

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

تعیین نوع خاک منطقه با استفاده از نسبت‌های مؤلفه‌ی قائم و افقی زلزله

نگارنده: ایمان خزاعی

استاد راهنما

دکتر محمد شامخی امیری

استاد مشاور

دکتر امیر بذرافشان مقدم

تیر ۱۳۹۹

تقدیم به

مادر و پدر فداکار، دلسوز و مهربانم و همه‌ی کسانی که دوستشان دارم.

سپاسگزاری

خداوند بزرگ را سپاسگزارم که در مسیر انجام این پایان نامه یاورم بود. از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمد شامخی امیری و استاد مشاور گران قدرم جناب آقای دکتر امیر بذرافشان مقدم نهایت تشکر و قدردانی را دارم که همواره با راهنمایی های ارزشمندشان به من یاری رساندند تا پایان نامه ی حاضر را به سرانجام برسانم. بدون شک بدون حضور ایشان این پژوهش به ثمر نمی رسید. پروردگار را شاکرم که فرصت یادگیری در حضورشان را برای اینجانب فراهم نمود. از داوران محترم، آقایان دکتر محسن کرامتی و دکتر فرنوش باسلیقه متشکرم که داوری این پایان نامه را قبول کردند تا با نظرات ارزشمند خود، نواقص این کار کاهش پیدا کند.

از دوست خوبم علی توسلیان و برادر عزیزم آرمان خزاعی که همراه و یاری گرم بودند صمیمانه تشکر می کنم.

در پایان از خانواده ی دلسوزم برای تمام حمایت هایشان سپاسگزارم و امیدوارم روزی قادر به جبران زحماتشان باشم.

تعهد نامه

اینجانب ایمان خزاعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان تعیین نوع خاک منطقه با استفاده از نسبت های مؤلفه ی قائم و افقی زلزله تحت راهنمایی دکتر محمد شامخی امیری متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

ایمان خزاعی

تیر ۱۳۹۹

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

زمین‌لرزه از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که همواره جوامع انسانی را از لحاظ مالی و جانی تهدید می‌کند. ایران از کشورهای زلزله‌خیز دنیا به شمار می‌آید به‌طوری که سالانه زلزله‌های کوچک تا متوسط زیادی و هر ده سال یک زلزله‌ی بزرگ را تجربه می‌کند. به دلیل وضعیت لرزه زمین‌ساخت و موقعیت خاص جغرافیایی و اقلیمی، کشور ایران پتانسیل ایجاد زمین لرزه‌های متعدد و شدید را داراست. بنابراین مطالعات لرزه‌خیزی و شرایط ساختگاهی لازم و ضروری است. ارزیابی کلی از خسارات وارده به سازه‌ها و تأسیسات در زلزله‌ها نشان می‌دهد شرایط ساختگاهی تأثیر قابل توجهی بر نحوه‌ی توزیع خرابی‌ها در شهرها و روستاها داشته است. لذا شناسایی اثر ساختگاه، نوع خاک و میزان تأثیرگذاری آن روی امواج زلزله در طراحی و ساخت سازه‌های مقاوم امری ضروری به شمار می‌آید. تعیین نوع خاک در منطقه‌ی ثبت لرزه‌ها کاری پرحجم و دارای هزینه‌ی بسیار است. هدف از این پژوهش، پیش‌بینی رابطه‌ای برای تعیین سرعت موج برشی زلزله با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) و تعیین نوع خاک منطقه با استفاده از روش نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) 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 پژوهش بزرگای گشتاوری به عنوان بزرگا و فاصله‌ی کانونی به عنوان فاصله‌ی منبع زلزله تا ساختگاه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

اولین گام تحقیق، جمع‌آوری داده‌های شتاب‌نگاری است که ۴۸۰ شتاب‌نگاشت مورد استفاده قرار گرفت و اصلاحات مورد نیاز روی این داده‌ها صورت گرفته و سپس پارامترهای ورودی مورد اشاره برای تعیین رابطه‌ی سرعت موج برشی از آن استخراج شده است. پس از آماده‌سازی کاتالوگ زلزله، در نهایت برای به دست

آوردن رابطه‌ی پیش‌بینی از روش هوشمند الگوریتم توسعه‌ی ژنی استفاده شده است. مزیت این الگوریتم این است که از مدل رگرسیونی ثابتی استفاده نشده است و مدل به صورت هوشمند محاسبه می‌گردد. نتایج محاسباتی دارای برازندگی $911/57$ بوده و مطابقت 73 درصدی با مقادیر پیش‌بینی شده دارند که در مقایسه با روش دقیق یعنی کارهای آزمایشگاهی، سریع‌تر، در دسترس و با هزینه‌ی بسیار کمتر، آگاهی مناسبی از وضعیت خاک منطقه در اختیار قرار می‌دهد.

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

فهرست

چکیده	ز
فهرست	ط
فهرست مطالب	ط
فهرست اشکال	ن
فهرست جداول	ف

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تعریف مساله	۳
۱-۲- ضرورت انجام پژوهش	۴
۱-۳- اهداف پایان نامه	۶
۱-۴- روش تحقیق	۶
۱-۵- ساختار پایان نامه	۶
فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین	۹

۱-۲-۱- مقدمه	۱۰
۲-۲-۲- روش وابسته به ساختگاه مرجع	۱۲
۳-۲-۳- روش مستقل از ساختگاه مرجع	۱۵
۲-۳-۱- روش نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (HVSr)	۱۶
۲-۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی HVSr	۱۷
۳-۳-۲- نحوه‌ی محاسبه‌ی نسبت طیفی H/V	۲۰
۲-۳-۳-۱- روش‌های محاسبه‌ی میانگین مؤلفه‌ی افقی	۲۰
۴-۲- پژوهش‌های انجام شده با روش H/V در ایران	۲۶
۲-۴-۱- طبقه‌بندی ساختگاه‌ها به همراه دسته‌بندی آن‌ها	۲۷
فصل سوم: روش تحقیق	۴۱
۱-۳-۱- مقدمه	۴۲
۲-۳-۲- تصحیح شتاب‌نگاشت	۴۳
۳-۳-۳- پارامترهای محتوای فرکانس	۴۴
۱-۳-۳-۱- طیف حرکت زمین	۴۴
۱-۳-۳-۱-۱- طیف فوریه	۴۴
۱-۳-۳-۲- طیف توان	۴۴
۱-۳-۳-۳- طیف پاسخ	۴۴
۴-۳-۴- بزرگا	۴۷

۴۹	۳-۵- فاصله (R)
۵۰	۳-۶- پریود زلزله (T)
۵۰	۳-۷- نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V)
۵۲	۳-۸- الگوریتم ژنتیک
۵۲	۳-۹- تعریف بهینه‌یابی
۵۳	۳-۹-۱- بهینه‌یابی با الهام‌گیری از طبیعت
۵۵	۳-۱۰- تاریخچه‌ی تکامل الگوریتم ژنتیک
۵۷	۳-۱۱- مفاهیم اولیه‌ی الگوریتم توسعه ژنی
۵۹	۳-۱۲- الگوریتم توسعه ژنی
۶۲	۳-۱۲-۱- ژنوم
۶۲	۳-۱۲-۲- خواندن آزاد چارچوب‌ها و ژن‌ها
۶۶	۳-۱۲-۳- ژن‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی
۷۰	۳-۱۲-۴- کروموزوم‌های چند ژنی
۷۲	۳-۱۲-۵- فنوتیپ و درختان توسعه
۷۲	۳-۱۲-۵-۱- اطلاعات کدگذاری، ترجمه
۷۲	۳-۱۲-۵-۲- تعاملات در زیر درختان توسعه
۷۷	۳-۱۲-۶- توابع برازندگی و انتخاب آن
۷۷	۳-۱۲-۶-۱- توابع برازندگی

۷۷	 ۳-۱۲-۶-۲- انتخاب
۸۰	 ۳-۱۲-۷- تولید با اصلاح
۸۰	 ۳-۱۲-۷-۱- تکرار
۸۰	 ۳-۱۲-۷-۲- جهش
۸۳	 ۳-۱۲-۷-۳- انتقال و قراردادن اعضا به دنبال هم
۸۴	 ۳-۱۲-۷-۳-۱- اعضای IS
۸۵	 ۳-۱۲-۷-۳-۲- اعضای RIS
۸۷	 ۳-۱۲-۷-۳-۳- انتقال ژن
۸۷	 ۳-۱۲-۷-۴- نوترکیبی
۸۸	 ۳-۱۲-۷-۴-۱- نوترکیبی یک نقطه‌ای
۸۹	 ۳-۱۲-۷-۴-۲- نوترکیبی دو نقطه‌ای
۹۰	 ۳-۱۲-۷-۴-۳- نوترکیبی ژنی
۹۳	 فصل چهارم: یافته‌های پژوهش و آنالیز داده‌ها
۹۴	 ۴-۱- مقدمه
۹۴	 ۴-۲- داده‌های شتابنگاری
۹۵	 ۴-۲-۱- مشخصات بانک اطلاعات
۹۸	 ۴-۳- روش انجام کار
۹۸	 ۴-۳-۱- استخراج متغیرهای مورد نیاز از داده‌ها

۱۰۱	۴-۳-۲- رگرسیون گیری به روش الگوریتم توسعه‌ی ژنی
۱۰۲	۴-۳-۲-۱- تنظیمات مربوط به الگوریتم توسعه‌ی ژنی
۱۰۳	۴-۳-۲-۱-۱- داده‌های آموزشی و آزمایشی
۱۰۳	۴-۳-۲-۱-۲- تعیین تابع برازندگی
۱۰۴	۴-۴- ارائه‌ی رابطه
۱۰۶	۴-۵- بررسی مدل ارائه شده
۱۰۸	۴-۶- بررسی نتایج معیارهای طبقه‌بندی خاک
۱۲۳	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۲۴	۵-۱- مقدمه
۱۲۴	۵-۲- نتیجه‌گیری
۱۲۵	۵-۳- پیشنهادها
۱۲۲	مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): ساختگاه مرجع حالت زیرسطحی ۱۴
- شکل (۲-۲): ساختگاه مرجع حالت روسطحی ۱۵
- شکل (۳-۲): مدل ساده‌ی فرض شده توسط ناکامورا ۱۹۸۹ برای تفسیر میکروترموها ۲۱
- شکل (۱-۳): اشباع شدگی انواع مختلف بزرگا ۴۸
- شکل (۲-۳): مقایسه‌ی انواع فواصل تعریف شده‌ی چشمه‌ی لرزه‌زا نسبت به ساختگاه ۴۹
- شکل (۳-۳): فلوچارت الگوریتم توسعه‌ی ژنی ۶۱
- شکل (۴-۳): درخت توسعه معادله (۸-۳) ۶۳
- شکل (۵-۳): ژن معادله (۸-۳) ۶۴
- شکل (۶-۳): ژن معادله K-expressions ۶۴
- شکل (۷-۳): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۴-۳) ۶۵
- شکل (۸-۳): ژن با طول ژن ۲۱، طول سر ۱۵ و طول دم ۱۱ ۶۶
- شکل (۹-۳): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۸-۳) ۶۷
- شکل (۱۰-۳): ژن جدید ایجاد شده از ژن شکل (۸-۳) ۶۷
- شکل (۱۱-۳): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۱۰-۳) ۶۸
- شکل (۱۲-۳): ژن جدید ایجاد شده از ژن شکل (۶-۳) ۶۸
- شکل (۱۳-۳): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۱۲-۳) ۶۹

- شکل (۳-۱۴): ژن جدید ایجاد شده از ژن شکل (۳-۸) ۶۹
- شکل (۳-۱۵): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۳-۱۴) ۷۰
- شکل (۳-۱۶): کروموزوم تشکیل شده از ۳ ژن ۷۱
- شکل (۳-۱۷): درخت توسعه‌ی ژن‌های شکل (۳-۱۶) ۷۱
- شکل (۳-۱۷): کروموزوم ۲ ژنی ۷۴
- شکل (۳-۱۸): (الف) درخت توسعه‌ی هر کدام از ژن‌ها (ب) درخت توسعه نهایی بعد از ترجمه و استفاده از تابع اتصال جمع ۷۴
- شکل (۳-۱۹): K-expression درخت توسعه‌ی شکل (۳-۱۸) (ب) ۷۵
- شکل (۳-۲۰): کروموزوم بولی ۳ ژنی ۷۵
- شکل (۳-۲۱): درخت توسعه‌ی هر کدام از ژن‌ها ۷۶
- شکل (۳-۲۲): درخت توسعه‌ی نهایی بعد از ترجمه و استفاده از تابع اتصال جمع ۷۶
- شکل (۳-۲۳): K-expression درخت توسعه‌ی شکل (۳-۲۲) ۷۷
- شکل (۳-۲۴): کروموزوم ۳ ژنی ۸۲
- شکل (۳-۲۵): کروموزوم جهش‌یافته کروموزوم شکل (۳-۲۴) ۸۲
- شکل (۳-۲۶): کروموزوم ۲ ژنی ۸۴
- شکل (۳-۲۷): کروموزوم ۲ ژنی تغییر یافته ۸۵
- شکل (۳-۲۸): کروموزوم ۲ ژنی ۸۶
- شکل (۳-۲۹): کروموزوم ۲ ژنی تغییر یافته ۸۶
- شکل (۳-۳۰): کروموزوم ۳ ژنی ۸۷
- شکل (۳-۳۱): کروموزوم ۳ ژنی تغییر یافته ۸۷

- شکل (۳-۳۲): کروموزوم‌های ۲ ژنی پدر و مادر ۸۸
- شکل (۳-۳۳): کروموزوم‌های جدید ایجاد شده ۸۸
- شکل (۳-۳۴): کروموزوم‌های ۲ ژنی پدر و مادر ۸۹
- شکل (۳-۳۵): کروموزوم‌های جدید ایجاد شده ۹۰
- شکل (۳-۳۶): کروموزوم‌های ۳ ژنی پدر و مادر ۹۱
- شکل (۳-۳۷): کروموزوم‌های جدید ایجاد شده ۹۱
- شکل (۴-۱): نمودار پراکندگی بزرگا برحسب فاصله ۹۵
- شکل (۴-۲): نمودار پراکندگی بزرگا برحسب سرعت موج برشی ۹۶
- شکل (۴-۳): نمودار تعداد رکوردها برحسب بزرگا ۹۷
- شکل (۴-۴): نمودار تعداد رکوردها برحسب فاصله ۹۷
- شکل (۴-۵): درخت توسعه‌ی مربوط به رابطه‌ی سرعت موج برشی ۱۰۵
- شکل (۴-۶): نمودار نوع خاک براساس تعداد رکوردها ۱۰۷
- شکل (۴-۷): نمودار مقایسه‌ی سرعت موج برشی رکوردها ۱۰۷
- شکل (۴-۸): نمودار مقایسه‌ی مطابقت ساختگاه براساس تعداد رکورد طبق هر یک از روش‌ها ۱۲۱
- شکل (۴-۹): درصد موفقیت هریک از روش‌ها در تخمین رده‌ی ساختگاه ۱۲۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): چهار کلاس مورد نظر برای طبقه‌بندی سایت ۳۱
- جدول (۲-۲): طبقه‌بندی خاک با توجه به پریود غالب و سرعت موج برشی ۳۲
- جدول (۳-۲): طبقه‌بندی نوع زمین براساس آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) ۳۴
- جدول (۴-۲): طبقه‌بندی براساس UBC 1997 ۳۵
- جدول (۵-۲): طبقه‌بندی براساس Komak Panah et al ۳۶
- جدول (۶-۲): طبقه‌بندی براساس سینائیان ۳۷
- جدول (۷-۲): طبقه‌بندی براساس NEHRP ۳۹
- جدول (۱-۳): محدوده‌ی مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها ۴۴
- جدول (۱-۴): نمونه‌ای از جدول تشکیل شده برای هر رکورد زلزله ۹۹
- جدول (۲-۴): نمونه‌ای از جدول تشکیل شده برای داده‌ها ۱۰۰
- جدول (۳-۴): نمونه‌ای از جدول ورودی به نرم‌افزار الگوریتم توسعه‌ی ژنی ۱۰۱
- جدول (۴-۴): تنظیمات در نظر گرفته برای استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی ۱۰۲
- جدول (۵-۴): روش‌های تخمین ساختگاه براساس زارع و همکاران، قائم‌مقامیان و نوجوان، کمک پناه و همکاران، سینائیان، آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، UBC 1997 و NEHRP ۱۰۹

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه از زلزله به عنوان یکی از مخرب‌ترین عوامل طبیعی که باعث آسیب دیدن سازه‌های دست بشر می‌گردد، یاد می‌شود. اگر چه در مورد علل اصلی ایجاد زلزله فرضیات مختلفی وجود داشته و هنوز قطعیت آنها به اثبات نرسیده است، ولی با پیشرفت علم و به ویژه علوم مهندسی زلزله، با ثبت حرکات لرزه‌ای زمین در اثر زلزله‌های به وجود آمده و بررسی خرابی‌های ایجاد شده در سازه‌های مختلف، اطلاعات زیادی در مورد چگونگی عملکرد امواج زلزله، نحوه رفتار سازه‌ها در برابر زلزله، راه‌های پیشگیری و یا کاهش خسارات ناشی از زلزله در دسترس می‌باشد که با وقوع زلزله‌های جدیدتر و نیز از طریق انجام پروژه‌های تحقیقاتی در زمینه مهندسی زلزله بر حجم و دقت این اطلاعات همواره افزوده می‌گردد.

زمین‌شناسی محلی ساختگاه می‌تواند بر جنبش نیرومند زمین تأثیر بگذارد و ناشناخته بودن اثر ساختگاه در پارامترهای زلزله، از جمله عوامل مهم در ایجاد خرابی‌ها می‌باشد. از آن جمله می‌توان به زلزله‌های سال ۱۹۰۶ در سانفرانسیسکو، ۱۹۸۵ در میچوکان مکزیک، ۱۹۸۸ در ارمنستان، ۱۹۸۹ در لوماپریتا، ۱۹۴۴ در نرتریج، ۱۹۹۵ در کوبه‌ی ژاپن، ۱۹۹۹ در ترکیه و ۱۹۹۹ در چی‌چی تایوان، اشاره کرد. لرمو و چاوزگارسیا (۱۹۹۳) نیز عنوان کردند که در محل‌های دارای خاک نرم، اثر ساختگاه حتی در زلزله‌های میدان نزدیک نسبت به سایر عوامل از اهمیت بیشتری برخوردار است (Lermo and Chavez-Garcia, 1993). پاسخ ساختگاه در حقیقت اثر صدها متر سنگ و خاک و نیز توپوگرافی سطحی می‌باشد. ستون خاک مانند یک فیلتر با مشخصات وابسته به کرنش عمل می‌کند که بسته به ضخامت خاک، مشخصات فیزیکی و زمین-شناسی ساختگاه، در باند فرکانس باریکی، مدت تداوم زلزله و بزرگای زلزله را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Hays, 1986). تشخیص بزرگنمایی یا کوچکنمایی حرکت لرزه‌ای زمین وابسته به زمین‌شناسی سطحی، نه تنها در مطالعات ریزپهنه‌بندی بلکه در مطالعات مربوط به بازیابی پارامترهای منبع و کاهندگی از اهمیت

بالایی برخوردار است. به همین دلیل در چند دهه‌ی اخیر، ارزیابی اثرات ساختگاه در رابطه با زمین‌شناسی سطحی و توپوگرافی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است و ضروری به نظر می‌رسد که روش‌های ایجاد شده در درجه‌ی اول ساختگاه‌های مستعد به بزرگنمایی را تعیین نموده و سپس این پدیده را کمی کنند. مایلن (۱۹۹۸) برای نخستین بار اظهار کرد که حرکت لرزه‌های زمین به واسطه‌ی لایه‌های آبرفتی در نزدیکی سطح زمین دستخوش بزرگنمایی می‌شود (Milne, 1898). اولین گزارش نیز در مورد اثر شرایط ساختگاهی بر روی پارامترهای حرکت لرزه‌ای سطح زمین توسط وود (۱۹۰۸) صورت گرفت (Wood, 1908). اظهارات وی بر مبنای مطالعه‌ی توزیع تخریب‌های ناشی از زمین‌لرزه‌ی سانفرانسیسکو در سال ۱۹۰۶ بوده است. سید و همکاران (۱۹۷۶) نیز اولین تحقیقات و مطالعات کمی را درباره‌ی چگونگی تأثیر شرایط ساختگاه بر طیف پاسخ، انجام دادند (Seed et al., 1976). در این میان آکی (۱۹۸۸، ۱۹۹۳) و فین (۱۹۹۱) درباره‌ی اثرات ساختگاهی مطالعه و تحقیق کردند. سپس بر روی تحقیقات صورت گرفته، بازنگری انجام شد (aki, 1988, 1993; Finn, 1991).

