده‌ای تعیین می‌کنند. بنابراین، بینش (نوآوری) بزرگ الگوریتم توسعه‌ی ژنی شامل ابداع کروموزوم‌هایی است که قادر به نمایندگی از هر درخت توسعه باشد که باعث ایجاد یک زبان جدید، به نام کاروا شد. این یک سیستم دو زبانه است که توسط فریرا برای خواندن و بیان اطلاعات کروموزوم‌های الگوریتم توسعه‌ی ژنی ارائه شد. سازمان ساختاری و کارکردی ژن در الگوریتم توسعه‌ی ژنی بدین صورت است که هر ژن دارای یک سر و یک دنباله است و این ساختار همیشه تضمین کننده تولید برنامه‌های معتبر است [۳۹]. مطابق فلوجارت اولین گام اساسی در الگوریتم توسعه‌ی ژنی تشکیل تصادفی کروموزوم‌ها توسط تعداد معینی از افراد

(جمعیت اولیه) است که در واقع این گام آغاز فرآیند در این الگوریتم است. در گام بعدی این کروموزوم‌ها بیان شده و برازندگی هر فرد در برابر مجموعه‌ای از موارد برازندگی ارزیابی می‌شود. سپس این افراد با توجه به برازندگی خود انتخاب می‌شوند تا خود ایجاد کننده‌ی فرزندان با صفات جدید باشند. فرزندان نیز به نوبه‌ی خود، در معرض روند توسعه‌ی مشابهی هستند و این روند تا زمانی تکرار می‌گردد که یک راه حل خوب پیدا شود [۴۰]. در سالهای اخیر الگوریتم توسعه‌ی ژنی در بسیاری از تحقیقات مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به منصوری و همکاران (۲۰۲۱)، سامویی و همکاران (۲۰۲۱) و قره باغی و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد [۴۱-۴۳].



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم توسعه‌ی ژنی [۴۰]

۴- مراحل انجام پژوهش

در بخش‌های پیشین در مورد پارامترهای تاثیرگذار در رابطه‌ی سرعت موج برشی پرداخته شد. این پارامترها عبارتند از بزرگای گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، حداکثر نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V) و پیرودی که این مقدار حداکثر در آن رخ می‌دهد (T_m)، که به عنوان متغیرهای ورودی برای الگوریتم توسعه‌ی ژنی تعیین شدند. با در نظر گرفتن این متغیرها، داده‌های زلزله از

شبکه‌ی شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انتخاب و تهیه گردید. در گام بعدی به دلیل اطمینان بیشتر و افزایش دقت در نتیجه‌ی کار اصلاحات لازم بر روی شتابنگاشت‌ها صورت گرفت. هر یک از این داده‌های شتاب‌نگاری شامل سه مؤلفه است، یک شتابنگاشت مربوط به مؤلفه‌ی قائم (V) و دو شتابنگاشت دیگر مربوط به مؤلفه‌های افقی (L) و (T) هستند. سپس پارامترهایی همچون بزرگای گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R) و پریرود زمانی نسبت طیفی حداکثر (T_m) استخراج گردید.

۴-۱- تصحیح شتاب‌نگاشت‌ها

از آنجا که کلیه‌ی رکوردها به ناچار دارای نوفه هستند، بحث تصحیح سیگنال و یا به عبارت بهتر حذف نوفه از سیگنال به دلیل اهمیت رکوردهای شتاب ثبت شده در مباحث مهندسی زلزله و زلزله‌شناسی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. عوامل مختلفی از قبیل ویژگی‌های ساختگاه و ژئوتکنیکی مثل نوع خاک منطقه، تعداد لایه‌ها، ضخامت و شیب آنها، توپوگرافی، شرایط آب زیرزمینی و ... نقش مهمی در دامنه و محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت و فرکانس تصحیح آنها دارد. محدوده‌ی مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها در شرایط ساختگاهی مختلف که توسط قدرتی و همکاران پیشنهاد شده است، در جدول ۱ ارائه شده است [۴۴].

جدول ۱: محدوده‌ی مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها [۴۴]

نوع ساختگاه	نوع دستگاه ثبت	محدوده مناسب F_L	محدوده مناسب F_H
سنگ	SSA2	۰/۱۵ - ۰/۲	۳۰ - ۳۳
	SMA1	۰/۱۵ - ۰/۲۵	۲۰ - ۲۳
خاک	SSA2	۰/۰۷ - ۰/۲	۳۰ - ۳۳
	SMA1	۰/۱۵ - ۰/۲	۲۰ - ۲۳

۴-۲- برآورد نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم

برای به دست آوردن نسبت طیفی H/V، رکوردهای زلزله را به نرم افزار Seismosignal وارد کرده و پس از فیلتر کردن آن، برای هر یک از مؤلفه‌های شتاب نگاشت، طیف پاسخ شتاب را به دست آمد و جدولی مانند جدول ۲ برای هر یک از رکوردهای زلزله تشکیل شد.

جدول ۲: نمونه‌ای از جدول تشکیل شده برای هر رکورد زلزله

period	L	T	H	V	H/V
0	0.096	0.101	0.140	0.028	4.936
0.02	0.097	0.102	0.140	0.029	4.848
0.03	0.097	0.103	0.141	0.030	4.701
0.04	0.099	0.105	0.145	0.034	4.207
0.05	0.099	0.105	0.144	0.033	4.349
0.06	0.099	0.106	0.144	0.035	4.172
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

در این جدول L، T و V مؤلفه‌های ثبت شده زلزله هستند که دوتای اول مؤلفه‌های افقی و سومی نشان دهنده مؤلفه قائم است. همچنین H برآیند مؤلفه‌های افقی است. برای محاسبه‌ی مقدار مؤلفه افقی با استفاده از دو مؤلفه‌ی افقی ثبت شده روش‌های متعددی

بیان شده است که در این پژوهش از جذر مجموع مربعات مؤلفه‌های افقی استفاده گردید و در نهایت با استفاده از رابطه ۶ نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم به دست آمد.

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{L^2 + T^2}}{V} \quad (6)$$

با توجه به رابطه‌ی فوق نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) محاسبه شده و پریودی که در آن این نسبت بیشینه می‌باشد، به دست می‌آید. پس از به دست آمدن نسبت طیفی حداکثر و پریود مربوط به آن، بزرگای زلزله و فاصله‌ی کانونی برای هر رکورد زلزله استخراج شده است. در این پژوهش از بزرگای گشتاوری استفاده شد و برای یکسان‌سازی رکوردها، همه‌ی بزرگاها به بزرگای گشتاوری تبدیل گردید. سپس با استخراج پارامترهای عمق کانونی و فاصله‌ی رومرکزی برای هر رکورد زلزله، فاصله‌ی کانونی از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$R = \sqrt{r^2 + D^2} \quad (7)$$

که در آن R، r و D به ترتیب فاصله‌ی کانونی، فاصله‌ی رومرکزی و عمق کانونی می‌باشند. پس از تعیین پارامترهای ذکر شده جدولی مطابق زیر برای داده‌ها تشکیل شد.