۱-۲- تعریف مسأله

از لحاظ مهندسی امواج زلزله با سه مشخصه PGA، محتوای فرکانسی و زمان تداوم لرزش مورد مطالعه قرار می‌گیرد، که این مشخصات را می‌توان مستقیماً از شتاب‌نگاشت‌های به‌دست آمده در اثر این امواج استخراج نمود. حال تأثیر ساختگاه عبارت است از تغییر این مشخصات در اثر وجود لایه‌های آبرفتی بر روی سنگ بستر. این پدیده به لحاظ رفتار دینامیکی آبرفت ایجاد می‌شود که این رفتار نیز از عوامل مختلفی نظیر خصوصیات دینامیکی لایه‌ها، موقعیت و شکل هندسی لایه‌ها، توپوگرافی زیرسطحی و روسطحی، موقعیت سنگ بستر یا عمق آبرفت و غیره متأثر می‌باشد. طیف دامنه فوریه (FAS) در میان دیگر پارامترهای حرکت

زمین، بیشترین کاربرد را در پیش‌بینی حرکت قوی زمین و تخمین خطر لرزه‌ای دارد. با داشتن طیف دامنه‌ی فوری می‌توان پارامترهای حرکت زمین را (شتاب حداکثر زمین و بزرگنمایی طیف پاسخ)، با استفاده از شیوه‌ی تصادفی محاسبه نمود.

با توجه به اثر ساختگاه بر امواج زلزله، پاسخ جنبش نیرومند زمین در نقاط مختلف شهر، بسته به مشخصات زمین‌شناسی محلی می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین ارائه‌ی پهنه‌بندی لرزه‌ای برای کل کشور در مطالعات تحلیل خطر تفصیلی کفایت نمی‌کند و نیاز به ایجاد نقشه‌های ریزپهنه‌بندی می‌باشد (B. A. Schell et al., 1978). نقشه‌های ریزپهنه‌بندی جهت مطالعات تحلیل خطر ویژه‌ی ساختگاه که در ساختمان‌ها و سازه‌های با اهمیت بالا ضروری می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله‌ی این سازه‌ها می‌توان به نیروگاه‌های هسته‌ای، پل‌ها، متروها، بزرگراه‌های مرتفع، قطارهای هوایی و سدها اشاره نمود. مشخصات دینامیکی ساختگاه از قبیل مقادیر پی‌ریز غالب، ضریب بزرگنمایی، سرعت موج برشی و تست نفوذ استاندارد به منظور ایجاد نقشه‌های ریزپهنه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان دو مشخصه‌ی سرعت موج برشی و تست نفوذ استاندارد عموماً پرهزینه بوده و جهت اندازه‌گیری در تعداد زیادی ساختگاه (جهت ریزپهنه‌بندی) مناسب نمی‌باشند. از این رو اغلب از روش‌های تجربی جهت تخمین پارامترهای ساختگاه و در نتیجه رده‌بندی آن استفاده می‌گردد. از جمله‌ی این روش‌ها روش نسبت طیفی H/V نام دارد که توسط نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۷۰، ۱۹۷۱) مطرح شد (Nogoshi and Igarashi, 1970, 1971). سپس توسط ناکامورا (۱۹۸۹) گسترش بیشتری پیدا کرد و برای بزرگنمایی امواج رایله به کار گرفته شد (Nakamura, 1989). از مزایای این روش صرف هزینه و زمان کمتر به دلیل عدم نیاز به ایستگاه مرجع می‌باشد.

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

با توجه به نتایج زلزله‌های مخرب گذشته ثابت شده است که میزان تخریب ناشی از زلزله در یک سایت شدیداً تحت تاثیر اثرات ساختگاهی می‌باشد و در تمام زلزله‌های مخرب اخیر، نشانه‌های متعدد در نقش اثرات ساختگاهی بر حرکت قوی زمین مشهود است. به طور کلی ایمنی در برابر زلزله دارای دو جنبه است که عبارتند از ایمنی سازه در برابر نیروهای مخرب دینامیکی ناشی از زلزله و ثانیاً ایمنی ساختگاه در ارتباط با پدیده‌های ژئوتکنیکی مرتبط با زلزله همانند تشدید، زمین لغزش و روانگرایی. تأثیر رسوب بر حرکت قوی زمین و اعمال تغییردرآن باعث شده است که بعضی از محققین در ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله، شرایط خاک محل را در درجه‌ی اول اهمیت قرار دهند. همچنین در سال‌های اخیر اهمیت ایمنی ساختگاه در برابر خطرات زلزله به میزان فزاینده‌ای مورد توجه محققین، مهندسين و کاربران اراضی در نواحی زلزله خیز واقع شده است. این مسئله با مشاهده‌های صورت گرفته در زلزله‌های مخرب اخیر و همچنین با آگاهی از این نکته که بسیاری از شهرهای پر جمعیت در معرض ریسک ناشی از مخاطرات ژئوتکنیکی مرتبط با زلزله‌های احتمالی قرار گرفته اند، اهمیت بیشتری یافته است. بنابراین ارزیابی اثرات ساختگاهی یکی از پارامترهای کلیدی است که باید در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، پیشگیری از وقوع خسارات شدید ناشی از اثرات ثانویه زلزله و حذف یا کاهش خطرات ناشی از زلزله مورد توجه قرار گیرد.

از طرف دیگر از مدت‌ها پیش دریافته شده بود که انواع خاک در هنگام رویداد زمین‌لرزه، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند و غالباً خاک‌های جوان‌تر و نرم‌تر نسبت به خاک‌های مسن‌تر و سخت‌تر و همچنین سنگ کف، اثر بزرگنمایی بیشتری بر دامنه‌ی جنبش زمین دارند. یکی از اهداف زلزله‌شناسی مهندسی تعیین و اندازه‌گیری این اثر و اعمال آن در مطالعات ریزپهنه‌بندی و توسعه‌ی روابط کاهندگی در مناطق لرزه‌خیز است. امروزه این مطالعات از جمله استانداردهای مورد نیاز مطالعات ریزپهنه‌بندی و مطالعات ساختگاهی تأسیسات مهم به شمار می‌رود. از طرف دیگر متأسفانه در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای و ژئوتکنیکی

کشور، اشاره‌ی مختصری به تأثیر زیاد اثر ساختگاه بر تغییر رفتار بستر گردیده و صرفاً بر اساس متوسطی از مشخصات مکانیکی لایه‌های آبرفتی، رفتار بستر در قالب ۴ نوع تیپ خاک مختلف گنجانیده شده است.

۱-۴- اهداف پایان‌نامه

هدف از این پژوهش، ارائه‌ی رابطه‌ای برای تعیین سرعت موج برشی خاک با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) و روش نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) است.

۱-۵- روش تحقیق

برای به دست آوردن رابطه‌ی سرعت موج برشی اولین گام جمع‌آوری داده‌های شتابنگاری است، بدین منظور ۴۸۰ داده‌ی شتابنگاری جمع‌آوری شده است. اصلاحات مورد نیاز بر روی این داده‌ها صورت گرفته و سپس پارامترهای ورودی برای این رابطه از آن استخراج گردیده است. در انتها برای به دست آوردن رابطه‌ی سرعت موج برشی از روش هوشمند الگوریتم توسعه ژنی استفاده شده است.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

در فصل اول مقدمه‌ای از این پژوهش ارائه شده است که در آن به ضرورت انجام پژوهش و همچنین اهداف مورد نظر پرداخته شده است.

در فصل دوم به روش‌های تعیین اثر ساختگاهی و تاریخچه‌ی روش نسبت طیفی H/V پرداخته شده است. هم‌چنین روش‌های مختلف طبقه‌بندی ساختگاه مورد بررسی قرار گرفت.

فصل سوم در مورد روش انجام پژوهش می‌باشد که در ابتدا به توضیحاتی در مورد طیف و متغیرهای مورد نیاز برای ارائه‌ی سرعت موج برشی پرداخته شد و سپس به طور کامل الگوریتم توسعه‌ی ژنی مورد بررسی قرار گرفت.

در فصل چهارم روش انجام پژوهش و کارهای انجام شده توضیح داده شده است. سپس یافته‌های پژوهش ارائه و در مورد آن بحث گردید. در انتهای فصل چهارم به مقایسه‌ی رابطه‌ی ارائه شده بر اساس طبقه‌بندی محققان دیگر برای ساختگاه و نرخ موفقیت آن‌ها پرداخته شده است.

فصل پنجم مربوط به ارائه‌ی نتایج پژوهش و پیشنهادها می‌باشد که در ابتدا نتایج حاصل از این پژوهش و سپس پیشنهادها برای کارهای آینده بیان شده است.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مقدمه

ارزیابی کلی از خسارات وارده به سازه و تأسیسات در زلزله‌ها نشان می‌دهد که شرایط ساختگاهی تأثیر قابل توجهی بر نحوه توزیع خرابی‌ها در شهرها و روستاها داشته است. ارزیابی تأثیر لایه‌بندی خاک در مشخصات زمین‌لرزه در سطح زمین از لحاظ شتاب حداکثر و جابه‌جایی‌ها و محتوای فرکانسی یکی از موارد مهمی است که مورد توجه زلزله‌شناسان است.

مطالعه‌ی پراکندگی خسارت در زلزله‌های مختلف مبین اهمیت تأثیر ساختگاه بر مشخصات زمین‌لرزه می‌باشد. در زلزله‌ی سال ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی با بزرگای $M_s = 8.1$ تنها خرابی مختصر و معمولی در محل کانونی خود (نزدیک ساحل پاسیفیک مکزیک) ایجاد کرد، اما سبب خرابی زیاد و گسترده‌ای در فاصله‌ی ۳۵۰ کیلومتری شهر مکزیکوسیتی گردید که با مطالعه‌ی رکوردهای حرکت زمین در ساختگاه‌های مختلف مکزیکوسیتی رابطه‌ی مهم خرابی ناشی از حرکت زمین را با شرایط و لایه‌بندی خاک را نشان داد. شرایط ساختگاهی بر کلیه‌ی خصوصیات مهم زلزله شامل دامنه، محتوای فرکانسی و مدت، اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. به عبارتی خصوصیات یک زلزله با توجه به مشخصات فیزیکی و دینامیکی ساختگاه می‌تواند در فرکانس‌های مشخصی تشدید و یا تضعیف گردد. میزان تأثیرگذاری، تابع هندسه، خواص مصالح لایه‌های زیر سطحی، توپوگرافی ساختگاه و خصوصیات حرکت ورودی می‌باشد.

در واقع امواج زلزله در هنگام انتشار از سنگ بستر به سطح زمین تحت تأثیر خصوصیات دینامیکی آبرفت در فرکانسهای خاص تقویت و یا تضعیف می‌شود که در صورت برابری این فرکانس با فرکانس طبیعی سازه پدیده تشدید رخ می‌دهد که باعث افزایش تخریب سازه می‌شود. لایه‌های رسوبی در سطح زمین به طور قابل ملاحظه‌ای حرکات ناشی از زمین‌لرزه را تقویت می‌کنند که این پدیده به نام اثر ساختگاهی مطرح است. جنبش نیرومند زمین می‌تواند حتی در فاصله‌ای بسیار اندک تغییرات زیادی داشته باشد (Boatwrigth et al., 1991). روش‌های مختلفی برای تعیین اثر ساختگاهی به کار گرفته شده‌اند که هم

برای مطالعات ریز پهنه‌بندی و هم جهت بررسی خطر زمین‌لرزه برای سازه‌های خاص به کار گرفته می‌شوند (Ghayamghamian, 1997). این اثر نخستین بار در سال ۱۹۷۵ در زلزله‌ی سانفرانسیسکو توسط سید و همکاران (۱۹۷۲) مورد توجه قرار گرفت (Seed et al., 1972). مطالعات این محققین دلالت بر اهمیت اثر لایه‌های خاک بر محتوای فرکانسی حرکات توانمند زمین و بیشینه‌ی شتاب آن داشت. مشخصات سیستم خاک با استفاده از سیگنال‌های ثبت شده، در حوزه‌ی زمان و فرکانس قابل بررسی است. در مطالعات مهندسی زلزله، تخمین اثر ساختگاه در حوزه‌ی فرکانس به دلیل سادگی روش و تسریع در محاسبه از اهمیت خاصی برخوردار است. روش‌های موجود در ارزیابی اثرات ساختگاهی را می‌توان به دو دسته‌ی تجربی و تئوری تقسیم نمود. روش تجربی مبتنی بر رکوردها و اندازه‌گیری‌های حرکت زمین می‌باشد، در حالی که روش تئوری بر پایه اطلاعات ژئوتکنیکی موجود استوار است که عمدتاً با روش‌های عددی صورت می‌گیرد. اگر چه در دهه‌ی هفتاد و اوایل دهه‌ی هشتاد توجه خاصی به پیشبرد روش‌های عددی وجود داشت اما در سال‌های اخیر این مسئله کمی تعدیل شده است و تحقیقات بسیاری بر روی روش‌های آنالیز رکوردهای ثبت شده انجام گرفته است که همچنان نیز ادامه دارد. باید توجه نمود که هر کدام از این روش‌ها به نوبه‌ی خود دارای مزایا و معایبی می‌باشند. به عنوان مثال مدل‌سازی تئوری امکان ارزیابی اهمیت پارامترهای مختلف و محاسبه‌ی نتایج را برای تعداد زیادی حرکت ورودی امکان‌پذیر می‌سازد. از سوی دیگر این روش نیازمند مطالعات ژئوتکنیکی دقیق برای هر ساختگاه و همچنین استفاده از روش‌های محاسباتی مناسب است. در عوض با استفاده از روش‌های تجربی که بر پایه‌ی ثبت حرکات قوی یا ضعیف زمین در نواحی با خواص زمین‌شناسی سطحی مختلف قرار دارند، می‌توان اختلاف پاسخ در نواحی با خاک نرم را نسبت به نواحی قرار گرفته بر سنگ به‌دست آورد. استفاده از این روش در سال‌های اخیر به‌خصوص در نواحی با لرزه‌خیزی بالا که امکان ثبت زلزله‌های کوچک در بازه‌ی زمانی معقولی وجود دارد، بسیار فراگیر شده است. از طرفی در نواحی با لرزه‌خیزی متوسط و پایین ثبت تعداد مناسبی از زلزله‌ها امکان‌پذیر نیست

و به علاوه تهیه‌ی رکوردهایی که به طور همزمان در ایستگاه‌های قرار گرفته بر خاک و سنگ بستر ثبت شده باشند، مشکل است. بنابراین به عنوان یک ابزار معادل می‌توان از اندازه‌گیری (در لرزش‌های با پریود کوتاه) و یا لرزه‌های خفیف (در محدوده‌ی پریودهای بزرگتر از ۲ ثانیه) نامیده می‌شوند. روش‌های تعیین اثر ساختگاهی بر اساس روش‌های تجربی در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- روش وابسته به ساختگاه مرجع

۲- روش مستقل از ساختگاه مرجع

۲-۲- روش وابسته به ساختگاه مرجع

روش ساختگاه مرجع یا نسبت طیفی استاندارد (SSR)^۱ برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط بروچرت ارائه شد (Borcherdt, 1970). در بررسی اثر ساختگاهی، یکی از روش‌های معمول، استناد به ساختگاه سنگی به عنوان ساختگاه مرجع می‌باشد تا با حذف اثر چشمه و مسیر با استفاده از نگاشت ساختگاه سنگی (ساختگاه مرجع)، تأثیرات لایه‌های رسوبی در آن تعیین گردد.

در این روش فرض بر این است که اثر ساختگاه در برونزد سنگی مجاور ساختگاه رسوبی قابل حذف است و اثرات مسیر برای نقاط نزدیک به هم یکسان می‌باشد. لذا، نقطه‌ی مرجع عاری از اثرات ساختگاهی می‌باشد و می‌توان آن را به عنوان حرکت ورودی به لایه‌ی خاک در نظر گرفت و آن‌گاه نسبت طیفی آن دو بیانگر اثر ساختگاه می‌باشد. اما، از آنجایی که ساختگاه مرجع و ساختگاه رسوبی در نقاط مختلفی واقع شده‌اند، لذا تابع مسیر انتشار موج برای این دو نقطه ممکن است که یکسان نبوده و باعث ایجاد خطا در تعیین اثر

¹ Standard Spectral Ratio

ساختمانگاه گردد. بنابراین در استفاده از این روش باید فاصله‌ی بین ساختمانگاه رسوبی و سنگی نسبت به فاصله سطحی زلزله کوچک باشد. ضمناً، شرط دیگر استفاده از این روش وجود نگاشت زلزله در ساختمانگاه سنگی است تا بتوان نگاشت‌های سایر ساختمانگاه‌ها را با آن مقایسه نمود. در صورت عدم وجود ساختمانگاه سنگی در نزدیکی ساختمانگاه رسوبی، استفاده از این روش ممکن نیست. استفاده از این روش برای آنالیز حرکات قوی و ضعیف زمین بسیار معمول است. این روش در مناطقی که دارای لرزه‌خیزی بالایی هستند و امکان ثبت داده همزمان بر روی لایه‌های رسوبی و سنگ بستر وجود دارد، مناسب می‌باشد. ولی در مناطقی که دارای لرزه‌خیزی پایینی هستند، روش جایگزین، استفاده از نگاشت نوفه‌های زمینه (محیطی) می‌باشد که میکروترومور نامیده می‌شود. با توجه به اثرات چشمه و مسیر بر روی امواج زلزله می‌توان نوشت:

$$Q_{ij}(f) = S_i(f) G_j(f) P_{ij}(f) \quad (1-2)$$

$P_{ij}(f)$: تابع مسیر برای رویداد λ_{ij} در محل ایستگاه λ_{ij}

$Q_{ij}(f)$: طیف فوریه‌ی دامنه‌ی مربوط به رکورد λ_{ij} ثبت شده در ساختمانگاه λ_{ij}

$S_i(f)$ و $G_j(f)$ ، به ترتیب توابع چشمه و ساختمانگاه می‌باشد.

با در نظر گرفتن یک ایستگاه به عنوان ساختمانگاه مرجع داریم:

$$Q_{ir}(f) = S_i(f) G_r(f) P_{ir}(f) \quad (2-2)$$

با تقسیم رابطه‌ی (۱-۲) به رابطه‌ی (۲-۲) خواهیم داشت:

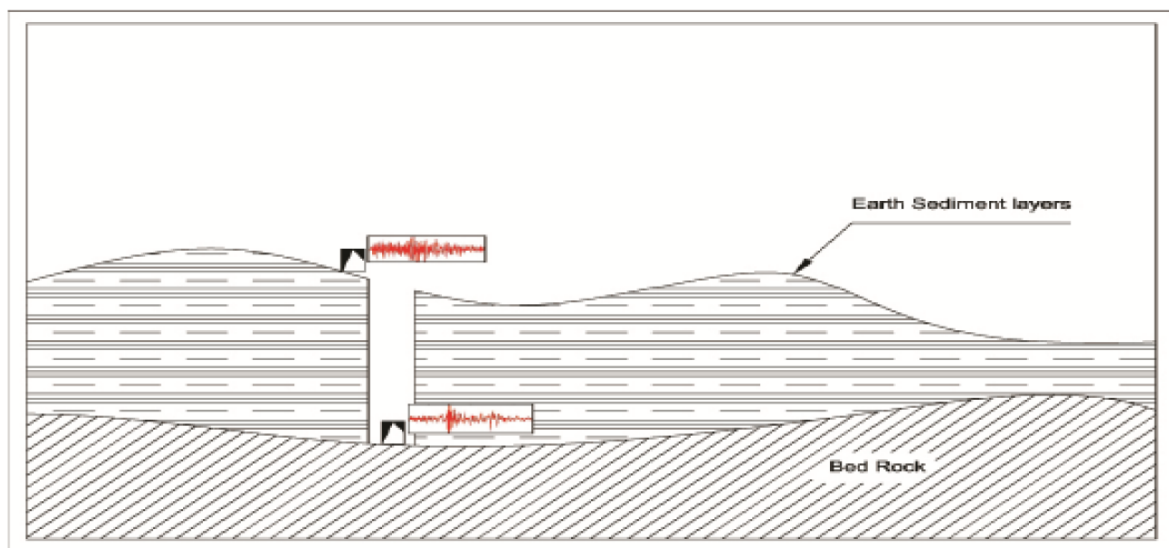
$$\frac{Q_{ij}(f)}{Q_{ir}(f)} = \frac{S_i(f) G_j(f) P_{ij}(f)}{S_i(f) G_r(f) P_{ir}(f)} \quad (3-2)$$

از آنجایی که برای رکوردهای مربوط به دو ساختمانگاه نزدیک به هم می‌توان دو فرض یکی بودن منبع گسلش که فرض قابل قبولی می‌باشد و یکسان بودن تقریبی اثرات مسیر (به دلیل نزدیکی ساختمانگاه‌ها) را در نظر گرفت، می‌توان نسبت طیف جابجایی را در آن‌ها به صورت زیر محاسبه نمود:

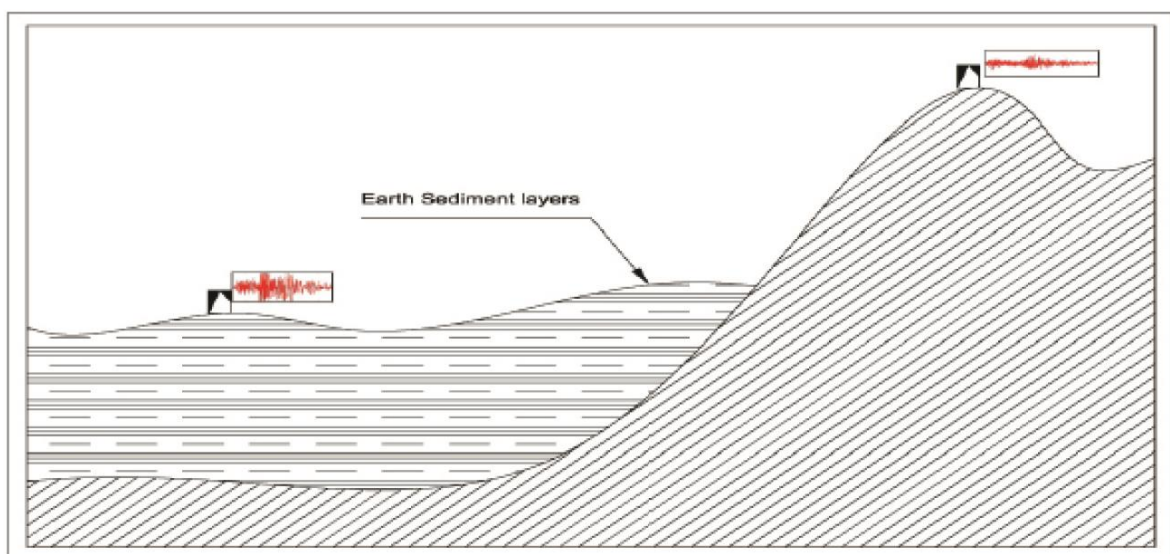
$$\frac{Q_{ij}(f)}{Q_{ir}(f)} = \frac{G_j(f)}{G_r(f)} \quad (۴-۲)$$

در حقیقت نسبت طیفی بیانگر اثرات ساختمانی می باشد. بنابراین با ترسیم نسبت طیفی $\frac{Q_{ij}(f)}{Q_{ir}(f)}$ فرکانس تشدید و دامنه مربوط به آنرا در ساختمان مورد مطالعه تعیین نمود.

ساختمان مرجع به دو حالت ساختمان سنگی سطحی و زیر سطحی تقسیم می گردد. حالت زیر سطحی حالتی است که در همان ساختمان مورد مطالعه، نگاشت زلزله در عمق و تراز سنگ بستر مهندسی (engineering bed rock) در اختیار باشد (شکل ۱-۲). حالت سطحی حالتی است که برونزد سنگی در فاصله‌ای مناسب از محل ساختمان رسوبی موجود باشد (شکل ۲-۲). در حالت نخست، تابع مسیر موج و چشمه لرزه‌ای یکسان خواهد بود. در حالت دوم نیز در صورت کم بودن فاصله‌ی ساختمان مورد نظر تا برونزد سنگی در مقایسه با فاصله‌ی آنها تا کانون زلزله، می توان گفت که تابع مسیر انتشار امواج برای هر دو یکسان خواهد بود.



شکل (۱-۲). ساختمان مرجع حالت زیرسطحی (رفیعی گزنی، ۱۳۸۸)



شکل (۲-۲). ساختگاه مرجع حالت روسطحی (رفیعی گزنی، ۱۳۸۸)

استفاده از روش ساختگاه مرجع تا حدود زیادی مشکلات مربوط به تعیین اثر ساختگاهی را حل نمود. حال آن که مسأله‌ی محدود کننده در استفاده از این روش، یافتن برونزد سنگی مناسب برای تحلیل می‌باشد. در موارد بسیاری ساختگاه با برونزد سنگی وجود ندارد و یا در فاصله‌ی مناسبی از ساختگاه‌های رسوبی واقع نشده است. لذا، استفاده از این روش ممکن نمی‌باشد.

۲-۳- روش مستقل از ساختگاه مرجع

یافتن یک نقطه‌ی مرجع مناسب یکی از مشکلات روش ایستگاه مرجع است. این مسأله مخصوصاً در مناطقی که به دلیل وسعت دشت و رسوب، بستر سنگی برون‌زده‌ای در آن حوالی نباشد حائز اهمیت می‌باشد. در این حالت می‌توان از روش‌های مستقل از ایستگاه مرجع استفاده نمود. در این روش نسبت طیفی نگاشت سطحی به نگاشت عمقی استفاده می‌شود و با توجه به اینکه اثر چشمه و مسیر انتشار موج برای هر دو نقطه یکسان است. لذا، اثر این دو عامل در محاسبه‌ی نسبت طیفی نگاشت‌ها حذف شده و فقط اثر ساختگاهی

باقی می‌ماند. از آنجایی که در زلزله امواج متفاوتی (حجمی، سطحی، دنباله‌ی موج کدا و ...) ثبت می‌گردد و با توجه به این که غالباً تخریب‌های شدید توسط امواج حجمی از نوع S حاصل می‌شود، لذا، در محاسبه‌ی نسبت طیفی غالباً از فاز موج S استفاده می‌گردد.

در عمل، حرکات زلزله به ندرت در سنگ بستر لرزه‌ای در عمق، قابل ثبت است و این امر غالباً در آرایه‌های قائم قابل انجام است. بدین ترتیب، اگر چه بررسی اثر ساختگاهی توسط این روش از دقت بالایی برخوردار است، ولی کمبود داده‌های ثبت شده بر روی سنگ کف لرزه‌ای در عمق، کاربرد این روش را در تعیین اثرات ساختگاهی محدود می‌نماید.

۲-۳-۱- روش نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (HVSr)

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 جهانی فراوانی قرار گرفته است. به منظور برآورد تابع پاسخ لرزه‌ای طیفی با استفاده از یک تک‌نگاشت سه مؤلفه‌ای بدون در اختیار داشتن ایستگاه سنگی مرجع، نسبت‌های طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم یک شتاب‌نگاشت برآورد می‌شود (Lermo and Chavez-Garcia, 1993).

این روش برای اولین بار توسط نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۷۱) معرفی گردید (Nogoshi and Igarashi, 1971) و سپس توسط ناکامورا در سال ۱۹۸۶ به منظور بررسی اثر ساختگاهی با استفاده از امواج میکروترمور 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 مؤلفه‌ی افقی و قائم به صورت یکسان تحت تأثیر قرار می‌دهد (Nakamura, 1989).

در این روش فرض می‌شود که مؤلفه‌ی قائم (V) تحت تأثیر آبرفت نمی‌باشد و فقط تابع فرکانس محیط سنگی است، حال آن‌که مؤلفه‌ی افقی (L,T) تحت تأثیر 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 فوریه مؤلفه‌ی افقی به مؤلفه‌ی قائم در یک ایستگاه بوده و می‌تواند بیان‌گر تأثیر 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 (Lermo and Chavez-Garcia, 1993).

۲-۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی HVSR

روش‌های مختلفی برای برآورد اثر ساختگاه و تعیین نوع زمین وجود دارد که از جمله‌ی آن می‌توان به روش نسبت طیفی استاندارد نسبت به ایستگاه مرجع (SSR، بوچرت ۱۹۷۰)، نسبت طیفی افقی به عمودی (H/V)، ناکامورا (۱۹۸۹) اشاره نمود. 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.

یکی از اهداف زلزله‌شناسی مهندسی تعیین و اندازه‌گیری اثر بزرگنمایی بر دامنه‌ی جنبش زمین و اعمال آن در مطالعات ریز پهنه‌بندی و توسعه‌ی روابط کاهندگی در مناطق لرزه‌خیز است. 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 Vs-30 نمایش داده می‌شود. روش شناخته شده و پرکاربرد دیگر، روش تعیین نسبت طیفی مولفه‌های 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 خرد لرزه‌های ثبت شده به کار گرفته شد (Nakamura, 1989) و برای اولین بار توسط لرمو و چاوزگارسیا (۱۹۹۳) با استفاده از رکورد زمین‌لرزه‌ها انجام شد (Lermo and Chavez-Garcia, 1993).

زارع و همکاران (۱۹۹۹)، ۲۶ منطقه‌ی ایران با حرکات لرزه‌ای شدید را برای مطالعه‌ی تاثیر محل با هدف شناسایی و طبقه‌بندی محل انتخاب کردند (Zare et al., 1999). بدین منظور برای هر محل پروفیل‌های سطحی V_p و V_s 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 می‌دهد که رابطه‌ی آن با سرعت موج s را نشان می‌دهد.

مطالعات قبلی راجب اثرات ساختگاه بر روی حرکات شدید زمین در ایران به برخی مطالعات اخیر تاثیر خاک بر گزارش‌های حرکت شدید در طول زلزله‌های بزرگ محدود می‌شود (Zare, 1994, 1995, 1996). از طرف دیگر، برخی مطالعات موردی ریز پهنه‌بندی در برخی شهرهای بزرگ ایران انجام شد (Jafari et al., 1995, 1996).

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 (Zhao et al.,)

2006). قاسمی و همکاران (۲۰۰۹) یک شاخص محل جدید برای طبقه‌بندی کمی محل با استفاده از روش تجربی نسبت طیفی H/V ارائه کردند (Ghasemi et al., 2009).

انباژاگان و همکاران (۲۰۱۹) ایستگاه‌های لرزه‌ای نصب شده در کنار کمر بند 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 (Anbazhagan et al., 2019).

ناکامورا (۱۹۸۹) داده‌های میکروترمور 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 (Nakamura, 1989). نسبت طیفی افقی به عمودی توسط نویسندگان مختلفی با مقایسه‌ی شبیه سازی‌ها و ثبت زلزله اعتبار سنجی شده است (Lachet and Bard, 1994; Lermo and Chávez-García, 1993; Field and Jacob, 1995; Bard, 1999; Bindi et al., 2000).

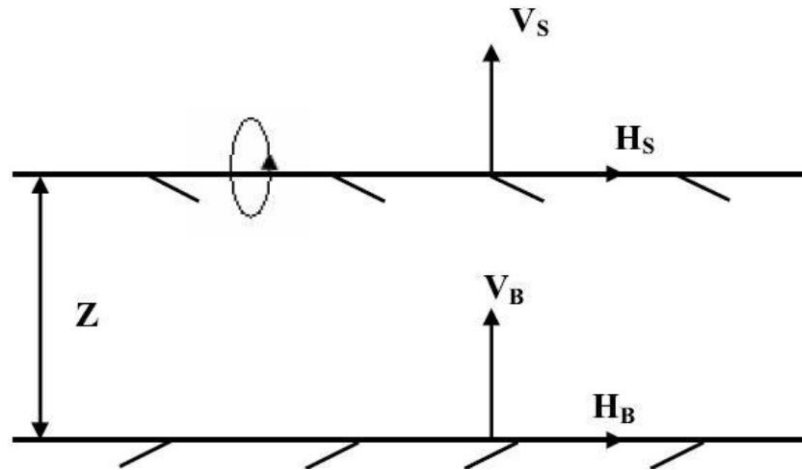
محققان مختلفی از جمله ناکامورا (۱۹۸۹)، بارد (۱۹۹۴) و نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۹۴) پیشنهاد کردند که حداکثر HVSr می‌تواند مشخصه‌ی فرکانس تشدید اصلی یک پوشش رسوبی باشد (Nakamura, 1989; Bard, 1994; Noghoshi and Igarashi, 1971) و به همین دلیل می‌تواند برای ارزیابی اطلاعات در مورد لایه‌بندی لرزه‌ای زیرزمینی استفاده شود (Arai and Tokimatsu, 2004; Picozzi and Albarello, 2007; Herak, 2008). مؤلفه‌ی افقی حرکت زمین به فرکانس حداکثر HVSr مستقل از منبع و زمان است و حداکثر دامنه، اندکی حساس است (Bonney-Claudet et al., 2006). از این‌رو، HVSr، اندازه‌گیری تقریبی برای تخمین ضریب تشدید ساختگاه است. یغمایی سابق و تیسانگ (۲۰۱۱، ۲۰۱۴) از شبکه‌ی عصبی مصنوعی بر منحنی HVSr برای طبقه‌بندی ساختگاه استفاده کردند (Yaghmaei-Sabegh and

(Tsang, 2011, 2014). اما ژائو و همکاران (۲۰۰۶) و دی الساندرو و همکاران (۲۰۱۴) از گروه‌بندی منحنی-های HVSR بر اساس توزیع تجمعی شکل‌های طیفی استفاده کردند و یک شاخص طبقه‌بندی ساختگاه تعریف کردند (Zhao et al., 2006; Di Alessandro et al., 2014).

مطابق با ناکامورا (۲۰۰۰) و هراک (۲۰۰۸) منحنی HVSR توسط موج حجمی کنترل می‌شود (Nakamura, 2000; Herak 2008) اما مطابق با آرای و توکیماسو (۲۰۰۴) و لوندی و آلبارلو (۲۰۱۰) و موج‌های سطحی نقش اصلی را بازی می‌کنند (Arai and Tokimatsu, 2004; Lunedei and Albarello, 2010). 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 (Bard and Theodulidis, 1995). فرکانس تشدید اصلی را می‌توان با اندازه‌گیری نویز محیط (Kobayashi, 1973; Scherbaum et al., 1999; Diagourtas et al., 2001) یا از طریق HVSR حاصل از داده‌های زلزله به دست آورد (Bonilla et al., 1997).

۲-۳-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی نسبت طیفی H/V

ایده‌ی مطرح شده توسط ناکامورا افق جدیدی را در مطالعات بررسی اثر ساختگاه گشود. فرض اساسی در این روش بر این استوار است که میکروترموورها از امواج رایی تشکیل شده که در یک لایه‌ی خاک بر روی یک نیم فضا انتشار می‌یابد (شکل ۲-۳). در این روش در حوزه‌ی فرکانس، چهار طیف دامنه وجود دارد. طیف‌های افقی و قائم حرکت بر روی سطح زمین و در زیر لایه‌ی خاک روی بستر سنگی، $H_s(\omega)$ و $V_s(\omega)$ به ترتیب مؤلفه‌های افقی و قائم میکروترموور بر روی رسوب و $H_B(\omega)$ و $V_B(\omega)$ به ترتیب مؤلفه‌های افقی و قائم میکروترموور بر روی بستر سنگی زیر لایه‌ی رسوب می‌باشند.



شکل (۳-۲). مدل ساده‌ی فرض شده توسط ناکامورا ۱۹۸۹ برای تفسیر میکروترمورها (Nakamura, 1989)

ناکامورا عنوان کرد که می‌توان فرض نمود مؤلفه‌ی قائم حرکت به وسیله‌ی خاک نرم تقویت نمی‌گردد. به علاوه فرض می‌شود منابع لرزش محلی، حرکت میکروترمورها در سنگ بستر را نمی‌توانند مورد تاثیر قرار دهند. بنابراین بزرگنمایی جابجایی قائم از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$A_S(\omega) = \frac{V_S(\omega)}{V_B(\omega)} \quad (۵-۲)$$

این رابطه به نوعی تخمین شکل طیف حرکت میکروترمورها را ممکن می‌سازد. همچنین برای حرکات ناشی از یک زلزله می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:

$$S_E(\omega) = \frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)} \quad (۶-۲)$$

که به نوعی یک تخمین از اثر ساختگاه می‌باشد.

حال برای متعادل کردن $S_E(\omega)$ به وسیله‌ی طیف منبع، یک رابطه‌ی نسبت طیفی تصحیح شده تعریف می‌شود که بیانگر اثر ساختگاه می‌باشد:

$$S_M(\omega) = \frac{S_E(\omega)}{A_S(\omega)} = \frac{\frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)}}{\frac{V_S(\omega)}{V_B(\omega)}} \quad (۷-۲)$$

و فرض نهایی بر این استوار است که برای تمامی فرکانس‌های مورد توجه می‌توان رابطه‌ی زیر را نوشت:

$$\frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)} = 1 \quad (8-2)$$

بنابراین اثر ساختگاه را می‌توان به نوعی با تقسیم مؤلفه‌ی افقی به قائم میکروترمور به دست آورد. رابطه‌ی

(8-2) با توجه به نتایج مطالعات صحرایی که ناکامورا در سال ۱۹۸۹ با استفاده از داده‌های میکروترمور

ثبت شده در چاه‌های گمانه به دست آورده به اثبات رسیده است.

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 یافته است. امروزه روش نسبت طیفی H/V به‌ویژه برای تعیین فرکانس غالب ساختگاه در مناطق فاقد اطلاعات ژئوتکتونیکی و ژئوفیزیکی کاربرد فراوان دارد. در روش نسبت طیفی H/V ، ساختگاه را بر اساس فرکانس غالب به دست آمده طبقه‌بندی می‌شود. در این روش ابتدا تابع بزرگ‌نمایی ساختگاه با استفاده از نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) در حوزه‌ی فرکانس محاسبه شده سپس با استفاده از تابع بزرگ‌نمایی محاسبه شده در هر ساختگاه، فرکانس غالب ساختگاه تعیین و بر اساس فرکانس غالب به دست آمده ساختگاه‌های مورد مطالعه طبقه‌بندی می‌گردد.

برای به‌دست آوردن نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) می‌توان مراحل انجام کار را به صورت کلی زیر بیان نمود:

(۱) تصحیح شتاب‌نگاشت‌ها

(۲) برآورد طیف دامنه‌ی مؤلفه‌های افقی و قائم و محاسبه‌ی نسبت آن‌ها و در صورت نیاز میانگین‌گیری از

مؤلفه‌های افقی

۳) نرم کردن نتایج

برای محاسبه‌ی یک مقدار میانگین برای دو مؤلفه‌ی افقی روش‌های متعددی بیان شده است که در زیر به بعضی از آنها اشاره می‌گردد.

۲-۳-۳-۱- روش‌های محاسبه‌ی میانگین مؤلفه‌ی افقی

بعضی از افراد مؤلفه‌ها را به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار دادند از جمله لرمو و چاوزگارسیا (۱۹۹۳) که اظهار نظری در مورد نتایج ارائه نکردند (Lermo and Chavez-Garcia, 1993). ریپل و همکاران (۱۹۹۸) نتیجه گرفتند که یکی از مؤلفه‌ها ۱/۲ برابر دیگری است (Reipl et al., 1998) و مولنار و کاسیدی (۲۰۰۶) تطابق مناسبی بین مؤلفه‌ها مشاهده کردند (Molnar and Cassidy, 2006). بعضی دیگر از میانگین مؤلفه‌ها استفاده نمودند، به‌عنوان مثال کاسترو و همکاران (۱۹۹۷) از رابطه‌ی زیر به‌عنوان میانگین مؤلفه استفاده نمود (Castro et al., 1997):

$$h(f) = \sqrt{h_v^2(f) + h_u^2(f)} \quad (9-2)$$

که h مؤلفه‌ی افقی میانگین و h_v و h_u مؤلفه‌های افقی متعامد می‌باشند. مالاگنینی و همکاران (۲۰۰۴) نیز از جمع برداری مؤلفه‌ها استفاده نمودند (Malagnini et al., 2004).

تسوبوی و همکاران (۲۰۰۱) از رابطه‌ی زیر استفاده کردند (Tsuboi et al., 2001):

$$h(f) = h_{NS}(t) + ih_{EW}(t) \quad (10-2)$$

که در آن h مؤلفه‌ی افقی میانگین و h_{NS} مؤلفه‌ی شمالی- جنوبی و h_{EW} مؤلفه‌ی شرقی- غربی حرکت زمین می‌باشد.