جدول ۳: نمونه‌ای از جدول تشکیل شده برای داده‌ها

Record	M _w	R	T _m	H/V
5362	4.9	25.46	1.80	7.25
5363	4.9	24.08	0.51	7.76
5369	4.2	18.36	0.90	5.28
5375	5.2	34	0.34	6.43
5376	5.2	42.15	0.72	4.13
5377	5.2	65.97	0.24	5.78
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

در این پژوهش، برای رگرسیون‌گیری از روش الگوریتم توسعه‌ی ژنی استفاده شد. بدین منظور بزرگای گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، حداکثر نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) و پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر (T_m) به عنوان متغیرهای ورودی برای الگوریتم توسعه‌ی ژنی و سرعت موج برشی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شدند.

جدول ۴: نمونه‌ای از جدول متغیرهای ورودی برای الگوریتم توسعه‌ی ژنی

M _w	R	T _m	H/V
4.9	25.46	1.80	7.25
4.9	24.08	0.51	7.76
4.2	18.36	0.90	5.28
5.2	34	0.34	6.43
5.2	42.15	0.72	4.13
⋮	⋮	⋮	⋮

گام بعدی تعیین تابع برازندگی است، در این پژوهش تابع برازندگی براساس ریشه‌ی حداقل مربعات خطا (RMSE³) تعیین شده است. رابطه ۸ ریشه حداقل مربعات خطا و رابطه ۹ تابع برازندگی مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهند.

³ Root Mean Square Error (RMSE)

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2} \quad (8)$$

در معادله‌ی فوق Y'_i مقادیر پیش‌بینی شده و Y_i مقادیر هدف برای هر مورد می‌باشند و زمانی که دو مقدار پیش‌بینی شده و هدف برابر گردند، مقدار خطا برابر صفر خواهد شد ($E = 0$). همچنین مشاهده می‌شود هر چه مقدار E کمتر باشد، تابع پیش‌بینی و هدف مطابقت بیشتری خواهند داشت. در نهایت تابع ارائه شده توسط رابطه‌ی زیر به عنوان تابع برازندگی مورد استفاده واقع شد:

$$f = \frac{1000}{1+E} \quad (9)$$

با تعریف ارائه شده برای تابع برازندگی، این تابع دارای دامنه‌ی تغییرات ۰-۱۰۰۰ بوده که حداکثر مقدار آن نشانه‌ی تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی و هدف می‌باشد و هر چه مقدار این تابع کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی تطابق کمتری خواهد بود.

جدول ۵: تنظیمات در نظر گرفته برای استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی

داده‌ها	آموزشی	آزمایشی
	٪ ۸۰	٪ ۲۰
متغیرها	$M_w, R, T_m, \frac{H}{V}$	
تعداد کروموزوم	۳۰	
تنظیمات کلی	اندازه هد	۸
	تعداد ژن	۳
تابع اتصال	Addition (+)	
تابع برازندگی	RMSE	
اپراتورهای ژنی	جهش	۰/۴۴
	وارونگی	۰/۱
	جابه‌جایی به‌جز در ریشه‌ی ژن	۰/۱
	جابه‌جایی در ریشه‌ی ژن	۰/۱
	نو ترکیبی یک نقطه‌ای	۰/۳
	نو ترکیبی دو نقطه‌ای	۰/۳
	نو ترکیبی ژنی	۰/۱
	جابه‌جایی کل ژن	۰/۱
	ثابت‌های عددی	۲

Addition (+), Subtraction (-), Multiplication (*),
 Division (/), Power (pow), Square root (sqrt),
 Exponential (exp), 10^x (pow10), Natural
 Logarithm (ln), Logarithm of base 10 (log),
 Inverse (Inv), Negation (neg), Cube root (3RT),
 Power of 2 (x2), Power of 3 (x3), Power of 4 (x4)

توابع ریاضی

۳-۴- طبقه بندی ساختگاه‌ها به همراه دسته بندی آن‌ها

تاکنون، طبقه بندی‌های مختلفی جهت ارزیابی اثرات ساختگاهی پیشنهاد شده است. در این پژوهش، طبقه بندی ساختگاه براساس استاندارد ۲۸۰۰ به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته شده است که شاخص آن میانگین سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی خاک (V_{s30}) می باشد، همچنین مقایسه ای با سایر طبقه بندی های ارائه شده، انجام گرفت.

۱-۳-۴- آیین نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم)

چگونگی طبقه بندی نوع زمین در استاندارد ۲۸۰۰، که به عنوان مبنای طراحی مقاوم ساختمان‌ها در برابر زلزله در ایران به کار می رود، در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۶: طبقه بندی نوع زمین براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۴۵]

پارامترها			نوع زمین
\bar{C}_u (kPa)	$\bar{N}_{1(60)}$	\bar{V}_s (m/s)	توصیف لایه بندی زمین
-	-	> 750	I سنگ و شبه سنگ، شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاک‌های سیمانته بسیار محکم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف تر تا سطح زمین
> 250	> 50	$750-375$	II خاک خیلی متراکم یا سنگ سست، شامل شن و ماسه‌ی خیلی متراکم، رس بسیار سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر که مشخصات مکانیکی آن با افزایش عمق به تدریج بهبود یابد.
$250-70$	$50-15$	$375-175$	III سنگ‌های آذرین و رسوبی سست، مانند توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر
< 70	< 15	< 175	IV خاک متوسط تا نرم، لایه‌های خاک غیر چسبنده یا با کمی خاک چسبنده با تراکم متوسط تا کم، لایه‌های خاک کاملاً چسبنده نرم تا محکم

\bar{V}_s : متوسط سرعت موج برشی در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه

$\bar{N}_{1(60)}$: متوسط $N_{1(60)}$ در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری

$N_{1(60)}$: تعداد ضربات نفوذ استاندارد (اصلاح شده برای فشار مؤثر سربار و انرژی)

\bar{C}_u : متوسط C_u در لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۳۰ متری

C_u : مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های چسبنده

تعیین طبقه بندی نوع زمین، در این جدول، باید براساس مقدار سرعت موج برشی \bar{V}_s صورت گیرد ولی در صورت دسترسی نداشتن به آن می توان در خاک‌های دانه‌ای با اندازه‌ی کوچک تر از شن متوسط از تعداد ضربات نفوذ استاندارد $\bar{N}_{1(60)}$ و در خاک‌های چسبنده از مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی $\bar{N}_{1(60)}$ استفاده نمود [۴۵].

۲-۳-۴- طبقه بندی ساختگاه بر اساس مطالعات زارع و همکاران

در میان روش‌های انجام شده برای طبقه بندی ساختگاه‌ها روش (H/V) می تواند پاسخ ساختگاه به حرکات نیرومند زمین و یا به عبارتی اثر سایت را آشکار سازد. این کار از طریق بررسی رکوردهای شتاب سه مؤلفه‌ای صورت می پذیرد. مزیت و برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها استفاده از حداقل یک رکورد در هر ایستگاه و تنها روشی است که برای هر موقعیتی قابل استفاده است. از طرف دیگر روش

(H/V) محدودیت‌های سایر روش‌ها را دارا نمی‌باشد. به عنوان مثالی از این محدودیت‌ها، پروفایل سرعت اندازه‌گیری شده توسط روش لرزه‌نگاری محدود به عمق ۳۰-۳۵ متری اول می‌شود. استفاده از اندازه‌گیری میکروترمورها، تنها در سایت‌های خاک نرم، منتهی به نتایج مطلوب می‌گردد و ضریب تقویت امواج زلزله در دیگر سایت‌ها به خوبی قابل تشخیص نمی‌باشد. هم‌چنین تست‌های ژئوالکتریکی دارای دقت بالایی نمی‌باشد و با تکیه بر این تست‌ها به تنهایی نمی‌توان تشخیص درستی از سایت‌های مختلف داشت [۵].

در سایت‌هایی که در آن‌ها لایه‌های آبرفتی ضخیم وجود دارد (با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر)، در لایه‌های با سرعت بالا و عمق زیاد روش H/V تنها روشی است که با استفاده از آن می‌توان به خوبی ضریب تقویت امواج را در فرکانس‌های پایین را مشاهده کرد. در این مورد روش‌های دیگر برای لایه‌های آبرفتی با سرعت‌های بالا ضریب تقویت امواج را تنها برای فرکانس‌های بالا (بزرگتر از ۱۵ هرتز) به خوبی نشان می‌دهد.

وجود رابطه‌ی نسبتاً خوب بین پروفایل سرعتی موج S و نتایج حاصل از منحنی‌های RF، اجازه تعریف یک کلاس‌بندی چندگانه از سایت را می‌دهد. این طبقه‌بندی براساس بالاترین پیک دامنه در یک فرکانس خاص صورت می‌پذیرد [۵].

۱- کلاس ۱، مربوط به منحنی‌های RF (پیک دامنه‌ی زیر ۳-۴) متناظر با یک پیک دامنه بزرگتر از ۳-۴ در فرکانس‌های بالاتر از ۱۵ هرتز

۲- کلاس ۲، مربوط به منحنی‌های RF متناظر با یک پیک دامنه‌ی بزرگتر از ۳-۴ در فرکانس‌های بین ۵ تا ۱۵ هرتز

۳- کلاس ۳، مربوط به منحنی‌های RF متناظر با یک پیک دامنه‌ی بزرگتر از ۳-۴ در فرکانس‌های بین ۲ تا ۵ هرتز

۴- کلاس ۴، مربوط به منحنی‌های RF متناظر با یک پیک دامنه‌ی بزرگتر از ۳-۴ در فرکانس‌های زیر ۲ هرتز

جدول ۷: چهار کلاس مورد نظر برای طبقه‌بندی سایت [۵]

کلاس	پهنای فرکانسی	$V_{s30} (ms^{-1})$
۱	$F > 15 \text{ Hz}$	$V_{s30} > 700$
۲	$5 = F < 15 \text{ Hz}$	$500 = < V_{s30} < 700$
۳	$2 = F < 5 \text{ Hz}$	$300 = < V_{s30} < 500$
۴	$F < 15 \text{ Hz}$	$V_{s30} < 300$

۳-۳-۴ - طبقه‌بندی ساختگاه بر اساس قائم‌مقیامیان و نوجوان (۲۰۰۸)

در میان طبقه‌بندی‌های مختلف، در بعضی از طبقه‌بندی‌ها هم از سرعت موج برشی و هم از پیروید غالب برای تعیین رده ساختگاه استفاده گردیده که در این خصوص می‌توان به مطالعات قائم‌مقیامیان و نوجوان (۲۰۰۸) اشاره نمود. جزئیات این طبقه‌بندی‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس این رده‌بندی‌ها، ساختگاه به چهار نوع مطابق تعاریف زیر صورت پذیرفته است:

I: سنگ‌های آذرین با بافت درشت و ریز دانه، سنگ‌های رسوبی بسیار سخت و مقاوم، خاک‌های متراکم بسیار سخت با ضخامت بیش از ۳۰ متر

II: سنگ‌های آذرین سست، سنگ‌های سست رسوبی، سنگ‌های دگرگون متورق، خاک‌های متراکم بسیار سخت با ضخامت کمتر از ۳۰ متر

III: سنگ‌های متلاشی شده در اثر هوازدگی، خاک‌های با تراکم متوسط، طبقات شن با ماسه با پیوند متوسط بین دانه‌ها و رس با سختی متوسط

IV: نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد در اثر بالا بودن تراز آب زیرزمینی، هرگونه پروفیل خاک شامل حداقل ۶ متر خاک رس با اندیس خمیری بیش از ۲۰ و درصد رطوبت بیش از ۴۰ درصد [۴۶].

جدول ۸: طبقه‌بندی خاک با توجه به پریرود غالب و سرعت موج برشی [۴۶]

طبقه	نوع خاک	پریرود غالب (ثانیه)	V_{s30} (ms^{-1})
I	سخت-سنگ سفت	< 0.17	> 700
II	سفت	$0.17 - 0.3$	$400 - 700$
III	نسبتا سفت	$0.3 - 0.5$	$240 - 400$
IV	سست	> 0.5	< 240

۴-۳-۴- آیین نامه UBC 1997

نحوه طبقه‌بندی ساختگاه براساس این روش در جدول ۹ ارائه شده است. در این نوع طبقه‌بندی، سرعت موج برشی در ۳۰ متر فوقانی (V_{s30}) پارامتر اصلی و معیار طبقه‌بندی می‌باشد.

جدول ۹: طبقه‌بندی براساس UBC 1997

رده ساختگاه	توصیف	V_{s30} (ft/s)	N_{30}	S_u (psf)
SA	سنگ سخت	> 5000	.....	.....
SB	سنگ	$2500 - 5000$	> 50	.....
SC	سنگ سست یا خاک سخت	$1200 - 2500$	$15 - 50$	≤ 2000
SD	خاک سفت	$600 - 1200$	.....	$1000 - 2000$
SE	خاک سست یا هر نوع خاک با بیش از ۱۰ متر رس نرم با $PI > 20$ و رطوبت طبیعی بیش از ۴۰ درصد	< 600	.....	< 5000

خاک‌هایی که نیاز به ارزیابی دارند:

- ۱- خاک‌هایی که واجد پتانسیل گسیختگی و فروریختگی در شرایط لرزه‌ای هستند، مثل خاک‌های روان‌گرا، رس‌های حساس و سریع، خاک با سیمان ضعیف و پتانسیل فروریختگی
- ۲- رس‌های با درصد بالای مواد آلی و زغال نارس با ضخامت بیش از ۱۰ فوت
- ۳- رس‌های شدیداً پلاستیک با ضخامت بیش از ۲۵ فوت و $PI > 75$
- ۴- رس نرم یا نسبتا سفت با ضخامت بیش از ۱۲۰ فوت

توضیح: V_{s30} ، N_{30} و S_u به ترتیب میانگین سرعت موج برشی، مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک و ضربه‌ی نفوذ استاندارد در ۱۰۰ فوت (۳۰ متر) فوقانی می‌باشند [۴۷].