فونگ و همکاران (۲۰۰۶) از میانگین هندسی استفاده نمودند (Phung et al., 2006):

$$\ln(H) = \frac{\ln(NS) + \ln(EW)}{2} \quad (۱۱-۲)$$

که H مؤلفه‌ی افقی میانگین و NS مؤلفه‌ی شمالی- جنوبی و EW مؤلفه‌ی شرقی- غربی حرکت زمین می‌باشد.

سانکار و همکاران (۲۰۰۰) و ساردینال و میدوریکاوا (۲۰۰۴) برای محاسبه‌ی نسبت طیفی HVSR از رابطه‌ی زیر استفاده نمودند (Sankar et al., 2000; Sardinal and Midorikawa, 2004):

$$SR_{hv} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{S_{H1}^2}{T_{H1}} + \frac{S_{H2}^2}{T_{H2}} \right)}}{\frac{S_v(f)}{\sqrt{T_v}}} \quad (۱۲-۲)$$

در این رابطه S_{H1} ، S_{H2} و S_v به‌ترتیب دو مؤلفه‌ی افقی و مؤلفه‌ی قائم می‌باشند، T_{H1} و T_{H2} نیز پنجره‌های مؤلفه‌های افقی و T_v اندازه‌ی پنجره‌ی مؤلفه‌ی قائم می‌باشد. از آن جایی که که اندازه‌ی پنجره‌ها اغلب مساوی انتخاب می‌شود، بنابراین $T_{H1} = T_{H2} = T_v$ و رابطه‌ی استفاده شده به‌صورت ساده‌ی شده زیر تبدیل می‌شود:

$$SR_{hv} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} (S_{H1}(f)^2 + S_{H2}(f)^2)}}{S_v(f)} \quad (۱۳-۲)$$

بنابراین میانگین دو مؤلفه‌ی افقی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$S_H = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{H1}(f)^2 + S_{H2}(f)^2)} \quad (۱۴-۲)$$

سینائی‌ان (۲۰۰۶) و زارع و همکاران (۱۹۹۹) نیز جهت میان‌گیری از مؤلفه‌های افقی از رابطه‌ی فوق استفاده نموده‌اند (Sinaeian, Ph. D Thesis, 2006; Zare et al., 1999).

یکی از معروف‌ترین روش‌ها در این مورد، روش استفاده از میانگین هندسی مستقل از آزمون می‌باشد که توسط بور و همکاران (۲۰۰۶) ارائه شده است (Boore et al., 2006). این میانگین به دو صورت وابسته به

پریود و مستقل از پریود محاسبه می‌گردد که به ترتیب تحت عنوان GMRotDpp و GMRotIpp مطرح شده‌اند. بنابر اظهارات این محققین نتایج طیف‌های پاسخ ثبت شده تحت یک رویداد مشترک ولی با آزمون سنسورهای متفاوت ممکن است تا ۲ برابر اختلاف داشته باشد. این وابستگی به آزمون سنسور در تحریک‌هایی که بسیار همبسته هستند بیشتر رخ می‌دهد. بیشینه‌ی مقدار میانگین هندسی زمانی رخ می‌دهد که توزیع طیف‌های دو مؤلفه‌ی افقی بیشترین یا کمترین شباهت را به یکدیگر داشته باشند و کمینه‌ی مقدار آن نیز هنگامی روی می‌دهد که تحریک به‌طور عمده در یک مؤلفه رخ دهد و مؤلفه‌ی دیگر، دامنه نسبتاً کوچکی داشته باشد. مقدار GMRotDpp به‌صورت درصد ppm مجموعه‌ی میانگین‌های هندسی برای یک پریود مشخص، تعیین می‌گردد. بعنوان مثال چنانچه pp برابر ۱۰۰، ۵۰ و ۰ باشد، مقادیر صدک ۱۰۰ درصد یا همان مقدار بیشینه‌ی مجموعه، صدک ۵۰ درصد یا همان میانه و صدک ۰ درصد یا همان مقدار کمینه‌ی مجموعه‌ی مورد نظر می‌باشد. زوایای مشخص شده برای GMRotDpp وابسته به پریود هستند و اغلب برای تعدادی از پریودهای ضروری، مورد محاسبه قرار می‌گیرند. البته برای حل این مشکل، روش GMRotIpp را ارائه نمودند که مستقل از پریود می‌باشد. در این روش زاویه‌ای انتخاب می‌شود که پراکندگی میانگین هندسی وابسته به دوران را در محدوده‌ی پریود مورد استفاده، کمینه نماید. تنها فرض به‌کار رفته در این روش فرض متعامد بودن مؤلفه‌ها می‌باشد و از مزایای تئوریک آن حذف اثر سنسورها در عدم قطعیت‌ها می‌باشد. مهم‌ترین ایراد وارد بر این روش نیز زمان‌بر بودن فرآیند محاسبات آن نسبت به روش میانگین هندسی می‌باشد. قاسمی (۲۰۰۸) نیز جهت میانگین‌گیری مؤلفه‌های افقی از این روش استفاده کرده است (Ghasemi, Ph. D Thesis, 2008). به دلیل طولانی بودن گام‌های محاسبه‌ی GMRotDpp و GMRotIpp، در این‌جا از توضیح آن‌ها خودداری می‌شود و برای اطلاعات بیشتر در این‌باره می‌توان به بور و همکاران (۲۰۰۶) مراجعه نمود (Boore et al., 2006).

۲-۴- پژوهش‌های انجام شده با روش H/V در ایران

کشور ایران دارای یک وضعیت خاص و منحصر به فرد زمین‌شناسی و هواشناسی در مقایسه با سایر کشورهای لرزه‌ای مانند ژاپن و یا کالیفرنیا است، یک کشور کوهستانی با شرایط آب و هوایی خشک و سطح آب پایین در بسیاری از مناطق. نتیجه‌ی چنین شرایط آب و هوایی می‌تواند باعث این شود که بزرگ‌نمایی برای تعداد کمی از سایت‌ها در رنج فرکانسی پایین و برای بسیاری از سایت‌ها در مناطق معتدل این بزرگ‌نمایی در رنج فرکانسی متوسط یا بالا قرار بگیرد.

شبکه‌ی شتاب‌نگاری در ایران در شرایط مختلفی نصب گردیده است. دستگاه‌های SMA-1 اولین دستگاه-های آنالوگی بودند که در سال ۱۹۷۵ در ایران نصب گردیدند و به تدریج با دستگاه‌های دیجیتال SSA-2 بعد از زلزله‌ی $M_w = 7.4$ منجیل در سال ۱۹۹۰ توسعه یافتند. ایستگاه‌ها به طور عمده در شهرها و روستاها بر روی بسترهای سنگی و آبرفتی و در مکان‌های مختلفی نصب شده‌اند. هدف از این کار مقایسه‌ی حرکت امواج زلزله در خاک و سنگ در طی زمین‌لرزه‌های مختلف (با استفاده از یک شبکه‌ی محلی بر روی یک سایت خاکی و سایت سنگی متناظر با آن) است.

مطالعات در مورد اثرات سایت بر اساس حرکات نیرومند، به بررسی رکوردهای شتاب و تعیین میزان اثر سایت بر روی این رکوردها منجر می‌شود. پس از تعیین فرکانس غالب برای هر یک از ساختگاههای مورد مطالعه، می‌توان طبقه خاک هر ساختگاه را که بیانگر مشخصات فیزیکی و دینامیکی لایه‌های آن می‌باشد، مشخص نمود. اساس طبقه‌بندی در برخی روش‌های کلاس‌بندی فرکانس غالب طیف H/V و رده‌بندی براساس سرعت موج برشی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به کارهای زارع و همکاران (۱۹۹۹)، سینائیان (۲۰۰۶) و کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲) اشاره نمود (Zare et al., 1999; Sinaeian, Ph. D Thesis, 2006; Komak Panah et al., 2002). در برخی دیگر اساس طبقه‌بندی شامل ارائه‌ی یک اندیس رده‌بندی می‌باشد

که کار انجام شده توسط قاسمی (۲۰۰۸)، قاسمی (۲۰۰۹) و ژائو و همکاران (۲۰۰۶) از این نوع می‌باشد که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته خواهد شد (Ghasemi, Ph. D Thesis, 2008; Ghasemi et al., 2009; Zhao et al., 2006).

۲-۴-۱ طبقه‌بندی ساختگاه‌ها به همراه دسته‌بندی آن‌ها

بزرگنمایی ساختگاه شدیداً متأثر از فرکانس طبیعی آن می‌باشد. فرکانس طبیعی ساختگاه به صورت تقریبی از رابطه‌ی $f = \frac{V_s}{4h}$ به دست می‌آید که در آن f فرکانس طبیعی ساختگاه (فرکانس غالب مورد نظر) و V_s سرعت موج برشی در لایه‌ی سطحی و h ضخامت آن است. از طرفی فرکانس طبیعی خاک وابسته به ضخامت خاک تا سنگ کف لرزه‌ای و میانگین سرعت موج برشی است و در واقع عمق و سختی دینامیکی در بزرگنمایی ساختگاه اهمیت دارند. علاوه بر این، فاکتورهای دیگری نظیر امپدانس بین رسوبات سطحی و زیرین، میرایی مصالح سطحی و خصوصیات غیر خطی خاک در شدت‌های مختلف از جمله پارامترهای مهم دیگر در بزرگنمایی ساختگاه می‌باشند. از بین پارامترهای فوق دو عامل سختی دینامیکی و عمق سنگ کف لرزه‌ای از اهمیت بیشتری برخوردار است.

تاکنون، طبقه‌بندی‌های مختلفی جهت ارزیابی اثرات ساختگاهی پیشنهاد شده است. در طبقه‌بندی UBC 1979 معمولاً از فرکانس طبیعی به عنوان مبنای طبقه‌بندی استفاده شده است. در طبقه‌بندی‌های اخیر مانند سید و همکاران (۱۹۷۲) و UBC 1979، میانگین سرعت برشی در ۳۰ متر فوقانی خاک (V_{s30}) به عنوان پارامتر اصلی انتخاب شده است (Seed et al., 1972).

تأثیرات مشخصات خاک حین زمین‌لرزه یکی از عوامل و فاکتورهای مهم در مهندسی زلزله می‌باشد. پوشش رسوبی نرم می‌تواند تحت تأثیر زمین‌لرزه به شدت تشدید گردد. باند فرکانسی تحت تأثیر چنین پدیده‌ای

وابسته به ضخامت و سرعت امواج لایه‌های خاک می‌باشد و زمانی که فرکانس غالب ساختگاه نزدیک به فرکانس ارتعاش سازه‌های واقع در آن باشد خسارت بسیار بزرگی قابل پیش‌بینی می‌باشد. در سال‌های اخیر بررسی تأثیرات ساختگاه یکی از موضوعات مورد توجه در مهندسی زلزله بوده و مطالعات گسترده‌ای در این خصوص صورت گرفته است. در این راستا روش‌های مختلفی از جمله روش نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم یا روش ایستگاه مرجع در حوزه‌ی فرکانس مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور معمول در مطالعات اثر ساختگاهی از نسبت طیفی مؤلفه‌های ساختگاه رسوبی به سنگی که به روش ایستگاه مرجع موسوم می‌باشد استفاده می‌گردد. امروزه نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم H/V نیز به منظور تعیین اثر ساختگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه مبنای فیزیکی این روش با استفاده از نگاشت‌های زلزله‌چندان واضح نیست، اما کارایی این روش در تعیین مشخصات بزرگ‌نمایی تابع ساختگاه توسط محققان مختلف به اثبات رسیده است. بدین ترتیب فرکانس غالب تابع بزرگ‌نمایی ساختگاه براساس مدل یک بعدی که با نسبت طیفی H/V هم‌خوانی دارد محاسبه می‌گردد. براساس فرکانس غالب شناسایی شده در هر ساختگاه، می‌توان ساختگاه‌های مورد مطالعه را طبقه‌بندی و اثر ساختگاه را در آن بررسی نمود.

روش‌های مختلفی جهت طبقه‌بندی ساختگاه وجود دارد که از بین آن‌ها روش‌های کمک‌پناه و همکاران (۲۰۰۲)، آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، UBC 1997 و روش زارع و همکاران (۱۹۹۹) تشریح گردیده است (Komak, 2002; Zare et al, 1999). در روش ارائه شده توسط کمک پناه و همکاران، ساختگاه‌ها از نظر فرکانس غالب به چهارنوع تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوتکتونیکی انجام یافته است. با استفاده از فرکانس غالب تعیین شده برای هر ساختگاه، ساختگاه‌ها در چهار گروه طبقه‌بندی شده‌اند. برای ساختگاه‌های سست، فرکانس غالب کوچک است و هرچه که خاک سخت‌تر می‌شود، فرکانس غالب افزایش می‌یابد که این مسأله با نتایج نظری هم‌خوانی دارد. همچنین،

ملاحظه می‌شود که ساختگاه نوع ۱، فرکانس غالب خاصی نشان نمی‌دهد. به عبارتی ساختگاه سنگی هیچ فرکانس خاصی را تضعیف یا تقویت نمی‌کند (Zare et al, 1999).

الف) طبقه بندی ساختگاه بر اساس مطالعات زارع و همکاران

از میان تمامی روش‌های انجام شده برای طبقه‌بندی ساختگاه‌ها روش (H/V) می‌تواند 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 می‌پذیرد. 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 (Zare et al, 1999).

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 سرعت-های 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، این اجازه را به ما می‌دهد که یک کلاس‌بندی چندگانه از سایت را تعریف کنیم. این طبقه‌بندی براساس بالاترین پیک دامنه در یک فرکانس خاص صورت می‌پذیرد (Zare et al, 1999).

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

در بعضی از سایت‌ها دامنه‌ی منحنی‌های RF برابر با ۴ نمی‌باشد اما از ۳ بزرگ‌تر است، در چنین مواردی استفاده از دیگر تست‌های در دسترس برای تشخیص شرایط سایت سودمند خواهد بود. در چنین موارد بینابینی می‌توان از پروفیل سرعتی V_p و V_s و همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری میکروترمورها استفاده کرد. به طور کلی برای تمام حالت‌ها اگر پیک دامنه به مقدار ۳ نرسیده باشد (از روی منحنی‌های RF)، سایت مورد نظر به عنوان یک سایت سنگی و یا همان کلاس ۱ در نظر گرفته می‌شود (Zare et al, 1999).

جدول (۱-۲): چهار کلاس مورد نظر برای طبقه‌بندی سایت (Zare et al, 1999)

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

ب) طبقه‌بندی خاک بر اساس مطالعات قائم‌مقیان و نوجوان (۲۰۰۸)

در میان طبقه‌بندی‌های مختلف، در بعضی از طبقه‌بندی‌ها هم از سرعت موج برشی و هم از پریود غالب برای تعیین رده ساختگاه استفاده گردیده که در این خصوص می‌توان به مطالعات قائم‌مقیان و نوجوان (۲۰۰۸) اشاره نمود. جزئیات این طبقه‌بندی‌ها در جدول (۲-۲) 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 (Ghayamghamian et al., 2008)

جدول (۲-۲): طبقه‌بندی خاک با توجه به پرید غالب و سرعت موج برشی (Ghayamghamian et al., 2008)

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

ج) طبقه‌بندی ارائه شده در آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم)

چگونگی طبقه‌بندی نوع زمین در آیین نامه ۲۸۰۰ که به عنوان مبنای طراحی مقاوم ساختمان‌ها در برابر زلزله در ایران به کار می‌رود، در جدول (۲-۳) نشان داده شده است.

$\bar{V}_s$: 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 طبقه‌بندی نوع زمین، در این جدول، باید براساس مقدار سرعت موج برشی $\bar{V}_s$ صورت گیرد ولی در صورت دسترسی نداشتن به آن، می‌توان در خاک‌های دانه‌ای با اندازه‌ی کوچک‌تر از شن متوسط از تعداد ضربات نفوذ استاندارد $\bar{N}_{1(60)}$ و در خاک‌های چسبنده از مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی $\bar{C}_u$ استفاده نمود.

جدول (۳-۲): طبقه‌بندی نوع زمین براساس آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم)

نوع زمین	توصیف لایه‌بندی زمین	پارامترها		
		$\bar{C}_u$ (kPa)	$\bar{N}_{1(60)}$	$\bar{V}_s$ (m/s)
I	سنگ و شبه سنگ، شامل سنگ‌های آذرین، دگرگونی و رسوبی و خاک‌های سیمانته بسیار محکم با حداکثر ۵ متر مصالح ضعیف‌تر تا سطح زمین	-	-	> 750
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. سنگ‌های آذرین و رسوبی سست، مانند توف و یا سنگ متورق و یا کاملاً هوازده	> 250	> 50	$375-750$
III	خاک متراکم تا متوسط، شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس-های سخت با ضخامت بیشتر از ۳۰ متر	$70-250$	$15-50$	$175-375$
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	< 70	< 15	< 175

برای تعیین متوسط سرعت موج برشی، $\bar{V}_s$ می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{si}}\right)} \quad (۱۵-۲)$$

که در آن $\bar{V}_s$ سرعت موج برشی، d_i و V_{si} به ترتیب ضخامت لایه و سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متری از تراز پایه است.

(د) طبقه‌بندی آیین نامه UBC 1997

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

جدول (۲-۴): طبقه‌بندی براساس UBC 1997

Su (psf)	N_{30}	V_{s30} (ft/s)	توصیف	رده ساختگاه
.....		> 5000	سنگ سخت	SA
	> 50	$2500 - 5000$	سنگ	SB
≤ 2000	$15 - 50$	$1200 - 2500$	سنگ سست یا خاک سخت	SC
$1000 - 2000$		$600 - 1200$	خاک سفت	SD
< 5000		< 600	خاک سست یا هر نوع خاک با بیش از ۱۰ متر رس نرم با $PI > 20$ و رطوبت طبیعی بیش از ۴۰ درصد	SE
خاک‌هایی که نیاز به ارزیابی دارند: ۱- خاک‌هایی که واجد پتانسیل گسیختگی و فروریختگی در شرایط لرزه‌ای هستند، مثل خاک‌های روان‌گرا، رس-های 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 نسبتاً 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.

ه) طبقه‌بندی براساس مطالعات کمک پناه و همکاران

جدول (۲-۵): طبقه‌بندی براساس (Komak Panah et al., 2002)

طبقه	نوع خاک	فرکانس مبنا (هرتز)	V_{s30} (ms^{-1})
I	سخت- سنگ سست	$> 7/5$	> 750
II	سفت	$5 - 7/5$	$750 - 550$
III	نسبتاً سفت	$2/5 - 5$	$550 - 350$
IV	سست	$< 2/5$	< 350

I: سنگ‌های آذرین با بافت درشت و ریز دانه، سنگ‌های رسوبی بسیار یخت 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

و) طبقه‌بندی براساس مطالعات سینائیان

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

جدول (۲-۶): طبقه‌بندی براساس سینائیان

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

و) طبقه‌بندی براساس مطالعات قاسمی و همکاران

نسبت‌های طیفی H/V به دست آمده برای رده‌های مختلف ساختگاه، نه تنها دارای دامنه‌ی میانگین متفاوتی می‌باشند، بلکه شکل کلی آن‌ها نیز تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد (Ghasemi, Ph. D Thesis, 2008). از این رو شکل کلی میانگین نسبت‌های طیفی H/V نیز می‌تواند در رده‌بندی ساختگاه در نظر گرفته شود. به منظور لحاظ نمودن شکل کلی میانگین نسبت‌های طیفی H/V تعیین شده برای هر ساختگاه، می‌توان از ضرایب همبستگی این منحنی‌ها با میانگین H/V تعیین شده بر مبنای کلیه‌ی رکوردهای ثبت شده در هر ایستگاه استفاده نمود. ضریب همبستگی اسپیرمن توسط قاسمی (۲۰۰۸) به عنوان اندیس رده‌بندی ساختگاه پیشنهاد شده است (Ghasemi, Ph. D Thesis, 2008). در حقیقت این اندیس بیان‌گر میزان همبستگی

تغییرات دو متغیر نسبت به یکدیگر می‌باشد. این اندیس به صورت زیر محاسبه می‌شود (Ghasemi, Ph. D Thesis, 2008; Ghasemi et al., 2009):

$$SI_k = 1 - 6 \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (2-15)$$

که در آن k شماره‌ی رده‌ی ساختگاه، n تعداد کل نقاط پریود، α_i مقدار میانگین نسبت طیفی H/V برای ساختگاه مورد نظر برای لامین پریود، $\bar{a}_{ki}$ مقدار میانگین نسبت طیفی H/V برای k امین رده‌ی ساختگاه برای لامین پریود و در نهایت d_i ، اختلاف بین مقادیر α_i و $\bar{a}_{ki}$ می‌باشد.