۴-۳-۵- طبقه‌بندی براساس مطالعات کمک پناه و همکاران

جدول ۱۰: طبقه‌بندی براساس کمک پناه و همکاران [۴۸]

طبقه	نوع خاک	فرکانس مبنا (هرتز)	V_{s30} (m/s)
I	سخت-سنگ سست	$> 7/5$	> 750
II	سفت	$5 - 7/5$	$750 - 550$
III	نسبتا سفت	$2/5 - 5$	$550 - 350$
IV	سست	$< 2/5$	< 350

- I: سنگ‌های آذرین با بافت درشت و ریز دانه، سنگ‌های رسوبی بسیار سخت و مقاوم، خاک‌های متراکم بسیار سخت با ضخامت بیش از ۳۰ متر
- II: سنگ‌های آذرین سست، سنگ‌های سست رسوبی، سنگ‌های دگرگون متورق، خاک‌های متراکم بسیار سخت با ضخامت کمتر از ۳۰ متر
- III: سنگ‌های متلاشی شده در اثر هوازدگی، خاک‌های با تراکم متوسط، طبقات شن با ماسه با پیوند متوسط بین دانه‌ها و رس با سختی متوسط
- IV: نهشته‌های نرم با رطوبت زیاد در اثر بالا بودن تراز آب زیرزمینی، هرگونه پروفیل خاک شامل حداقل ۶ متر خاک رس با اندیس خمیری بیش از ۲۰ و درصد رطوبت بیش از ۴۰

۴-۳-۶- طبقه‌بندی براساس مطالعات سینائیان

سینائیان براساس سرعت موج برشی و فرکانس غالب طبقه‌بندی برای خاک ارائه داد که مطابق با جدول زیر است:

جدول ۱۱: طبقه‌بندی براساس مطالعات سینائیان [۴۹]

کلاس	فرکانس غالب (هرتز)	$V_{s30} \text{ ms}^{-1}$
۱	$F \geq 8 \text{ Hz}$	$V_{s30} \geq 750$
۲	$5 < F < 8$	$500 < V_{s30} < 750$
۳	$2 < F < 5$	$250 < V_{s30} < 500$
۴	$F < 2 \text{ Hz}$	$V_{s30} < 250$

۴-۳-۷- طبقه‌بندی براساس انجمن ملی کاهش خطرات زمین‌لرزه

نوعی طبقه‌بندی رایج دیگر برای ساختگاه وجود دارد که انجمن ملی کاهش خطرات زمین‌لرزه (NEHRP^۴) براساس سرعت موج برشی (V_s) زمین را به ۴ گروه مطابق جدول زیر تقسیم می‌کند.

جدول ۱۲: طبقه‌بندی براساس NEHRP

رده‌ی ساختگاه	شرایط ساختگاهی	متوسط سرعت موج برشی m/s	مقاومت برشی زهکشی نشده \bar{S}_u (kpa)	عدد نفوذ استاندارد (یا \bar{N}_{ch} برای لایه‌های خاک غیر چسبنده)
A	سنگ سخت	$\bar{V}_s > 1500$	.....	.....
B	سنگ	$760 < \bar{V}_s \leq 1500$	.....	.....
C	خاک بسیار متراکم و سنگ (سست نرم)	$360 < \bar{V}_s \leq 760$	$\bar{S}_u > 100$	$\bar{N} > 50$
D	خاک سفت	$180 < \bar{V}_s \leq 360$	$50 < \bar{S}_u \leq 100$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$
E	.....	.....	.....	.....

هر نوع پروفیل خاک با ضخامت بیشتر از ۳ متر که دارای خواص ذیل باشد:

- ۱- شاخص خمیری ($PI > 20$)
- ۲- درصد رطوبت ($w \geq 40\%$)
- ۳- مقاومت برشی زهکشی نشده ($\bar{S}_u < 25 \text{ kpa}$)
- ۴- $\bar{V}_s < 180$

⁴ National Earthquake Hazards Reduction Program

خاک هایی که به بررسی های خاص ساختمانی نیاز دارند:

۱- خاک هایی که پتانسیل گسیختگی یا فروریزی تحت اثر بارگذاری لرزه ای دارند مانند خاک های قابل روان شدن، رس های فوق العاده حساس، خاک های با سمنتاسیون ضعیف و رمبنده

F

۲- لجن یا رس های دارای مواد آلی بسیار زیاد با ضخامت بیش از ۳ متر باشد.

۳- رس های با پلاستیسیته بسیار زیاد ($PI > 75$) درجایی که ضخامت رس بیش از ۷/۶۲ باشد.

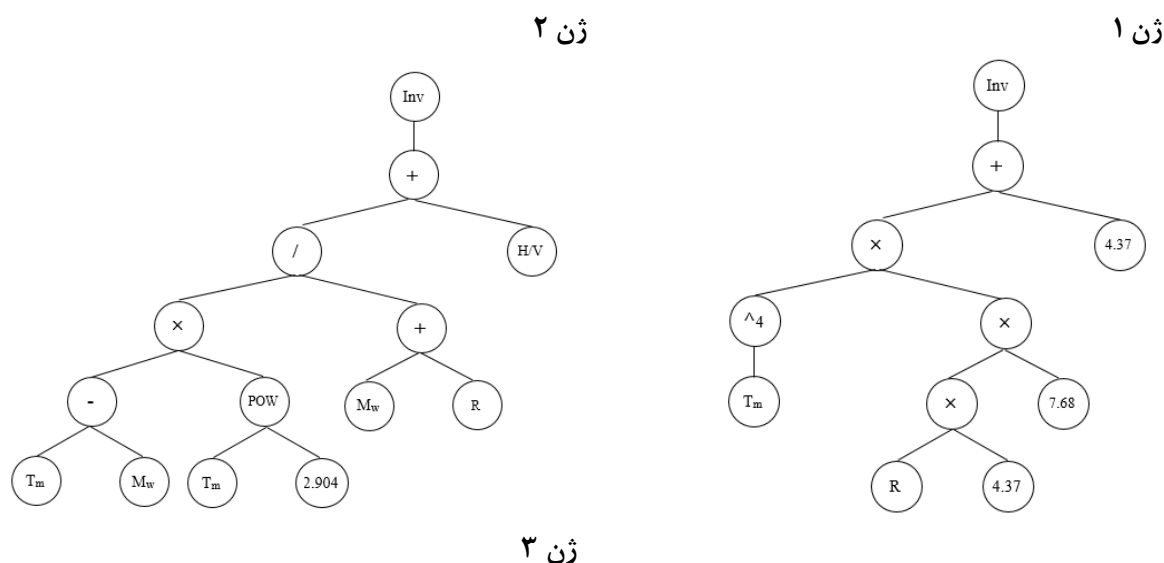
۴- رس های ضخیم، نرم تا متوسط با ضخامت بیش از ۳۶ متر