در این روش ابتدا باید مقدار SI را در ایستگاه مورد نظر برای رده‌های مختلف ساختگاه تعیین نمود و سپس رده‌ی ساختگاهی که بیشترین مقدار برای آن به دست آمده است، به عنوان رده‌ی ایستگاه مورد نظر انتخاب می‌گردد. بنابر اظهارات قاسمی (۲۰۰۸) نرخ موفقیت این روش در شرایط ساختگاهی گروه یک، دو و سه به ترتیب ۷۳، ۴۳ و ۷۰ درصد می‌باشد (Ghasemi, Ph. D Thesis, 2008).

ز) طبقه‌بندی براساس انجمن ملی کاهش خطرات زمین لرزه

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

جدول (۲-۷): طبقه‌بندی براساس NEHRP

رده‌ی ساختمان	شرایط ساختگاهی	متوسط سرعت موج برشی m/s	مقاومت برشی زهکشی نشده $\bar{S}_u$ (kpa)	$\bar{N}$ عدد نفوذ استاندارد (یا $\bar{N}_{ch}$ برای لایه های 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- $\bar{V}_s < 180$		
F		خاک هایی که به بررسی های خاص ساختگاهی 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 با سمنتاسیون ضعیف ورمبنده 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 گونه‌ای که بتوان آن را طبقه‌بندی کرد در دست نیست، از رده‌ی D بایستی

بهره گرفته شود. رده‌های E و F تا زمانی که یک سازمان ذیصلاح وجود این لایه ها را در ساختمان اعلام

نموده یا در گزارش ژئوتکنیک به این لایه ها اشاره نشده، نبایستی استفاده شوند.

در این پژوهش با توجه پرهزینه و وقت گیر بودن روش‌های عددی، رابطه‌ای تجربی برای تعیین سرعت موج برشی زلزله با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) ارائه شد. سپس نوع خاک منطقه با استفاده از روش نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) تعیین و با سایر روش‌های طبقه‌بندی ساختمان مقایسه گردید. عوامل مؤثر برای پیش‌بینی این رابطه، بزرگای زلزله، فاصله‌ی منبع زلزله تا ساختمان، نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) و پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر، در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش بزرگای گشتاوری به عنوان بزرگا و فاصله‌ی کانونی به عنوان فاصله‌ی منبع زلزله- ساختمان مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

فصل سوم: روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

تاکنون تئوری‌های زیادی در مهندسی زلزله ارائه شده است، اما به دلیل پیچیدگی آن‌ها و عدم شناسایی و درک صحیح این پدیده بدون کمک گرفتن از نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف که در هنگام وقوع زلزله ثبت می‌شوند، نمی‌توان از این تئوری‌ها در عمل مستقیماً استفاده نمود. در حال حاضر ثبت زمین‌لرزه‌ها توسط دستگاه‌های شتاب‌نگار که دارای فرکانس طبیعی بالاتری نسبت به فرکانس حرکات زمین هستند، انجام می‌شود. دستگاه‌های شتاب‌نگار برای نصب در نزدیکی مرکز زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های فعال و هم‌چنین در سازه‌های مهم (سدها، نیروگاه‌ها) بسیار مناسب می‌باشند و می‌توانند نگاشت‌هایی را ثبت کنند که در مهندسی زلزله اهمیت فراوانی دارد. شتاب‌نگاشت‌ها، رکوردهای ثبت شده توسط شتاب‌نگارها هستند که حرکت زمین را با تمام جزئیات نشان می‌دهند و حاوی اطلاعات زیادی درباره‌ی ماهیت لرزش زمین هستند. شتاب‌نگاشت‌های حاصل از حرکات قوی زمین دارای شکل‌های بسیار متفاوتی از سیگنال‌های ثبت شده هستند که به دوام، دامنه‌های امواج و محتوای فرکانسی آن‌ها بستگی دارد. کاربرد آن‌ها در زلزله‌شناسی مهندسی برای تحلیل طبیعت جنبش قوی زمین و در مهندسی زلزله برای مطالعه‌ی نیروهای زلزله، تأثیر زمین‌لرزه بر سازه‌ها، تدوین آیین‌نامه‌های زلزله و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله و خطرپذیری آن‌ها کاربرد دارد. در مهندسی زلزله از آن جایی که استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها به طور مستقیم برای طراحی مشکل است، داده‌های شتاب‌نگاری به صورت مجموعه‌ای از پارامترهای شاخص و قابل استفاده درآورده می‌شوند، که می‌توان به اوج شتاب (PGA) و یا پارامترهای طیفی اشاره کرد. ساده‌ترین شکل استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها، استفاده از اوج شتاب می‌باشد. اندازه‌گیری اوج شتاب ثبت شده در دنیا مربوط به زلزله‌های مخرب، از $(0.1g)$ تا حدود $(0.2g)$ بوده است. مقدار PGA نمی‌تواند بیانگر مدت دوام و محتوای فرکانس زمین‌لرزه باشد. در صورتی که برای مهندسان ساختمان پارامترهایی نظیر دوام و محتوای فرکانسی مهم

می‌باشد. بنابراین طیف‌های پاسخ، طیف طرح و طیف فوریه در کارهای مهندسی استفاده می‌شود (Ramazi, H.R et al., 1997).

۳-۲- تصحیح شتاب‌نگاشت

از آنجا که کلیه 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. دلایل وجود نوفه در سیگنال به منابع مختلفی بستگی دارد از جمله: مکان نامناسب شتاب‌نگار، خرابی قسمتی از آن، محدودیت فرکانسی شتاب‌نگار، خطای دید در دیجیتالی کردن شتاب-نگارهای آنالوگ، نوفه‌های محیطی و

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. طیف دامنه‌ی فوریه رکوردهای ثبت شده در ساختگاه سنگی در پریودهای کوتاه قویتر است و این در حالی است که در رکوردهای ثبت شده در ساختگاه خاکی، طیف فوریه در فرکانس‌های پایین‌تر قوی‌تر است. محدوده‌ی مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها در شرایط ساختگاهی مختلف که توسط قدرتی و همکاران پیشنهاد شده است در جدول (۳-۱) ارائه شده است (قدرتی امیری و همکاران، ۱۳۸۳).

جدول (۳-۱): محدوده‌ی مناسب جهت انتخاب فرکانس تصحیح رکوردها (قدرتی امیری و همکاران)

نوع دستگاه	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

۳-۳- پارامترهای محتوای فرکانس

با یک تحلیل ساده می‌توان پی برد که پاسخ دینامیکی اجسام اثرپذیر مانند ساختمان، پل، شیب‌ها یا خاکریزها به فرکانسی که آن‌ها بارگذاری شده‌اند حساس است. زلزله‌ها بارگذاری پیچیده‌ای با مؤلفه‌های حرکت در یک محدوده‌ی وسیعی از فرکانس ایجاد می‌کنند. محتوای فرکانسی نحوه‌ی توزیع دامنه‌ی حرکات زمین را در فرکانس‌های مختلف تشریح می‌کند. چون محتوای فرکانسی حرکات زلزله شدیداً تحت تأثیر اثرات آن حرکت می‌باشد، لذا تعیین خصوصیات آن حرکت بدون در نظر گرفتن محتوای فرکانسی آن امکان پذیر نیست. برای محاسبه محتوای فرکانسی حرکت، می‌توان از تبدیل‌هایی که برای انتقال از حوزه‌ی زمان به حوزه فرکانس به کار می‌رود، استفاده نمود (Kramer, 1996).

۳-۳-۱- طیف حرکت زمین

هر تابع پریودیک (یعنی هر تابعی که در فواصل زمانی ثابت عیناً تکرار شود) را می‌توان با بهره‌گیری از

تحلیل فوری به صورت مجموع یک سری از عبارات هارمونیک ساده با فرکانس، دامنه و فاز مختلف بیان نمود. با استفاده از سری فوری یک تابع پریودیک $x(t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت (Kramer, 1996):

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (1-3)$$

در این رابطه C_n و ϕ_n به ترتیب دامنه و زاویه‌ی فاز n ام هارمونی سری فوری می‌باشند. سری فوری توصیف کاملی از حرکات زمین را ارائه می‌کند. زیرا امکان بازیابی کامل حرکت با تبدیل فوری معکوس وجود دارد.

۳-۳-۱-۱- طیف فوری

رسم تغییرات دامنه‌ی فوری در مقابل فرکانس (C_n بر حسب ω_n از معادله‌ی ۳-۱) به طیف دامنه‌ی فوری و رسم تغییرات زاویه‌ی فاز فوری در مقابل فرکانس (ϕ_n بر حسب ω_n) به طیف فاز فوری معروف می‌باشد. طیف دامنه‌ی فوری یک حرکت نیرومند زمین و نحوه‌ی توزیع دامنه را با فرکانس یا پریود نشان داده و محتوای فرکانسی حرکت را بسیار واضح ترسیم می‌نماید (Kramer, 1996).

طیف دامنه‌ی فوری ممکن است باریک یا پهن باشد. یک طیف باریک نشان می‌دهد که حرکت دارای یک فرکانس (پریود) غالب است که می‌تواند یک تاریخچه‌ی زمانی (شتاب‌نگاشت) تقریباً سینوسی و هموار را ایجاد نماید. یک طیف پهن متناظر با حرکتی است که شامل فرکانس‌های مختلف بوده و تاریخچه‌ی زمانی نامنظم و ناهموارتری ایجاد می‌نماید (Kramer, 1996).

تریفوناک و لی (۱۹۸۹) مدل‌هایی تجربی برای مقیاس نمودن طیف دامنه‌ی فوری با در نظر گرفتن بزرگای زمین لرزه، فاصله چشمه تا سایت، شدت ثبت شده در سایت و شرایط ساختگاهی ارائه کردند (Trifunac and Lee, 1989).

۳-۱-۳-۳- طیف توان

محتوای فرکانسی حرکت زمین را هم‌چنین می‌توان با طیف توان تشریح نمود. این طیف که بیانگر انرژی ورودی زلزله به سیستم تک درجه آزادی با فرکانس ω در هر لحظه از طول مدت تداوم حرکت می‌باشد، به صورت زیر با طیف فوریه و انرژی مرتبط می‌باشد:

$$E(\omega) \frac{2}{\pi T} = |F(\omega)|^2 \frac{1}{\pi T} = G(\omega) \quad (۲-۳)$$

پردازش نگاشت‌های زلزله نشان می‌دهد که طیف‌های توان حتی در یک محدوده‌ی فرکانسی کوچک دارای ماهیت ثابتی نبوده و نوسانات زیادی دارند. لذا چنین طیف‌هایی جهت کاربردهای عمومی در آنالیز سازه‌ها مناسب نمی‌باشند. از این‌رو با میانگین گرفتن از طیف‌های توان دارای خصوصیات مشابه و صاف کردن طیف حاصل، تابع چگالی توان صاف شده را به دست می‌آورند. چنین تابعی نیز همانند طیف توان نشانگر توزیع انرژی ورودی زلزله به سیستم در هر فرکانس طبیعی می‌باشد.

۳-۱-۳-۳- طیف پاسخ

طیف پاسخ که از پردازش نگاشت‌های زلزله به دست می‌آید، اثر حرکت زمین بر سازه‌ها را برای پیوندهای طبیعی مختلف مشخص می‌کند و به طور غیر مستقیم در تحلیل استاتیکی سازه‌ها کاربرد داشته و بیانگر بسیاری از خصوصیات زلزله مورد نظر می‌باشد. طیف پاسخ، پاسخ ماکزیمم سیستمی با یک درجه آزادی (SDOF) را در مقابل یک حرکت ورودی خاص به صورت تابعی از فرکانس طبیعی و ضریب میرایی سیستم تشریح می‌کند. بر مبنای هر نسبت میرایی مشخص، یک طیف پاسخ به دست می‌آید. می‌توان نشان داد که طیف پاسخ سرعت با نسبت میرایی صفر انطباق نسبتاً خوبی با طیف دامنه فوریه دارد. برای محاسبه‌ی این طیف‌ها بایستی برای هر فرکانس و میرایی خاص، حداکثر کمیت مورد نظر را در کل مدت داوم زلزله به دست آورد و از ترسیم این ماکزیمم‌ها بر حسب فرکانس به طیف مورد نظر دست یافت. طیف‌های پاسخ،

خصوصیات حرکت نیرومند زمین را به طور غیر مستقیم منعکس می کنند زیرا این حرکات با پاسخ یک سازه یک درجه آزادی فیلتر می شوند. نکته‌ی قابل ذکر آنکه این طیف‌ها فاقد اطلاعاتی پیرامون زمان وقوع حداکثر خواهند بود که از مهمترین معایب آنها می باشد (Kramer, 1996).

۳-۴- بزرگا

با پیشرفت دستگاه‌های اندازه‌گیری حرکات زمین حین زلزله امکان تدوین معیاری کمی و ملموس برای اندازه‌گیری به‌دست آمده است. دستگاه‌های اندازه‌گیری زلزله امکان اندازه‌گیری کمیتی مشخص را که بزرگای زلزله نامیده می‌شود، فراهم می‌سازند (Kramer, 1996). بزرگای زلزله 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، می‌باشند. داده‌هایی هم که براساس بزرگای موج سطحی (M_s)، بزرگای موج حجمی (M_b) و یا مقیاس محلی ریشتر (M_L) بود، با کمک از رابطه‌های پیشنهادی نشریه‌ی ۶۲۶ به بزرگای گشتاوری تبدیل شدند. هم‌چنین بزرگای ناتلی (M_n) به وسیله‌ی رابطه‌ی امامی و همکاران (۱۳۹۱) به ریشتر و سپس به بزرگای گشتاوری تبدیل شد.

تبدیل M_s به M_w :

$$M_w = 0.66M_s + 2.11 \quad 2.8 \leq M_s \leq 6.2 \quad (3-3)$$

$$M_w = 0.93M_s + 0.45 \quad 6.2 \leq M_s \leq 8.2 \quad (4-3)$$

تبدیل M_b به M_w :

$$M_w = 0.85M_b + 1.03 \quad 3.5 \leq M_b \leq 6.2 \quad (5-3)$$

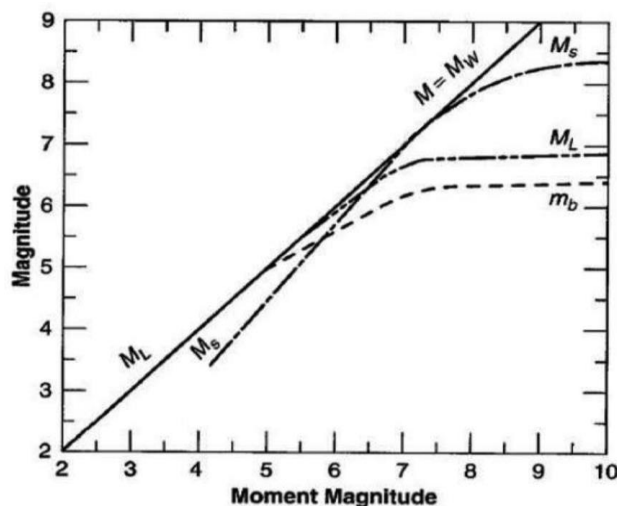
تبدیل M_L به M_w :

$$M_L = 3.73 \ln(M_w) - 0.51 \quad 4.5 \leq M_L \leq 7.5 \quad (6-3)$$

تبدیل M_N به M_L (امامی و همکاران):

$$M_N = 0.9177M_L + 0.6159 \quad 1 \leq M_L \leq 6.2 \quad (7-3)$$

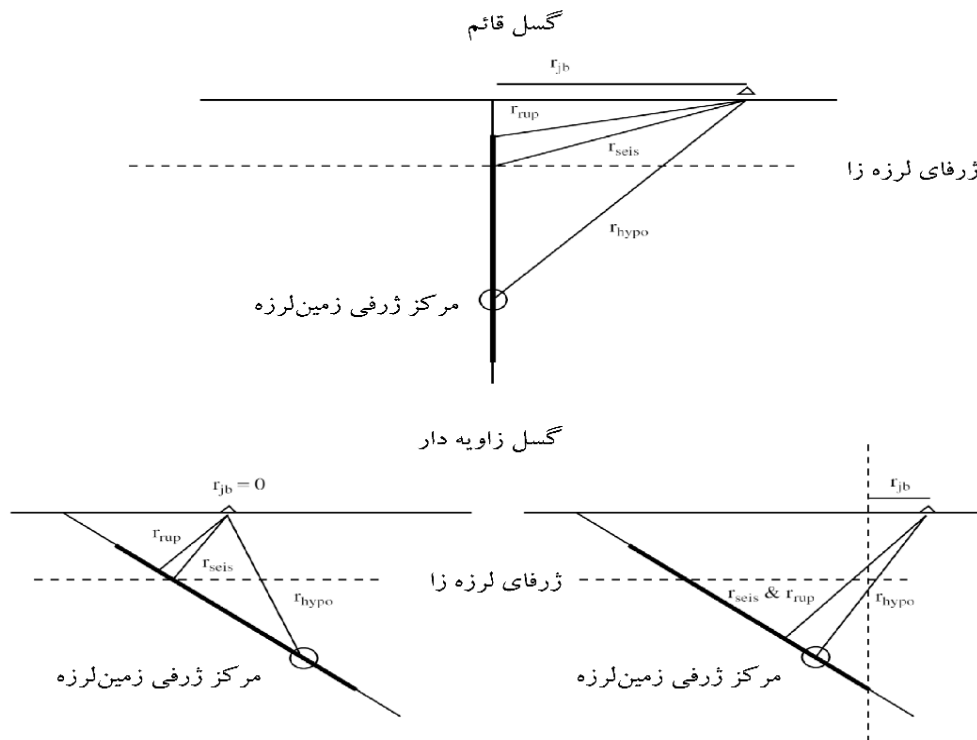
با توجه به محدودیت‌های مختلف در بزرگ‌های لرزه‌ای فوق، نیاز به بزرگایی است که برای کلیه بزرگاها، مکان‌ها و فاصله‌ها قابل استفاده باشد. به‌علاوه در بزرگ‌های لرزه‌ای فوق مشکل اشباع شدن به وجود می‌آید. به این معنی که هر بزرگا از یک مقدار مشخصی به بعد، ثابت می‌ماند و نمی‌تواند زلزله‌های بالاتر از زلزله‌ی حد اشباع را شناسایی کند. این موضوع در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. بنابراین نیاز به بزرگایی است که مشکل اشباع نداشته باشد. همچنین از آنجا که در زلزله‌های بسیار بزرگ بیشتر انرژی توسط امواج با فرکانس کوتاه‌تر آزاد می‌گردد، در نتیجه اکثر محققان ترجیح داده‌اند که برای تخمین انرژی آزاد شده از پارامترهای استاتیکی، نظیر گشتاور لرزه‌ای استفاده نمایند. این بزرگا براساس مفهوم گشتاور لرزه‌ای تعریف شده و کلیه نقایص فوق را مرتفع می‌سازد. بزرگای گشتاوری اساساً وابسته به جابه‌جایی گسل، سطح گسیختگی و خواص مصالح ناحیه شکست می‌باشد (Kramer, 1996)



شکل (۱-۳): اشباع شدگی انواع مختلف بزرگا (Kramer, 1996)

۳-۵- فاصله (R)

فاصله، دومین پارامتر مهم در جمع‌آوری کاتالوگ زلزله است. از آنجایی که این پارامتر مشخص‌کننده‌ی طول مسیر پیموده شده‌ی امواج از منبع لرزه‌زا تا سایت مورد نظر است، لذا پارامتری مهم و تاثیرگذار 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 از 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.