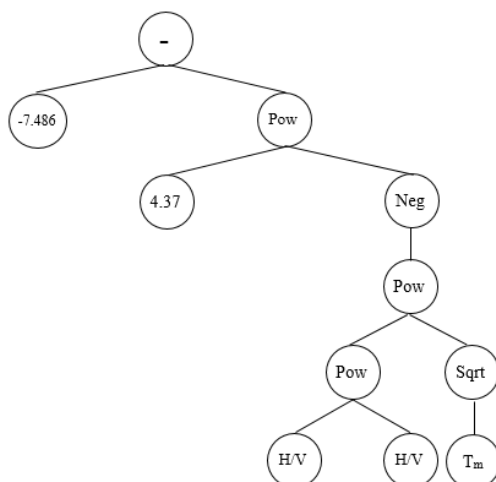
استثناء: هنگامی که خواص خاک به گونه ای که بتوان آن را طبقه بندی کرد در دست نیست، از رده ی D بایستی بهره گرفته شود. رده های E و F تا زمانی که یک سازمان ذیصلاح وجود این لایه ها را در ساختگاه اعلام ننموده یا در گزارش ژئوتکنیک به این لایه ها اشاره نشده، نبایستی استفاده شوند.

۵- ارائه ی نتایج

۵-۱- ارائه ی رابطه

با توجه به توضیحاتی که در بخش قبل بیان شد، رابطه ی سرعت موج برشی معادل با درختان توسعه نشان داده شده در شکل ۵ است. تابع اتصال در این پروژه، اپراتور جمع است پس با جمع کردن درختان توسعه با هم برای ژن ها، رابطه ی ۶ به دست می آید:





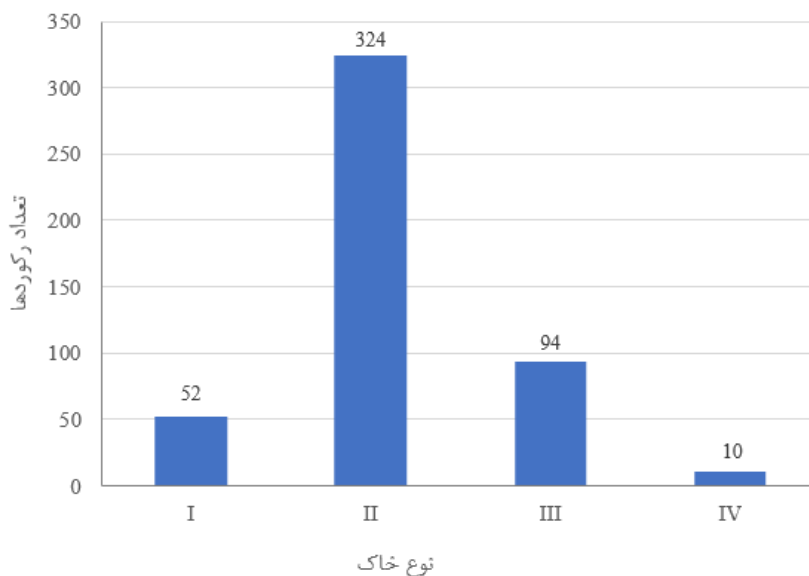
شکل ۴: درخت توسعه‌ی ژن‌های رابطه‌ی سرعت موج برشی

$$\log V_s = \frac{1}{33.562 R T_m^4 + 4.37} + \left[\frac{(T_m - M_w) T_m^{2.904}}{M_w + R} + \frac{H}{V} \right]^{-1} - \left[4.37^{(H/V)^{\frac{H \sqrt{T_m}}{V}}} \right]^{-1} - 7.486 \quad (10)$$

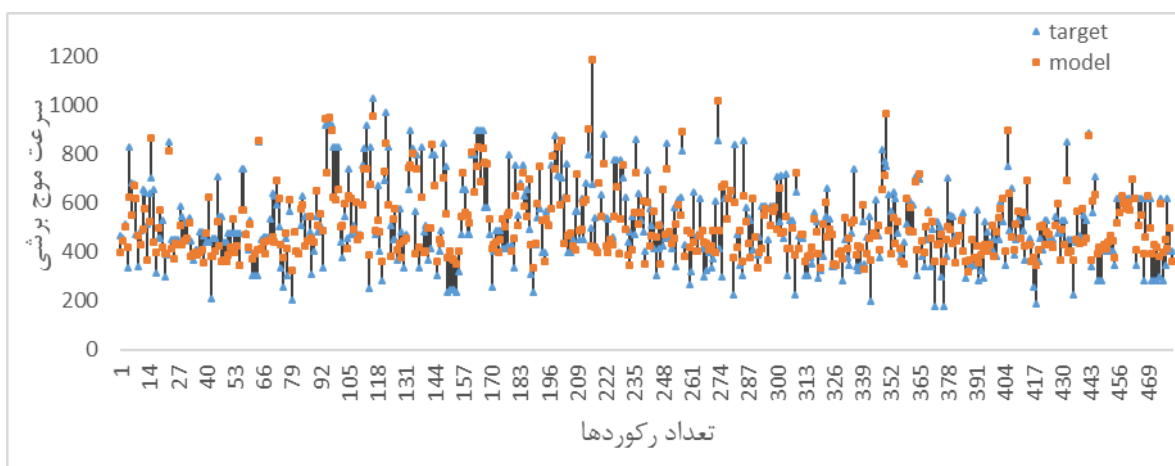
که در این رابطه V_s سرعت موج برشی براساس متر بر ثانیه، R فاصله‌ی کانونی که واحد آن کیلومتر است، T_m پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر و H/V نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله در نظر گرفته شد. تابع برازندگی رابطه حاصل، $f = 911.57$ محاسبه شد. با توجه به توضیحاتی که در بخش‌های قبلی داده شد، مقدار تابع برازندگی در بازه ۰-۱۰۰۰ است و مقدار بیشتر برازندگی، دقت بالاتر و تطابق بیشتر را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان گفت رابطه پیشنهادی با دقت مناسبی سرعت موج برشی خاک را محاسبه می‌کند. در ادامه به میزان مطابقت مقادیر محاسبه شده توسط رابطه پیشنهادی و مقادیر واقعی پرداخته می‌شود، همچنین مقایسه‌ای با سایر پژوهش‌ها برای بررسی مدل ارائه شده صورت می‌گیرد.

۲-۵- بررسی مدل ارائه شده

همان‌طور که در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود نوع زمین مربوط به هر یک از رکوردهای زلزله با توجه به سرعت موج برشی آن-ها، براساس استاندارد ۲۸۰۰ مشخص گردید که ۵۲ رکورد از نوع ۱، ۳۲۴ رکورد از نوع ۲ و ۹۴ رکورد از نوع ۳ و ۱۰ رکورد از نوع ۴ بودند. با توجه به اینکه ملاک اصلی مقایسه استاندارد ۲۸۰۰ بوده است، ابتدا نتایج با این استاندارد مقایسه می‌گردد. از میان ۴۸۰ رکورد مورد استفاده ۳۵۰ رکورد سرعت موج برشی ای را بدست می‌دهند که نوع خاک آن مطابق با طبقه بندی استاندارد ۲۸۰۰ است، ولی باید توجه داشت که هدف این پژوهش پیش بینی سرعت موج برشی بوده است و نه طبقه بندی خاک. به همین دلیل ممکن است سرعت موج برشی پیش بینی شده توسط رابطه، برای خاکی که سرعت موج برشی واقعی آن ۷۴۹ متر بر ثانیه بوده باشد، مقدار ۷۵۱ متر بر ثانیه تخمین زده شود که تخمین بسیار خوبی است اما از نظر طبقه بندی خاک مطابق استاندارد ۲۸۰۰ این خاک نوع ۲ می‌باشد و مقدار پیش بینی مطابق استاندارد ۲۸۰۰ نوع ۱ خواهد بود. به همین دلیل در شکل ۶، سرعت موج برشی هدف و پیش بینی که در این پژوهش ارائه شده است، برای هر کدام از رکوردهای زلزله با یکدیگر مقایسه شده است که مقادیر آبی مربوط به سرعت موج برشی پیش بینی شده و نارنجی، سرعت موج برشی مدل ارائه شده می‌باشد. همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود تفاوت‌ها در بسیاری از رکوردها کم و ناچیز بوده و در تعداد معدودی تفاوت بیشتر است.



شکل ۵: نوع خاک براساس تعداد رکوردها



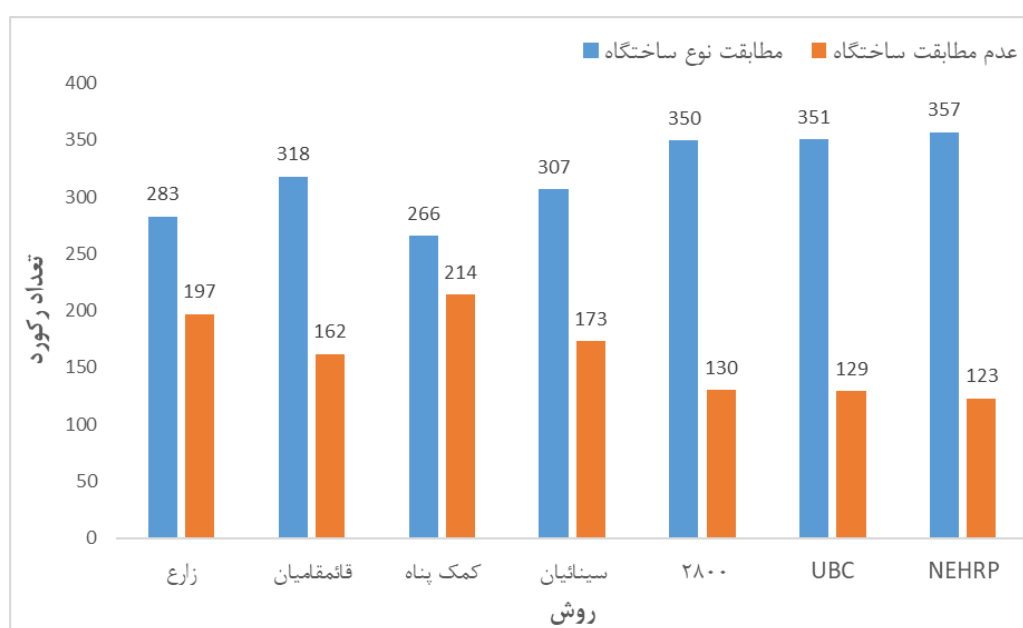
شکل ۶: مقایسه‌ی سرعت موج برشی رکوردها

۳-۵- بررسی نتایج معیارهای طبقه‌بندی خاک

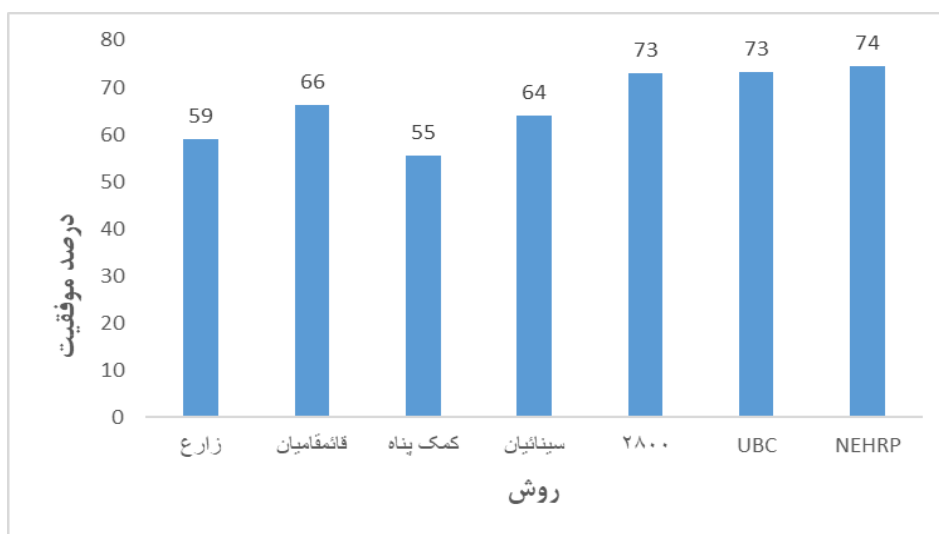
به دلیل اینکه تاکنون پژوهشی به ارائه رابطه برای سرعت موج برشی نپرداخته است و تحقیقات بصورت طبقه بندی بوده اند و با توجه به اینکه هر کدام از طبقه بندی ها ملاک های مختلفی ارائه کرده اند که در برخی موارد اتفاق نظر ندارند، در این بخش به مقایسه نتایج در طبقه بندی های مختلف پرداخته می شود. برای مقایسه‌ی طبقه‌بندی خاک، طبقه‌بندی‌هایی براساس زارع و همکاران [۵]، قائم‌مقامیان و نوجوان [۴۶]، کمک پناه و همکاران [۴۸]، سینائیان [۴۹]، آیین‌نامه‌ی UBC 1997 [۴۷] و NEHRP، در نظر گرفته شد. در نهایت مقادیر سرعت برشی هدف و مدل براساس هریک از این طبقه‌بندی‌ها با یکدیگر مقایسه شدند.