شکل (۳-۲): مقایسه‌ی انواع فواصل تعریف شده‌ی چشمه‌ی لرزه‌زا نسبت به ساختگاه (Abrahamson, N.A. et al., 1997)

۳-۶- پریود زلزله (T)

یکی از پارامترهای مستقل که گرچه مقداری خام می‌باشد ولی نمایان‌گر محتوی فرکانسی حرکت زمین است، پریود غالب می‌باشد. پریود غالب عبارت از پریود ارتعاش متناظر با مقدار مقدار ماکزیمم دامنه‌ی طیف فوریه می‌باشد. تعیین پریود غالب زمین در یک منطقه لرزه ای اهمیت زیادی دارد، زیرا بیشترین احتمال وجود دارد که این پریود با امواج لرزه ای ارتباط داشته باشد. هر قدر پریود غالب زلزله نزدیک به پریود مدهای ارتعاشی اصلی باشد احتمال تشدید بیشتر خواهد بود. سازه‌های با پریود مشابه ممکن است به هنگام وقوع زلزله به دلیل پدید تشدید در معرض آسیب قرار گیرد بنابراین تعیین پریود طبیعی ساختمان یکی از موارد مهم در بررسی پی سازه به شمار می‌آید تا بتوان بر اساس آن سازه‌ای ساخت که در رخداد زمین لرزه دچار پدیده ی تشدید نشود. پریود غالب زلزله به نوعی بیان‌گر محتوای فرکانسی تقریبی موج زلزله نیز می‌باشد. از این‌رو این پارامتر در برآورد تغییر مکان‌های ماندگار به روش تخمینی و نیز تعیین پارامترهای میرایی رایلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سیگنال به دست آمده از دستگاه لرزه‌سنجی بعد از حذف اثرات منبع، فرکانسی که دامنه‌ی آن به ماکزیمم مقدار خود رسیده باشد، به عنوان فرکانس غالب سازه معرفی می‌شود.

۳-۷- نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V)

در میان روش‌های تجربی، روش نسبت طیفی H/V بر روی نوفه‌های محیطی، یکی از روش‌های معمول مطالعه‌ی اثرات محلی ساختمان به حساب می‌آید. این روش، شامل محاسبه‌ی نسبت طیفی دامنه‌ی مؤلفه‌های افقی به قائم یک سیگنال است. این روش برای اولین بار توسط نوگوشی و ایگاراشی (۱۹۷۱) معرفی گردید (Noghoshi and Igarashi, 1971) و سپس توسط ناکامورا در سال ۱۹۸۶ به منظور بررسی

اثر ساختگاهی با استفاده از امواج میکروترمور به جامعه مهندسی معرفی گردید (Nakamura, 1989). گرچه ناکامورا (۱۹۸۹) روش H/V را باری میکروترمورها معرفی کرد ولی لرمو و چاوزگارسیا (۱۹۹۳) این روش را برای 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 (Lermo and Chavez-Garcia, 1993). روش نسبت طیفی H/V جهت برآورد فرکانس غالب در مناطقی که مشخصات و اطلاعات دقیق ژئوتکنیکی آن‌ها موجود نبوده و فقط ایستگاه‌های سه مؤلفه‌ای سطحی منفرد در آن‌ها موجود است، بسیار حائز اهمیت است. نسبت طیفی H/V بیانگر میزان تأثیر لایه‌های رسوبی بر امواج زمین‌لرزه می‌باشد. از لحاظ نظری مؤلفه‌ی قائم نداشت تحت تأثیر مشخصات رسوبی قرار نگرفته و این مؤلفه‌های افقی می‌باشند که 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 طیفی امواج افقی به امواج قائم به دست آمده پس از عبور از لایه‌های خاک بیانگر نحوه و تأثیر لایه‌های رسوبی بر روی امواج می‌باشد. بدین ترتیب برای هر نقطه به تنهایی و با ثبت سه مؤلفه‌ی حرکت زمین می‌توان تابع انتقال خاک را به دست آورد.

برای به‌دست آوردن نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) می‌توان مراحل انجام کار را به صورت کلی زیر بیان نمود:

(۱) تصحیح شتاب‌نگاشت‌ها

(۲) برآورد طیف دامنه‌ی مؤلفه‌های افقی و قائم و محاسبه‌ی نسبت آن‌ها و در صورت نیاز میانگین‌گیری از مؤلفه‌های افقی

(۳) نرم کردن نتایج

در این پژوهش، برای به دست آوردن رابطه‌ی سرعت موج برشی از روش الگوریتم توسعه‌ی ژنی با استفاده از نرم افزار GeneXproTools استفاده گردید که در ادامه به مفاهیم آن پرداخته می‌شود.

۳-۸- الگوریتم ژنتیک

به دلیل عدم سرعت مناسب و ناکارایی روش‌های کلاسیک در حل مسائل بهینه‌یابی با فضاهای طرح گسترده، استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی همچون منطق فازی^۲، شبکه‌های عصبی^۳، شبیه‌سازی بازپخت^۴ و روش الگوریتم‌های ژنتیکی^۵، برای حل این نوع مسائل بهینه‌یابی، گسترش فراوانی یافته‌اند. در این روش‌ها به جای کار کردن روی یک نقطه، مجموعه‌ای از نقاط در فضای طراحی در نظر گرفته می‌شوند. سپس این ابزارها به صورت مرحله به مرحله با سوق دادن این نقاط در جهت‌های مختلف برای یافتن جواب‌های بهینه و با قدرتی فراتر از آنچه در روش‌های کلاسیک موجود است، ما را یاری می‌دهند (Michalewics, 1992).

گستره‌ی وسیعی از مسائل بهینه‌یابی مهندسی و از جمله مسائل خاص مهندسی عمران توسط الگوریتم ژنتیک قابل حل می‌باشند. تحقیقات زیاد و پژوهش‌های متعددی در ایران و جهان با استفاده از این الگوریتم توانا جهت بهینه‌یابی مسائل مهندسی عمران انجام شده است.

۳-۹- تعریف بهینه‌یابی

² Fuzzy Logic

³ Neural Networks

⁴ Simulated Annealing

⁵ Genetic Algorithms

بهینه‌یابی عبارت است از: رسیدن به بهترین نتیجه در مورد یک عملیات، در حالی که محدودیت‌های مشخصی برآورده شده باشند. انسان محصور در طبیعت، مانند دیگر اجزای طبیعت، به طور ذاتی فعالیت-هایش را به شکلی انجام می‌دهد که دچار کمترین زحمت شده و کمترین انرژی را مصرف کند.

این تمایل و اراده در استفاده از منابع محدود موجود، به منظور بیشینه کردن خروجی یا سود می‌باشد. اختراع اولیه‌ی اهرم‌ها یا مکانیزم قرقره‌ها، به روشنی تمایل بشر را به افزایش بازدهی مکانیکی نشان می‌دهد. از این دست مثال‌ها در تاریخ بشریت بی‌شمار یافت می‌شوند. کتاب‌های داگلاس وایلد^۶ مجموعه‌ی جالبی در مورد ریشه‌ی کلمه‌ی بهینه و تعریف طراحی بهینه^۷ ارائه می‌دهد. تعریف وایلد از طراحی بهینه چنین است: بهترین طراحی قابل قبول بر اساس یک معیار کیفی برازندگی از پیش تعریف شده می‌باشد. از دیدگاه علوم ریاضی فرآیند محاسبه‌ی کمینه یا بیشینه یک تابع هدف را بهینه‌یابی گویند. بنابراین می‌توان بهینه-یابی را به عنوان فرآیند یافتن شرایطی که مقدار کمینه یا بیشینه‌ی یک تابع را به دست می‌آورد، تعریف نمود. اگر نقطه x منطبق بر مقدار کمینه‌ی $f(x)$ باشد، این نقطه بر مقدار بیشینه‌ی تابع $f(x)$ هم منطبق است. پس بدون از دست دادن کلیت، می‌شود بهینه‌یابی را به معنای کمینه‌یابی در نظر گرفت. زیرا بیشینه‌ی یک تابع را می‌توان با جستجوی کمینه‌ی منفی آن تابع پیدا کرد. مقادیر متغیرها از مجموعه‌ای به نام مجموعه‌ی مرجع انتخاب می‌شوند. بدیهی است که مجموعه‌ی مرجع بخشی از دامنه‌ی تابع هدف می‌باشد (صحرائیان، ۱۳۸۷).

۳-۹-۱- بهینه‌یابی با الهام‌گیری از طبیعت

^۶ Douglas Wilde

^۷ Optimal Design

بسیاری از سیستم‌های زنده و غیر زنده‌ی طبیعی، نسبت به سیستم‌های ساخت دست بشر، از لحاظ کارآرایی برتری کامل دارند. طراحان سیستم‌های ساخت دست بشر، خواه سیستم‌های مهندسی، رایانه‌ای و یا تجاری، در توانمندی، کارآرایی و انعطاف‌پذیری سیستم‌های زیستی در شگفت مانده‌اند.

ترکیبی از خود تعمیری، راهنمای خود بودن و تولید مثل، قوانینی در سیستم‌های زیستی می‌باشند. در حالی که این پارامترها را به زحمت می‌توان در اغلب سیستم‌های ساخت دست بشر یافت. بنابراین به این نتیجه جالب دست خواهیم یافت که جایی که توانمندی مورد نظر باشد، طبیعت آن را بهتر انجام می‌دهد و بهترین راه فراگیری سازش و بقاء، مطالعه‌ی دقیق نمونه‌های زیستی می‌باشد.

همین امر محققان را بر آن داشته که سیستم‌های طبیعی را به عنوان الگوی طراحی سیستم‌های مهندسی، مورد توجه قرار دهند. این گونه تلاش‌ها به ایجاد مجموعه روش‌های بهینه‌یابی الهام گرفته از طبیعت منجر شده است که به دو زیرمجموعه‌ی اصلی تقسیم می‌شود. این دو زیر مجموعه عبارتند از: روش‌های مبتنی بر جمعیت جاندار و روش‌های الهام گرفته از طبیعت.

اکثر روش‌های مبتنی بر طبیعت جاندار، از فرایند تکامل جانداران در طبیعت الگو می‌گیرند. در این فرایند، ویژگی‌های جانداران بهبود می‌یابد تا بهتر بتوانند با محیط سازگار شوند و در رقابت با جانداران دیگر برای دستیابی به منابع محدود طبیعت پیروز گردند. دو گروه عمده این زیر مجموعه، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تکاملی^۸ می‌باشند. در ادامه به طور مشروح به ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک خواهیم پرداخت. الگوریتم تکاملی شباهت زیادی به الگوریتم ژنتیک دارد (صحرائیان، ۱۳۸۷).

^۸ Evolution Algorithm

۳-۱۰- تاریخچه‌ی تکامل الگوریتم ژنتیک

این الگوریتم که بر اساس مکانیزم تکامل طبیعی پایه‌گذاری شده است، ابتدا توسط جان هالند^۹ در سال ۱۹۷۰ در دانشگاه میشیگان ایالات متحده ارائه شد و هدف از آن توصیف فرایندهای تطابق سیستم‌های طبیعی و طراحی نرم‌افزاری برای سیستم‌های مصنوعی‌ای که دارای مکانیزم سیستم‌های طبیعی هستند، بود. در سال ۱۹۷۵، دی جونگ^{۱۰} مدلی را به منظور انتخاب جمعیت جدید در این الگوریتم پیشنهاد داد. بریندل^{۱۱} در سال ۱۹۸۱ اصلاحات دیگری را برای انتخاب و نمونه‌گیری اعضای والد به صورت غیر تصادفی ارائه داد. بیکر^{۱۲} در سال ۱۹۸۷ یک روش نوین را به نام نمونه‌گیری جامع تصادفی^{۱۳} مطرح کرد. گلدبرگ^{۱۴} در سال ۱۹۸۸ الگوریتم ژنتیکی را که توسط هالند برای طراحی خاص ابداع شده بود، الگوریتم ژنتیک ساده خواند. زیرا این الگوریتم برای بهینه‌یابی کلی توابع ثابت و غیر تصادفی دارای معایبی بود. در الگوریتم ژنتیک ساده عملگر جهش وجود نداشت. گلدبرگ این عملگر را به الگوریتم ژنتیک ساده افزود. وی هم‌چنین عملگر جدیدی به نام عملگر برگردانی یا معکوس^{۱۵} را پیشنهاد نمود (Goldberg, 1989). کوزا^{۱۶} در سال ۱۹۹۰ برنامه‌های تکاملی^{۱۷} را پایه‌ریزی نمود و گلور^{۱۸} در سال ۱۹۹۱ برای تسریع همگرایی الگوریتم، روش الگوریتم ژنتیک وفقی را که در آن عملگر جهش به صورت دینامیکی تغییر می‌کرد، ارائه کرد (Michalewics, 1992).

⁹ John Holland

¹⁰ Dejong

¹¹ Brindle

¹² Baker

¹³ Stochastic Universal Sampling

¹⁴ Goldberg

¹⁵ Inversion

¹⁶ Koza

¹⁷ EP

¹⁸ Glover

الگوریتم توسعه ژنی^{۱۹} (GEP) که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا^{۲۰} ابداع شد، مانند الگوریتم ژنتیک^{۲۱} (Gas) و برنامه‌نویسی ژنتیکی^{۲۲} (GP) یک الگوریتم ژنتیکی است که از افراد به عنوان جمعیت استفاده می‌کند. افراد را با توجه به برازندگی انتخاب می‌کند و تنوع ژنتیکی را با استفاده از یک یا چند اپراتورهای ژنتیکی معرفی می‌کند. تفاوت اساسی بین این سه الگوریتم در ماهیت افراد است، به طوری که در الگوریتم ژنتیک (Gas) افراد رشته‌های خطی با طول ثابت هستند که به آن کروموزوم گفته می‌شود؛ در برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) افراد نهادی غیر خطی از اندازه‌ها و اشکال مختلف هستند که به آن درخت تجزیه^{۲۳} گفته می‌شود و در الگوریتم توسعه ژنی (GEP) افراد به صورت رشته‌های خطی با طول ثابت (کروموزوم) که بعداً به عنوان نهادهای غیرخطی از اندازه‌ها و اشکال مختلف بیان می‌شوند (درختان توسعه^{۲۴}) برنامه‌نویسی می‌شوند (Ferreira, 2001a).

با یک دید کلی مشاهده می‌شود که تفاوت بین الگوریتم ژنتیک (Gas) و برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) کاملاً سطحی است. هر دو سیستم تنها از یک نوع نهاد استفاده می‌کنند که هر دو به عنوان ژنوم و بدن عمل می‌کنند. این نوع سیستم‌ها هر کدام دارای محدودیت هستند:

در نمونه‌های الگوریتم ژنتیک (Gas)، اگر دستکاری ژنتیکی به راحتی انجام شود، پیچیدگی‌های عملکردی خود را از دست می‌دهند.

در نمونه‌های برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP)، اگر بیش از یک مقدار معینی از پیچیدگی‌های عملکردی را ارائه دهند، دوباره ساختن آن با اصلاحات مورد نظر بسیار دشوار است.

¹⁹ Gene Expression Programming

²⁰ Ferreira

²¹ Genetic Algorithms

²² Genetic Programming

²³ Parse Tree

²⁴ Expression Trees

تعامل کروموزوم‌ها و درختان توسعه در الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، یک سیستم ترجمه صریح را برای ترجمه زبان کروموزوم‌ها به زبان درختان توسعه (ETs) نشان می‌دهد. ساختار سازمان‌یافته کروموزوم‌ها در الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، یک رابطه فنوتیپ کاملاً کارآمد است، همان‌طور که هرگونه اصلاحاتی که در ژنوم ایجاد شده همیشه از درختان توسعه (ETs) یا برنامه‌های صحیح، درست استفاده شده است. در واقع، مجموعه‌ای متنوع از اپراتورهای ژنتیکی که برای معرفی تنوع ژنتیکی در جمعیت الگوریتم توسعه ژنی (GEP) ایجاد شده، همیشه درختان توسعه (ETs) معتبر را تولید می‌کنند. بنابراین، الگوریتم توسعه ژنی (GEP) یک سیستم زندگی مصنوعی است که فراتر از یک سیستم صرفاً کپی‌کننده است، که قادر به انطباق و تکامل است.

مهم‌ترین مزایای استفاده از یک سیستم مانند الگوریتم توسعه ژنی (GEP) عبارتند از:

- ۱- کروموزوم‌ها؛ نهادهای ساده هستند: خطی، فشرده، نسبتاً کوچک، دستکاری ژنتیکی آسان (تکثیر، جهش، ترکیب دوباره، حمل و نقل و ...)؛
 - ۲- درختان توسعه (ETs)؛ منحصراً بیان کروموزوم‌های مربوطه می‌باشند؛ نهادهایی هستند که بر اساس انتخاب آنها عمل می‌کنند و با توجه به انطباق، آنها با اصلاح انتخاب می‌شوند.
- با توجه به این ویژگی‌ها، الگوریتم توسعه ژنی (GEP) بسیار متنوع است و بسیار پیشرفته‌تر از فناوری‌های تکاملی موجود است.

۳-۱۱- مفاهیم اولیه‌ی الگوریتم توسعه ژنی

الف) جمعیت

در الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، برای هر مسأله تعدادی جواب ممکن وجود دارد که بهترین جواب از بین آن‌ها انتخاب می‌شود. به مجموعه‌ی این جواب‌ها جمعیت می‌گویند.

ب) فرد

به هر یک از جواب‌های ممکن در الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، فرد می‌گویند.

پ) ژنوتیپ^{۲۵}

به تمام اطلاعات ژنتیکی یک فرد یا قسمتی از آن ژنوتیپ می‌گویند.

ت) فنوتیپ^{۲۶}

به صفات ظاهری یک موجود زنده فنوتیپ می‌گویند که در حقیقت منعکس‌کننده‌ی نتایج برهم‌کنش یا تعامل جنس نمونه و محیط زیست موجود مزبور هستند.

ث) تابع برازندگی^{۲۷}

تابع برازندگی تابعی است که هدف مسائل بهینه کردن آن است. در بعضی از توابع، از آن به عنوان تابع هدف نیز استفاده می‌شود.

ج) کدان^{۲۸}

کدان واحد اصلی رمز ژنتیک است که شامل توالی سه‌گانه نوکلئوتیدی‌های اصلی می‌باشد.

²⁵ Genotype

²⁶ Phenotype

²⁷ Fitness Function

²⁸ Codon

چ) والدین

الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، در هر نسل برای ایجاد نسل بعد از خود، تعداد مشخصی از افراد را که معمولاً دارای برازندگی بهتری هستند، انتخاب می‌کند. به این افراد انتخاب شده والدین می‌گویند.

ح) فرزندان

به افرادی که در نسل جدید تشکیل می‌شوند، فرزندان می‌گویند.

خ) آرگومان^{۲۹}

به تعداد شاخه‌هایی که از هر گره در درخت توسعه (ET) انشعاب پیدا می‌کند، آرگومان می‌گویند.

د) ترانسپوزون^{۳۰}

به اعضای که قابلیت جابه‌جایی دارند و یا توالی‌هایی از DNA هستند که مکان خود را روی ژنوم عوض می‌کنند.