شکل ۷ نشان می‌دهد که در هر یک از روش‌های طبقه‌بندی، چه تعداد از رکوردهای زلزله ساختگاه واقعی و پیش بینی شده مطابقت دارند. در هر یک از روش‌ها، ستون چپ مربوط به رکوردهای مطابقت داشته و ستون راست مربوط به عدم مطابقت می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد بیشترین تطابق مربوط به استاندارد ۲۸۰۰، آیین‌نامه‌ی UBC 1997 و آیین‌نامه‌ی NEHRP می‌باشد و کمترین تطابق با تحقیقات کمک پناه و همکاران است.

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شد درصد موفقیت برای رده‌ی ساختگاه مطابق طبقه‌بندی زارع و همکاران ۵۹ درصد، قائم‌مقامیان و همکاران ۶۶ درصد، کمک‌پناه و همکاران ۵۵ درصد، سینائیان ۶۴ درصد، استاندارد ۲۸۰۰ دارای ۷۳ درصد، آیین‌نامه‌ی UBC، ۷۳ درصد و NEHRP، ۷۴ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه ملاک اصلی استاندارد ۲۸۰۰ بوده، مطابقت بیش از ۷۰ درصدی نشان دهنده پیش بینی مناسب رابطه ارائه شده است.



شکل ۷: مقایسه‌ی مطابقت ساختگاه براساس تعداد رکورد طبق هر یک از روش‌ها



شکل ۸: درصد موفقیت هر یک از روش‌ها در تخمین رده‌ی ساختمان

۶- نتیجه گیری

هدف این پژوهش در ابتدا به دست آوردن نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم رکوردهای زلزله بود که با به دست آوردن این نسبت و استخراج سایر متغیرها، رابطه‌ی سرعت موج برشی به دست آمد.

سرعت موج برشی از جمله مهم‌ترین پارامترهای ژئوتکنیکی در تحلیل‌های لرزه‌ای-دینامیکی نظیر بزرگ‌نمایی حرکات زمین در اثر زمین‌لرزه، بررسی اندرکنش خاک-سازه، تحلیل و طراحی دینامیکی پی ماشین آلات مرتعش و سازه‌های مدفون در زمین و نیز در تحلیل تغییر شکل‌های استاتیکی نظیر حفاری‌ها، نشست زمین و برآورد اصلاحات زمین می‌باشد. اهمیت استفاده از این پارامتر در این است که در اثر وجود موج برشی، ذرات در راستای عمود بر انتشار موج حرکت کرده و به این ترتیب می‌توان خواص برشی خاک را اندازه گرفت. بنابراین برای به دست آوردن سرعت موج برشی، با توجه به هزینه‌ها، زمان بر بودن و نیاز به زدن گمانه در روش‌های لرزه‌ای و ژئوتکنیکی، ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی به دست آمده برای این پارامتر طبق این پژوهش، بسیار مفید می‌باشد.

در این مقاله با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی، رابطه‌ای برای سرعت موج برشی به صورت تابع پیوسته و با دقتی مناسب ارائه شد. پیوسته بودن این تابع از این جهت حائز اهمیت است که می‌توان از آن برای کلیه مقادیر ورودی در بازه موجود استفاده کرد و امکان اینکه پارامترهای ورودی (بزرگای زلزله، فاصله‌ی منبع زلزله تا ساختمان، نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم H/V) و پیوند زمانی نسبت طیفی حداکثر) بصورت استثنا سرعت موج برشی را با مقادیر غیرقابل قبول و خارج از بازه ارائه دهند، وجود ندارد. از دیگر مزایای این روش این است که تنها نوع خاک را تعیین نمی‌کند، بلکه علاوه بر آن سرعت موج برشی را بصورت رابطه ارائه می‌دهد، که کاربرد آن بیش از تعیین نوع خاک است.

رابطه‌ی محاسبه شده در این پژوهش دارای برازندگی $f = 911.57$ بوده است، اما باید توجه داشت که این بدین معنی نیست که در هر بار استفاده از این روش دقت بیش از ۹۱ درصدی وجود دارد یا بیش از ۹۱ درصد تلاشها با دقت کامل خواهد بود. دقت نتایج پژوهش ارائه شده با مقایسه‌ی رابطه‌ی ارائه شده و سایر روشهای تعیین نوع خاک مشاهده می‌شود. با مقایسه نتایج با استاندارد ۲۸۰۰، ۷۳ درصد، طبق روش زارع و همکاران ۵۹ درصد، قائمقامیان و همکاران ۶۶ درصد، کمک پناه و همکاران ۵۵ درصد، سینائیان ۶۴ درصد، آیین-نامه‌ی UBC، ۷۳ درصد و NEHRP، ۷۴ درصد مطابقت با مقادیر پیش‌بینی شده مشاهده می‌شود. همچنین ارائه رابطه سرعت موج برشی در واقعیت، دقت بالاتری از مقایسه‌های انجام شده در این مقاله دارد. چون در برخی مقادیر مرزی با وجود دقت مناسب رابطه، نتیجه اشتباه در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال اگر سرعت موج برشی ۳۸۰ متر بر ثانیه بوده باشد و رابطه مقدار آن را ۳۷۰ متر بر ثانیه

برآورد کند، در مقایسه با استاندارد ۲۸۰۰، خاک از نوع II و نتیجه رابطه سرعت موج برشی در این پژوهش نوع III خواهد بود، در نتیجه برآورد این روش اشتباه در نظر گرفته شده است، ولی مشاهده می شود که دقت رابطه مناسب است. این از معایب مقایسات انجام شده است. در نهایت با توجه به دقت مناسب روش و استفاده راحت از رابطه، در مناطقی که نوع خاک در دسترس نبوده اما رکورد زلزله ثبت شده وجود دارد، از روش پیشنهادی می توان برای تعیین نوع خاک با دقت مناسبی استفاده کرد.