۳-۱۲- الگوریتم توسعه ژنی

نمودار جریان یک الگوریتم توسعه ژنی (GEP) در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. این فرایند با تولید تصادفی از کروموزوم‌های جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس کروموزوم‌ها بیان می‌شوند و برازندگی هر فرد ارزیابی می‌شود. بعد از آن، افراد با توجه به برازندگی به منظور تولید دوباره با اصلاحات انجام شده، انتخاب

²⁹ Argument

³⁰ Transposon

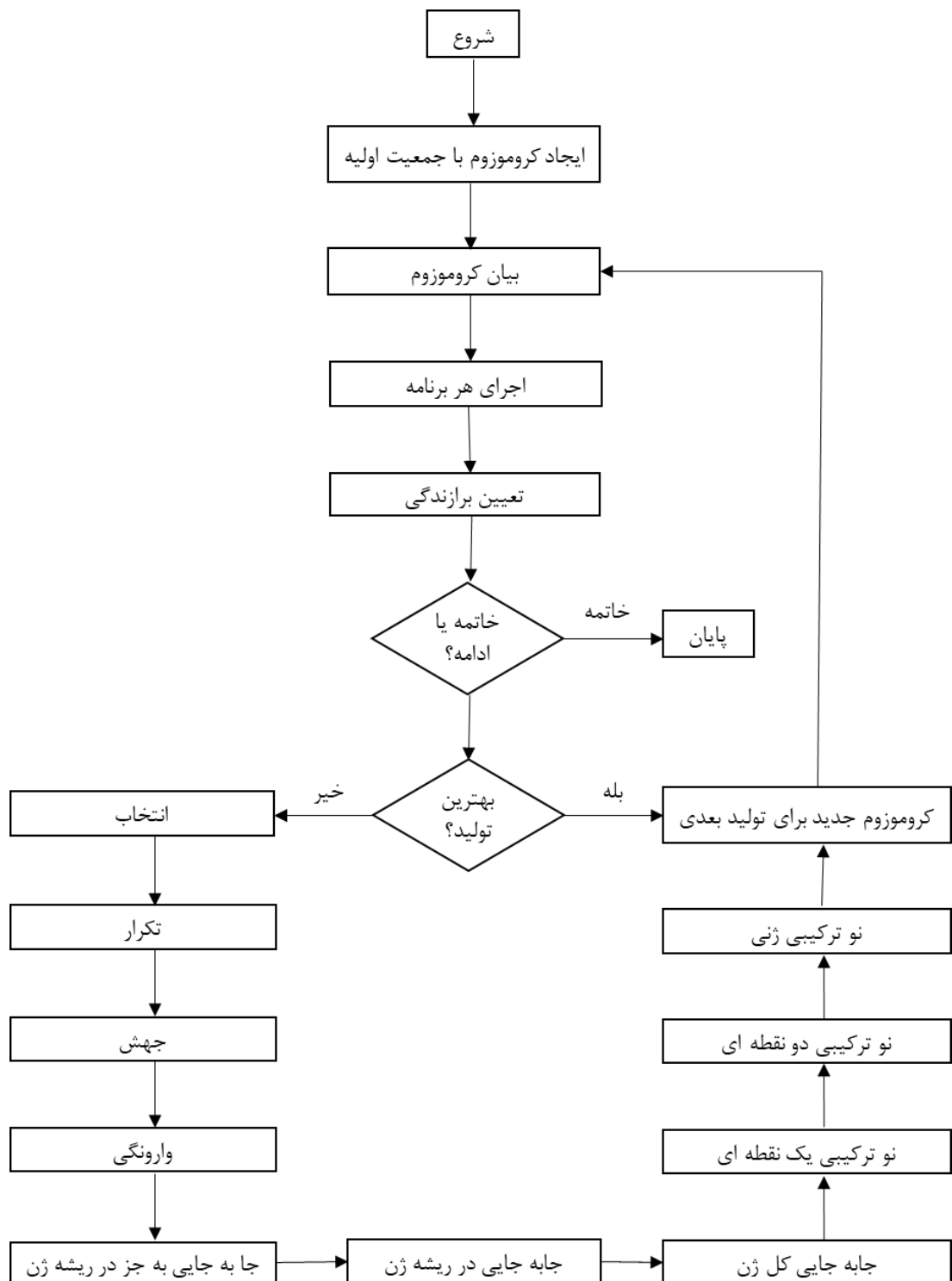
می‌شوند و فرزندان با صفات جدید به وجود می‌آورند. افراد این نسل جدید به نوبه‌ی خود تحت فرایند تکاملی مشابه قرار می‌گیرند:

۱- بیان ژنوم‌ها؛

۲- مقابله با محیط انتخابی؛

۳- تولید دوباره با اصلاحات انجام شده.

این روند برای تعداد مشخصی از نسل‌ها تکرار می‌شود یا آن‌قدر تکرار می‌شود تا زمانی که یک راه حل مناسب پیدا شود (Ferreira, 2001a).



شکل (۳-۳) فلوچارت الگوریتم توسعه‌ی ژنی (Ferreira, 2001)

توجه به این نکته ضروری است که بازتولید تنها شامل تکرار نیست، بلکه شامل عمل اپراتورهای ژنتیکی است که قادر به ایجاد تنوع ژنتیکی هستند. در طی تکرار، ژنوم کپی می‌شود و به نسل بعدی منتقل می‌شود. بدیهی است، تکرار تنها نمی‌تواند تنوع را معرفی کند، تنها با عمل اپراتورهای باقی‌مانده تنوع ژنتیکی به جمعیت می‌رسد. این اپراتورها به‌طور تصادفی کروموزوم‌هایی را که باید اصلاح شوند، انتخاب می‌کنند. بنابراین، در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP)، یک کروموزوم ممکن است توسط یک یا چند اپراتور در یک زمان اصلاح شود یا اصلاً اصلاح نشود (Ferreira, 2001).

۳-۱۲-۱- ژنوم

ژنوم یا کروموزوم شامل یک رشته‌ی خطی و نمادین با طول ثابت است که از یک یا چند ژن تشکیل شده است. در ادامه نشان داده خواهد شد که با وجود طول ثابت، کروموزوم‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی می‌توانند درختان توسعه را با اندازه‌ها و اشکال مختلف کدگذاری کنند.

۳-۱۲-۲- خواندن آزاد چارچوب‌ها و ژن‌ها

ساختار سازمان‌یافته ژن‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP)، از روش خواندن آزاد چارچوب‌ها^{۳۱} (ORFs) بهتر قابل درک است. در زیست‌شناسی، یک خواندن آزاد چارچوب (ORF) یا توالی کدگذاری یک ژن، با کدان "شروع" آغاز می‌شود، با کدان‌های اسید آمینه ادامه می‌یابد و با کدان "پایان" خاتمه پیدا می‌کند.

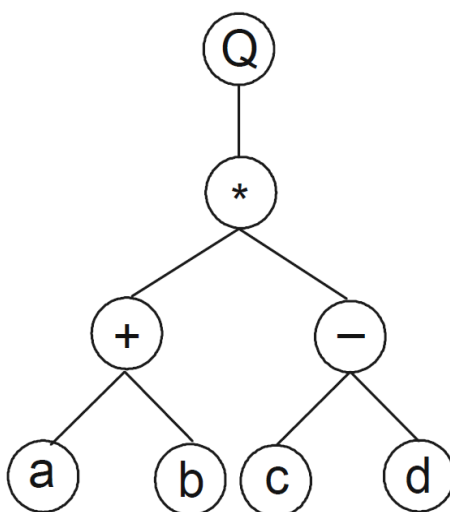
³¹ Open Reading Frames

در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) همیشه نقطه‌ی شروع از ابتدای یک ژن است ولی نقطه‌ی انتهایی آن ممکن است همیشه با انتهای ژنی هم‌خوانی نداشته باشد. برای ژن‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) رایج است که مناطق کدگذاری نشده از نقطه پایان فراتر می‌روند ولی چون در توسعه‌ی کار تأثیری ندارند، آن‌ها را در نظر نمی‌گیریم (Ferreira, 2001).

به‌عنوان مثال، عبارت جبری را در نظر بگیرید:

$$\sqrt{(a+b)^2 + (c-d)^2} \quad (۸-۳)$$

که درخت توسعه‌ی آن به شکل زیر است:



شکل (۴-۳): درخت توسعه معادله (۸-۳) (Ferreira, 2001)

Q نشان‌دهنده عملگر رادیکال است. خواندن درست درخت توسعه به صورت چپ به راست و از بالا به پایین است. این نوع نمایش نمودار در واقع فنوتیپ افراد در الگوریتم توسعه ژنی (GEP) است، که به‌صورت زیر از ژنوتیپ به‌راحتی می‌توان به این نتیجه رسید:

0 1 2 3 4 5 6 7

$Q^* + - a b c d$

شکل (۵-۳): ژن معادله (۸-۳) (Ferreira, 2001)

شکل (۵-۳) خواندن آزاد چارچوب (ORF) است، از Q در موقعیت صفر شروع شده و به d در موقعیت ۷

ختم می‌شود. فریرا این ORF را K -expressions نامید (Ferreira, 2001).

معکوس روش بالا، یعنی تبدیل K -expressions به درخت توسعه نیز ساده است.

K -expressions زیر را در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

$Q^* + * a * Q a a b a$

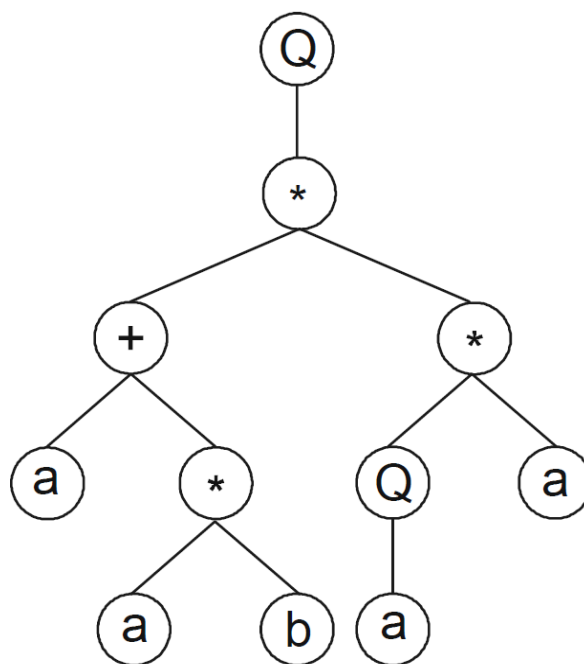
شکل (۶-۳): ژن معادله K -expressions (Ferreira, 2001)

موقعیت شروع (موقعیت ۰) ریشه‌ی درخت توسعه است. سپس، زیر ریشه، هر تابع براساس ظرفیتی که دارد

آرگومان تعریف می‌شود، این کار تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که در انتهای درخت فقط ترمینال (متغیرها

یا ثابت‌هایی که در هر مسأله تعریف می‌شوند) استفاده می‌شوند. آرگومان در ترمینال‌ها برابر صفر در نظر

گرفته می‌شود. در این مورد، درخت توسعه به صورت زیر تشکیل شده است:



شکل (۳-۷): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۳-۴) (Ferreira, 2001)

اگر فقط به ساختار خواندن آزاد چارچوب‌ها (ORFs) در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) توجه شود، به‌غیر از موارد ساده و ابتدایی، دیدن مزایای استفاده از چنین روشی، سخت یا حتی غیرممکن است. اما، هنگامی که خواندن آزاد چارچوب‌ها (ORFs) در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل یک ژن استفاده شوند، مزایای چنین روشی آشکار می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، کروموزوم در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) دارای طول ثابت است و از یک یا چند ژن مساوی تشکیل شده است. به‌همین ترتیب طول ژن نیز ثابت می‌شود. بنابراین، در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP)، چیزی که تغییر می‌کند، طول ژن نیست، بلکه طول ORF‌ها است. در واقع طول ORF ممکن است برابر یا کمتر از طول ژن باشد. در مورد اول، نقطه‌ی پایان با انتهای ژن منطبق است و در مورد دوم، نقطه پایان در محلی از انتهای ژن است.

۳-۱۲-۳- ژن‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی

ژن‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) از سر^{۳۲} و دم^{۳۳} تشکیل می‌شوند. سر حاوی نمادهایی است که نشان‌دهنده‌ی توابع (با F نمایش داده می‌شود) و ترمینال‌ها (با T نمایش داده می‌شود) است، در حالی که دم تنها شامل ترمینال‌ها است. بنابراین دو الفبای مختلف در مناطق مختلف در یک ژن اتفاق می‌افتد. برای هر مسأله، طول سر برابر با (h) و طول دم برابر با (t) انتخاب می‌شود که تابعی از طول سر می‌باشد و تعداد آرگومان‌های تابع با آرگومان بیشتر (n) است و توسط معادله زیر ارزیابی می‌شود:

$$t = h(n - 1) + 1 \quad (۹-۳)$$

ژنی با تابع و ترمینال‌های مقابل در نظر بگیرید:

$$F=\{Q, *, /, -, +\} \quad T=\{a, b\} \quad (۱۰-۳)$$

در این جا $n = ۲$ گرفته شد و به‌عنوان نمونه $h = ۱۰$ و $t = ۱۱$ در نظر گرفتیم. از مجموع طول سر و طول دم، طول ژن (A) به‌دست می‌آید. پس با توجه به فرمول زیر طول ژن برابر با ۲۱ می‌شود:

$$A = h + t = 10 + 11 = 21 \quad (۱۱-۳)$$

یکی از این ژن‌ها در زیر نشان داده شده که دم این ژن به‌صورت پررنگ‌تر نوشته شده است:

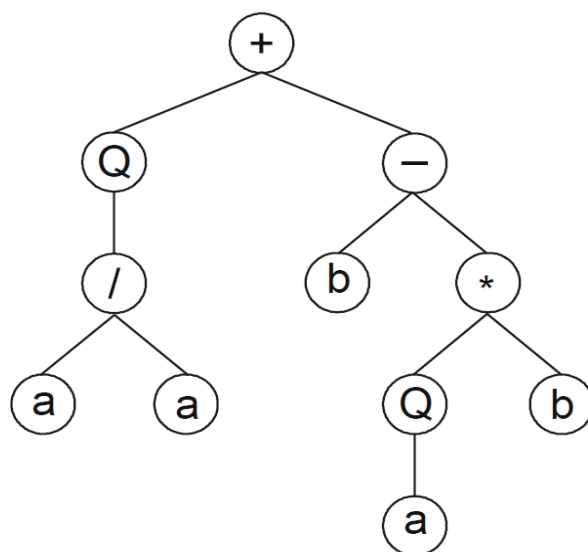
$$\begin{array}{cccccccccccccccccccc} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 0 \\ + & Q & - & / & b & * & a & a & Q & b & a & a & b & a & a & b & b & a & a & a & b \end{array}$$

شکل (۸-۳): ژن با طول ژن ۲۱، طول سر ۱۵ و طول دم ۱۱ (Ferreira, 2001)

درخت توسعه‌ی آن نیز به‌صورت زیر رسم شده است:

³² Head

³³ Tail



شکل (۳-۹): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۳-۸) (Ferreira, 2001)

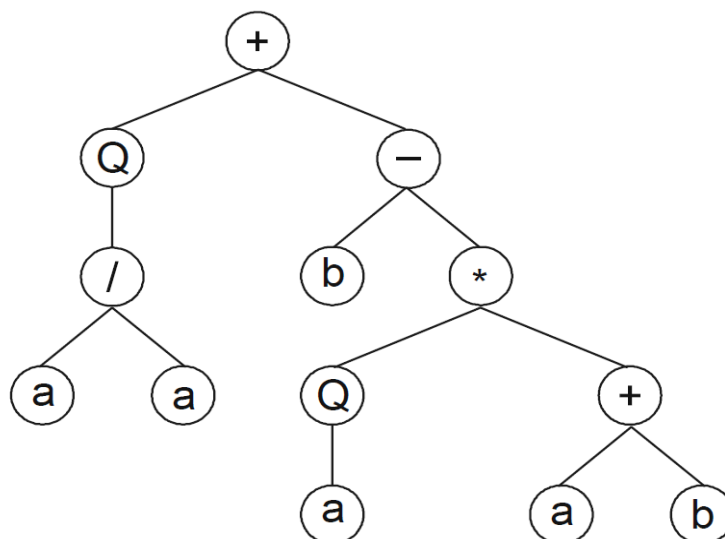
در این مورد، ORF در موقعیت ۱۰ پایان یافته در حالی که انتهای ژن در موقعیت ۲۰ است.

فرض کنید یک جهش در موقعیت ۹ رخ داده است و "b" به "+" تغییر پیدا می‌کند. سپس ژن زیر به- دست می‌آید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0
 + Q - / b * a a Q + a a b a a b b a a a b

شکل (۳-۱۰): ژن جدید ایجاد شده از ژن شکل (۳-۸) (Travasari et al., 2003)

درخت توسعه‌ی آن نیز به صورت زیر رسم شده است:



شکل (۱۱-۳): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۱۰-۳) (Ferreira, 2001)

در این مورد، موقعیت پایان دو واحد به سمت راست یعنی به موقعیت ۱۲ انتقال می‌یابد.

حال تغییراتی در ژن شکل (۶-۳) اعمال می‌کنیم. بدین صورت که در موقعیت ۷ و ۸ نمادها را به ترتیب

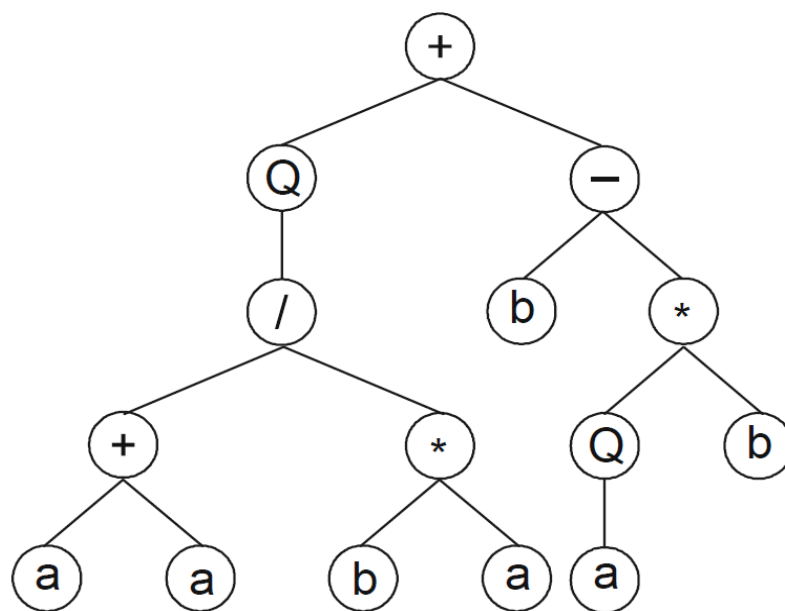
به "+" و "*" تغییر می‌دهیم. ژن حاصل به صورت زیر به دست می‌آید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

+ Q - / b * + * Q b a a b a a b b a a a b

شکل (۱۲-۳): ژن جدید ایجاد شده از ژن شکل (۶-۳) (Ferreira, 2001)

درخت توسعه‌ی آن نیز به صورت زیر رسم شده است:



شکل (۳-۱۳): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۳-۱۲) (Ferreira, 2001)

در این مورد، موقعیت پایان چند واحد به سمت راست یعنی به موقعیت ۱۴ انتقال می‌یابد.

برعکس این عمل نیز ممکن است اتفاق بیفتد و ORF کوچک‌تر شود. به عنوان مثال ژن شکل (۳-۶) را

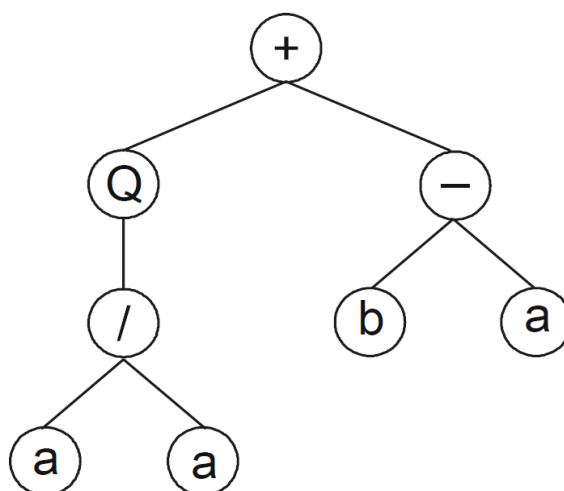
در نظر بگیرید که جهش در موقعیت ۵ اتفاق بیفتد و "*" به "a" تبدیل شود:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

+ Q - / b a a a Q b a a b a a b b a a a b

شکل (۳-۱۴): ژن جدید ایجاد شده از ژن شکل (۳-۸) (Ferreira, 2001)

درخت توسعه آن نیز به صورت زیر رسم شده است:



شکل (۳-۱۵): درخت توسعه‌ی ژن شکل (۳-۱۴) (Ferreira, 2001)

در این مورد، ORF در موقعیت ۷ پایان یافته و از ژن اصلی ۳ گره کوچک‌تر شده است.

هر ژن با وجود طول ثابت، پتانسیل کدگذاری درختان توسعه در اندازه‌ها و اشکال مختلف را دارا است، ساده‌ترین نوع آن از یک گره تشکیل شده است (در این‌صورت اولین عضو یک ژن یک ترمینال است) و بزرگ‌ترین نوع آن از تعداد زیادی گره به عنوان طول ژن تشکیل شده است.

از مثال‌های بالا می‌توان دریافت که هرگونه تغییر در ژنوم، بدون توجه به اینکه چقدر عمیق است، همیشه یک درخت توسعه مختص به خود را دارد.