منابع

- [1] Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5), 1574-1594.
- [2] Borcherdt, R. D., & Gibbs, J. F. (1976). Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(2), 467-500.
- [3] Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29-61.
- [4] Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- [5] Zare, M., Bard, P. Y., & Ghafory-Ashtiany, M. (1999). Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(2), 101-123.
- [6] Zare, M. (1994). *The study of site effects on the strong ground motions during earthquakes, a case-study on the Manjil 1990 earthquake* (Doctoral dissertation, MSc. Thesis, Engineering Geology Dept. Tarbiat-Modarres University, Tehran, 1994. 214p (in Persian)).
- [7] Zare, M. (1996). Site dependent attenuation of strong motions for Iran. In *Proceedings of the fifth international conference on seismic zonation (Nice, October 17-19, 1995)* (pp. 1227-1236).
- [8] Zare, M. (1996). Deux exemples de mouvements de forts seismes en champ proche en Iran. In: 4em Colloque National en Geologie Parasismique, AFPS, Paris, Proc. vol.1, pp. 112-119.
- [9] Zare, M. (1996). The soft soil site responses to the Manjil, Iran (1990) earthquake. In *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Acoppolco, paper* (No. 1475).
- [10] Jafari, MK., Kamalian, M., Chamanzad, M. (1995). Microzonation of the Tehran Region. In: *Proceedings of the Second International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE-2)*, Tehran, vol. 2, pp. 1301-1311.
- [11] Jafari, MK., Kamalian, M., Chamanzad, M. (1996). Microzonation study in the Tehran region. In: *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Acoppolco, paper no.895.
- [12] Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., ... & Ogawa, H. (2006). An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 914-925.
- [13] Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y., & Sinaeian, F. (2009). Applying empirical methods in site classification, using response spectral ratio (H/V): A case study on Iranian strong motion network (ISMN). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(1), 121-132.
- [14] Anbazhagan, P., Srilakshmi, K. N., Bajaj, K., Moustafa, S. S., & Al-Arifi, N. S. (2019). Determination of seismic site classification of seismic recording stations in the Himalayan region using HVSR method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 304-316.
- [15] Lachetl, C., & Bard, P. Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377-397.
- [16] Field, E. H., & Jacob, K. H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bulletin of the seismological society of America*, 85(4), 1127-1143.
- [17] Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. *The effects of surface geology on seismic motion*, 3, 1251-1279.
- [18] Bindi, D., Parolai, S., Spallarossa, D., & Cattaneo, M. (2000). Site effects by H/V ratio: comparison of two different procedures. *Journal of Earthquake Engineering*, 4(01), 97-113.
- [19] Theodulidis, N. P., & Bard, P. Y. (1995). Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: an analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (SMART-1). *Soil dynamics and earthquake engineering*, 14(3), 177-197.
- [20] Nogoshi, M. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor, Part II. *Journal of the seismological society of Japan*, 24, 26-40.
- [21] Arai, H., & Tokimatsu, K. (2004). S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63.
- [22] Picozzi, M., & Albarello, D. (2007). Combining genetic and linearized algorithms for a two-step joint inversion of Rayleigh wave dispersion and H/V spectral ratio curves. *Geophysical Journal International*, 169(1), 189-200.

- [23] Herak, M. (2008). ModelHVSR—A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Computers & Geosciences*, 34(11), 1514-1526.
- [24] Ghofrani, H., & Atkinson, G. M. (2014). Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 30-43.
- [25] Sylvestre, B. C., Cécile, C., Pierre-Yves, B., Fabrice, C., Peter, M., Jozef, K., & Fäh, D. (2006). H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophysical Journal International*, 167(2), 827-837.
- [26] Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P. Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3-4), 205-227.
- [27] Yaghmaei-Sabegh, S., & Tsang, H. H. (2011). A new site classification approach based on neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 974-981.
- [28] Yaghmaei-Sabegh, S., & Tsang, H. H. (2014). Site class mapping based on earthquake ground motion data recorded by regional seismographic network. *Natural hazards*, 73(3), 2067-2087.
- [29] Di Alessandro, C., Bonilla, L. F., Boore, D. M., Rovelli, A., & Scotti, O. (2012). Predominant-period site classification for response spectra prediction equations in Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 680-695.
- [30] Nakamura, Y. (2000, January). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (Vol. 24, pp. 25-30). New Zealand: Auckland.
- [31] Lunedei, E., & Albarello, D. (2010). Theoretical HVSR curves from full wavefield modelling of ambient vibrations in a weakly dissipative layered Earth. *Geophysical Journal International*, 181(2), 1093-1108.
- [32] Kobayashi, H. (1973). Preliminary report on the ambient noise measurements in Thessaloniki. UNDP/SF. REM, 70-172.
- [33] Scherbaum, F., Riepl, J., Bettig, B., Ohnberger, M., Cornou, C., Cotton, F., & Bard, P. Y. (1999). Dense array measurements of ambient vibrations in the Grenoble basin to study local site effects. *EOS, Transactions, AGU*, 80(46), F707.
- [34] Diagourtas, D., Tzani, A., & Makropoulos, K. (2002). Comparative study of microtremor analysis methods. In *Earthquake Microzoning* (pp. 2463-2479). Birkhäuser, Basel.
- [35] Bonilla, L. F., Steidl, J. H., Lindley, G. T., Tumarkin, A. G., & Archuleta, R. J. (1997). Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 710-730.
- [36] Iranian Code 626. (2013), ".Guideline for Seismic Hazard Analysis", Vice- President Strategic Planning and Oversight.
- [37] R. Emami, R. Rezaei, M. Rezapour, (2014). Determination of Empirical Distance Attenuation and the Local-Magnitude Scale for Northwest Iran with JHD Technique, *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 23(92), 85.
- [38] Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological research letters*, 68(1), 94-127.
- [39] Ferreira, C. (2002). Gene expression programming in problem solving. In *Soft computing and industry* (pp. 635-653). Springer, London.
- [40] Ferreira, C. (2006). *Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence* (Vol. 21). Springer.
- [41] Mansouri, I., Güneysi, E. M., & Mosalam, K. M. (2021). Improved shear strength model for exterior reinforced concrete beam-column joints using gene expression programming. *Engineering Structures*, 228, 111563.
- [42] Samui, P. (2021). Application of Soft Computing in Geotechnical Earthquake Engineering. In *Latest Developments in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (pp. 443-453). Springer, Singapore.
- [43] Gharehbaghi, S., Gandomi, M., Plevris, V., & Gandomi, A. H. (2021). Prediction of seismic damage spectra using computational intelligence methods. *Computers & Structures*, 253, 106584.
- [44] Ghodrati Amiri, G., & Zahedi, M., & Gholami, S., & Mahdavian, A. (2004). Appropriate frequency band for correcting Iranian accelerograms in different site conditions. *Journal of Faculty of Engineering* (University of Tehran), 38(2 (84)), 231-249.
- [45] Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800. 4th Edition, Building and Housing Research Center (In Persian).
- [46] Ghayamghamian, M. R., & Nojavan, A. R. (2008). A new site classification system based on strong motion analysis in Iran. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV* (pp. 1-12).
- [47] UBC (1997) Uniform Building Code, International Conference of Building Officials. Whittier, California, USA
- [48] Komak Panah, A., Hafezi Moghaddas, N., Ghayamghamian, M. R., Motosaka, M., Jafari, M. K., & Uromieh, A. (2002). Site effect classification in East-Central of Iran. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 4(1), 37-46.
- [49] Sinaian F., (2006), PhD Thesis: "*Research on Strong Earth Motion in Iran (from Catalog to Reduction Relations)*", International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.