۳-۱۲-۴- کروموزوم‌های چند ژنی

کروموزوم در الگوریتم توسعه ژنی (GEP) معمولاً از بیش‌تر از یک ژن با طول مساوی تشکیل شده است. برای هر مسأله یا برای ران گرفتن، تعداد ژن‌ها براساس طول سر خود انتخاب شده‌اند. هر کدام از ژن‌ها

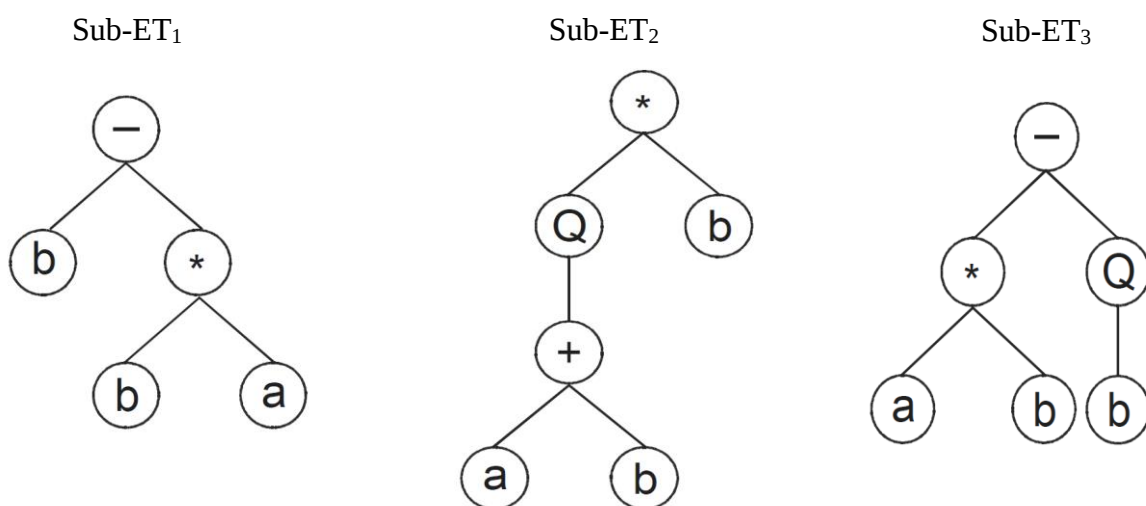
دارای یک زیردرخت توسعه (Sub-ET) که با یکدیگر ارتباط برقرار می کنند و یک درخت توسعه‌ی چند واحدی پیچیده (Multi-coupled ET) را تشکیل می دهند.

به عنوان مثال کروموزم زیر را با طول ۲۷ در نظر بگیرید که از ۳ ژن تشکیل شده است (دماها پررنگ تر نوشته شده است):

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

- b * b a b b a b * Q b + a b b b a - * Q a b b a b a

شکل (۳-۱۶): کروموزوم تشکیل شده از ۳ ژن (Ferreira, 2001)



شکل (۳-۱۷): درخت توسعه‌ی ژن های شکل (۳-۱۶) (Ferreira, 2001)

همچنین دارای ۳ ORF است که برای هر کدام از این ها کدگذاری انجام شده است. در شکل (۳-۱۶) موقعیت صفر نشان دهنده شروع هر ژن است و پایان هر ORF فقط بر روی ساختار زیردرخت توسعه (Sub-ET) مربوط به خود قابل مشاهده است. همان طور که در شکل (۳-۱۷) مشخص است، اولین ORF در موقعیت ۴ زیردرخت توسعه‌ی اول (Sub-ET1) پایان می یابد. ORF دوم در موقعیت ۵ زیردرخت توسعه‌ی دوم (Sub-

ET2) به پایان می‌رسد و آخرین ORF نیز در موقعیت ۵ زیردرخت توسعه‌ی سوم (Sub-ET3) به پایان می‌رسد. بنابراین، کدگذاری کروموزوم‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) برای یک یا چند ORF با هر زیردرخت توسعه‌ی (Sub-ET) مختص به خود بیان می‌شود. بسته به نوع مسأله، این زیردرختان توسعه‌ی (Sub-ETs) ممکن است به‌طور جداگانه بسته به برازندگی خود انتخاب شوند.

۳-۱۲-۵- فنوتیپ و درختان توسعه

در طبیعت، فنوتیپ دارای سطوح پیچیده‌ی مختلفی است، که به ارگانیزم تبدیل می‌شوند. مثل پروتئین‌ها، ریبوزوم‌ها، سلول‌ها که همه‌ی آنها در نهایت در ژنوم رمزگذاری می‌شوند. در تمام موارد، بیان اطلاعات ژنتیکی با رونویسی ژن‌های پروتئین شروع می‌شود و با ترجمه (سنتز پروتئین‌ها) ادامه می‌یابد.

۳-۱۲-۵-۱- اطلاعات کدگذاری، ترجمه

در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP)، از ساده‌ترین فرد تا پیچیده‌ترین، بیان اطلاعات ژنتیکی با ترجمه و انتقال اطلاعات از یک ژن به درخت توسعه‌ی (ET) آغاز می‌شود. در این فرایند کدگذاری ژن‌ها در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) نشان داده شده است. در مقابل طبیعت، بیان اطلاعات ژنتیکی در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) بسیار ساده است. درواقع نکته‌ی مهم این است که در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP)، نیازی به رونویسی وجود ندارد، یعنی پیام در ژن به‌طور مستقیم به درخت توسعه‌ی (ET) ترجمه می‌شود.

کروموزوم در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) از یک یا چند ORF تشکیل شده است و بدیهی است که کدگذاری در افراد، دارای سطوح مختلف پیچیدگی است. ساده‌ترین افراد در یک ژن تنها، کدگذاری می‌شوند

و "ارگانیزم" در این مورد (محصول یک ژن تنها) یک درخت توسعه (ET) است. در برخی موارد، ارگانیزم یک زیر درخت توسعه‌ی چندگانه (multi-submit ET) است که در آن زیردرختان توسعه‌ی مختلف (Sub-ETs) توسط یک تابع مشخص مرتبط می‌شوند. در برخی موارد دیگر، ارگانیزم از ساختار فضایی زیردرختان توسعه‌ی مختلف (Sub-ETs) تشکیل می‌شود (به‌عنوان مثال، در برنامه‌ریزی و مسائل، با خروجی‌های چندگانه). در مواردی هم، ارگانیزم از ارتباطات زیردرختان توسعه‌ی قراردادی (Sub-ETs) با دامنه‌های مختلف (به‌عنوان مثال، شبکه‌های عصبی) تشکیل می‌شود. با این حال، در همه موارد، کل ارگانیزم در یک ژنوم خطی کدگذاری می‌شود.

۳-۱۲-۵-۲- تعاملات در زیر درختان توسعه

همان‌طور که مشاهده شد، نتایج ترجمه‌ی در شکل‌گیری زیردرختان توسعه (Sub-ETs) با پیچیدگی‌های مختلف دیده می‌شود، اما حالت کامل اطلاعات ژنتیکی نیازمند تعامل این زیردرختان توسعه (Sub-ETs) توسط یک تابع مشخص است.

هنگامی که زیردرختان توسعه (Sub-ETs) به‌صورت عبارت‌های جبری یا بولی^{۳۴} باشند، هر تابع ریاضی یا بولی با بیش از یک روش می‌تواند برای پیوند زیردرختان توسعه (Sub-ETs) به یک زیر درخت توسعه‌ی چندگانه (multi-submit ET) استفاده شود. بیشتر توابع انتخابی در زیردرختان توسعه‌ی جبری "جمع" و "ضرب" هستند و در زیردرختان توسعه‌ی بولی از "OR" یا "IF" استفاده می‌شود.

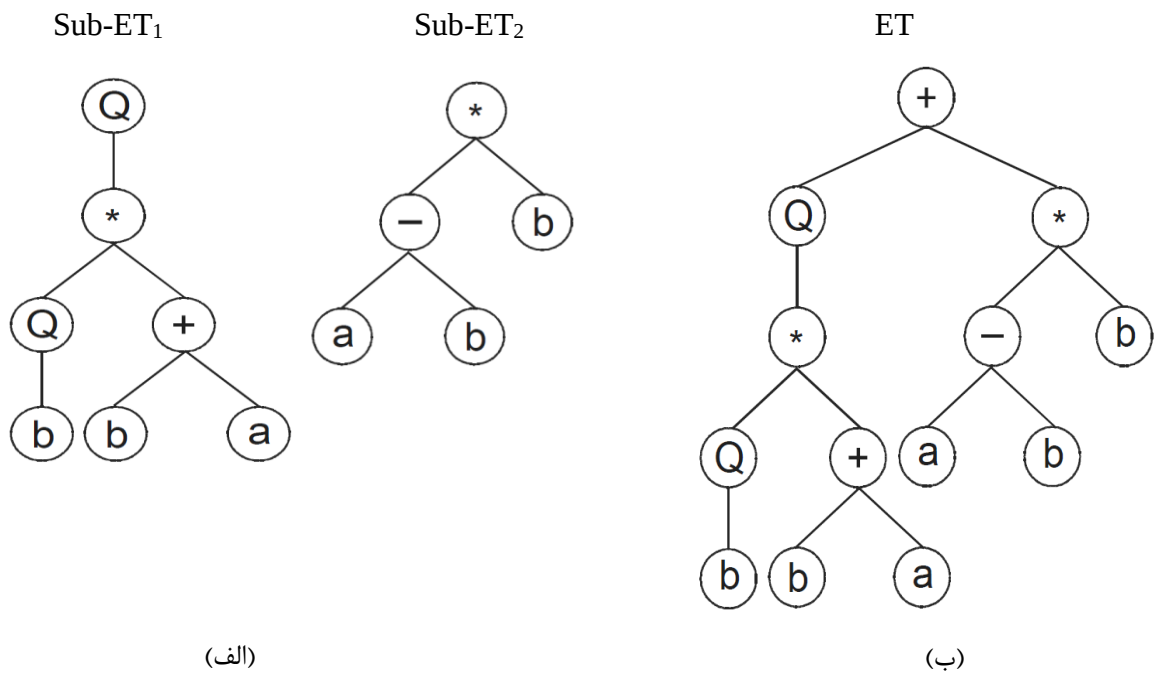
³⁴ Boolean

شکل (۱۷-۳) یک کروموزوم ۲ ژنی را نشان می‌دهد که در آن دماها پررنگ‌تر نوشته شده‌اند و شکل (۱۸-۳) اتصال دو زیردرخت توسعه (Sub-ET) را با تابع "جمع" نشان می‌دهد. باید به این نکته توجه داشت که ریشه‌ی درخت توسعه‌ی نهایی (+) توسط ژنوم کدگذاری نمی‌شود.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

Q * Q + b b a a a * - b a b a a b b

شکل (۱۷-۳): کروموزوم ۲ ژنی (Ferreira, 2001)



شکل (۱۸-۳): (الف) درخت توسعه‌ی هر کدام از ژن‌ها (ب) درخت توسعه‌ی نهایی بعد از ترجمه و استفاده از تابع اتصال جمع (Ferreira, 2001)

همچنین درخت توسعه‌ی نهایی می‌تواند به صورت K-expression زیرخطی کدگذاری شود:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2

+ Q * * - b Q + a b b b a

شکل (۳-۱۹): K-expression درخت توسعه‌ی شکل (۳-۱۸) (ب) (Ferreira, 2001)

با این حال، برای محاسبه‌ی راه حل مسائل پیچیده، استفاده از کروموزوم‌های چندگانه بیش‌تر مؤثر است. زیرا آن‌ها اجازه‌ی ساخت ساختار پیچیده و سلسله‌مراتبی را می‌دهند، جایی که هر ژن برای یک بلوک کوچک کدگذاری می‌کند.

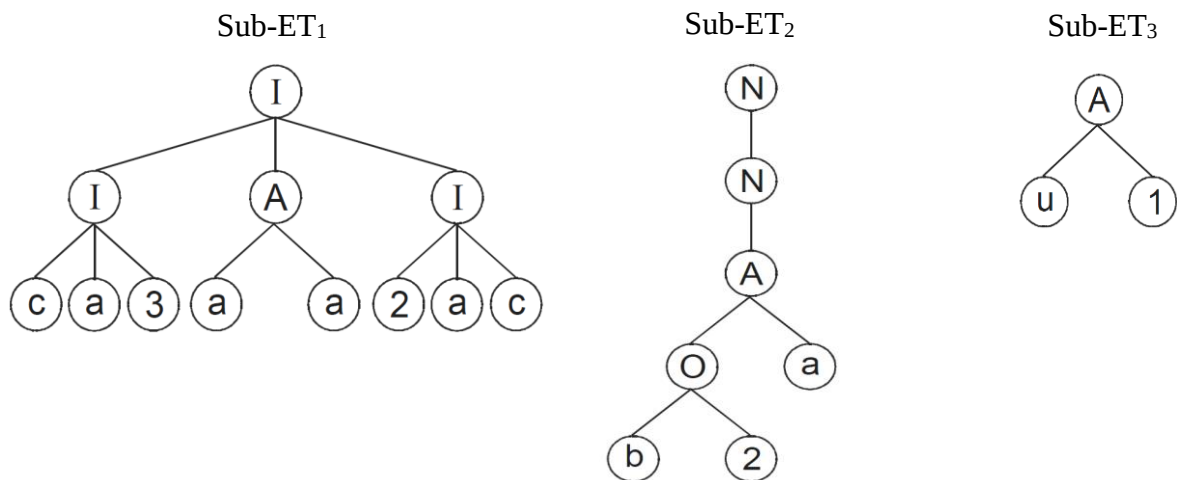
این بلوک‌های کوچک از یکدیگر جدا می‌شوند، بنابراین می‌توانند مستقل باشند. به‌عنوان مثال، اگر سعی شود یک راه حل برای مسأله رگرسیون نمادین تک ژنی ایجاد شود، میزان موفقیت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این صورت پیدا کردن بلوک‌های کوچک با محدودیت بیشتر مواجه می‌شود، زیرا آن‌ها دیگر به طور مستقل نمی‌توانند تکامل پیدا کنند. این نوع آزمایش نشان می‌دهد که الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) یک سیستم اختراع سلسله‌مراتبی قدرتمند است که به راحتی قادر به محاسبه‌ی بلوک‌های ساده و استفاده از آن‌ها در ساختارهای پیچیده‌تر است (Ferreira, 2001).

شکل (۳-۲۰) مثال دیگری از تعاملات زیردرختان توسعه هست. در این مثال از ۳ زیردرخت توسعه بولی با تابع اتصال "IF" استفاده شده است.

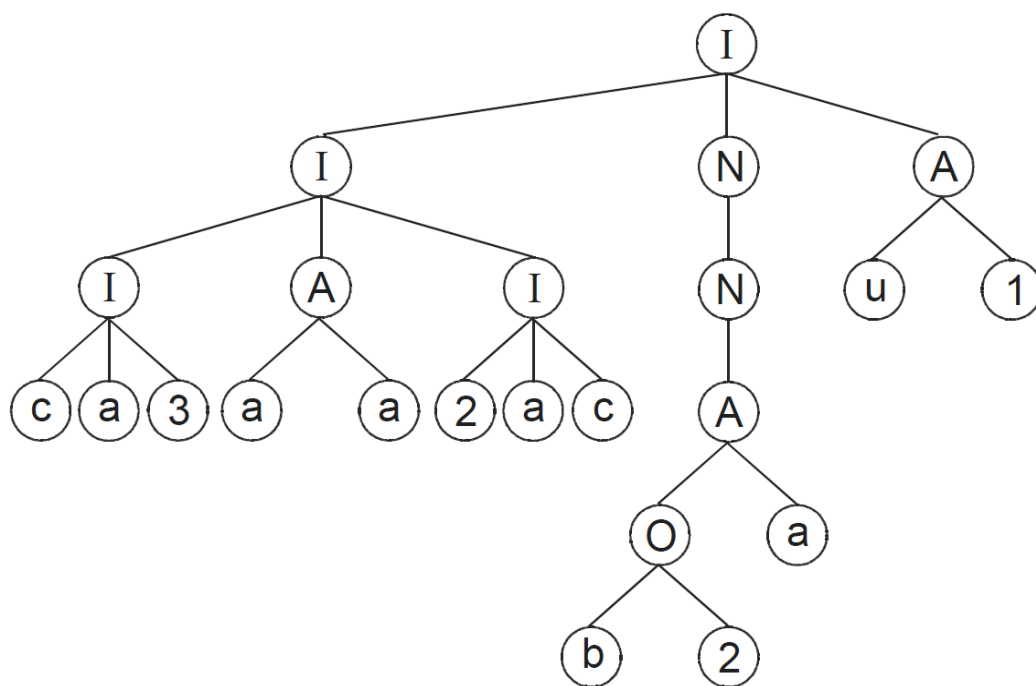
01 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2

I I A I c a 3 a a 2 a c u N N A O a b 2 u 3 c 3 1 c A u 1 2 u a 3 1 1 2 c a c

شکل (۳-۲۰): کروموزوم بولی ۳ ژنی (Ferreira, 2001)



شکل (۳-۲۱): درخت توسعه‌ی هر کدام از ژن‌ها (Ferreira, 2001)



شکل (۳-۲۲): درخت توسعه‌ی نهایی بعد از ترجمه و استفاده از تابع اتصال جمع (Ferreira, 2001)

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2

I I N A I A I N u 1 c a 3 a a 2 a c A O a b 2

شکل (۳-۲۳): K-expression درخت توسعه‌ی شکل (۳-۲۲) (Ferreira, 2001)

در نهایت، بیان کامل کروموزوم‌ها نیازمند به اجرای پیوسته‌ی برنامه‌های کوچک است، بدین صورت که اولین زیردرخت توسعه (Sub-ET) کمی کار انجام می‌دهد، دومی از ادامه آن شروع به کار می‌کند و این روند تا آخرین زیردرخت توسعه ادامه پیدا می‌کند. برنامه‌ی نهایی حاصل کار صحیح تمام برنامه‌های کوچک است.

نوع تابع اتصال^{۳۵}، تعداد ژن‌ها و طول هر کدام از ژن‌ها، به طور پیش‌فرض برای هر مسأله انتخاب می‌شوند. بنابراین، ما همیشه می‌توانیم با استفاده از یک کروموزوم تک ژنی، به تدریج طول سر را افزایش دهیم؛ اگر خیلی بزرگ شود، می‌توانیم تعداد ژن‌ها را افزایش دهیم و یک تابع اتصال برای اتصال آن‌ها انتخاب کنیم. می‌توانیم این کار را با تابع "جمع" یا "OR" شروع کنیم، اما در موارد دیگر، ممکن است تابع اتصال دیگری، مناسب‌تر باشد. این ایده برای یافتن یک راه حل مناسب است و الگوریتم توسعه ژنی (GEP) ابزار یافتن آن را فراهم می‌کند.

۳-۱۲-۶- توابع برازندگی و انتخاب آن

در این بخش، دو نمونه از توابع برازندگی شرح داده خواهد شد. موفقیت در یک مسأله به میزان زیادی به نحوه‌ی طراحی تابع برازندگی بستگی دارد: هدف باید به درستی و روشنی تعریف شود تا سیستم را در مسیر درست محاسبه کند (قدرتی امیری و شامخی امیری، ۱۳۹۳؛ Ghodrati Amiri Shamekhi Amiri, 2013).

³⁵ Linking Function

۳-۱۲-۶-۱- توابع برازندگی

یکی از کاربردهای مهم الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، رگرسیون نمادین یا یافتن تابع است، جایی که هدف آن یافتن بیانی است که برای همه‌ی موارد برازندگی دارای یک خطای مشخص از مقدار صحیح به خوبی انجام شود. برای برخی از برنامه‌های کاربردی ریاضی استفاده از خطاهای نسبی کم یا مطلق برای پیدا کردن یک راه حل مناسب بسیار مفید است. اما اگر دامنه‌ی انتخاب بیش از حد محدود شود، جمعیت بسیار آهسته تکامل می‌یابد و قادر به یافتن راه حل صحیح نمی‌باشد. از سوی دیگر، اگر برعکس آن اتفاق بیفتد و دامنه‌ی انتخاب گسترده‌تر شود، راه حل‌های متعدد با حداکثر مقدار برازندگی ظاهر خواهد شد که از راه حل‌های مناسب فاصله دارد، یعنی جواب‌ها قابل استفاده نمی‌باشند.

برای حل این مشکل، یک استراتژی تکاملی در نظر گرفته شده است که اجازه‌ی پیدا کردن راه حل‌های بسیار خوب بدون توقف در محاسبه را به ما می‌دهد. بنابراین، این سیستم بهترین راه حل ممکن با حداقل خطا را به ما می‌دهد. برای آن یک حد بسیار وسیع برای انتخاب انجام کار داده شده است، به عنوان مثال، یک خطای نسبی که ۲۰٪ است، اجازه می‌دهد تا روند تکاملی شروع شود. در واقع، این افراد اولیه معمولاً بسیار نامناسب هستند، اما نسل اصلاح شده خود را با انتخاب بازسازی می‌کنند و جمعیت‌ها به طرز شگفت‌انگیزی سازگاری پیدا می‌کنند که به موجب آن راه حل‌هایی را پیدا می‌کنند که به تدریج به یک راه حل کامل نزدیک می‌شوند. از نظر ریاضی، اگر F_i یک تابع برازندگی برنامه i باشد که به صورت معادله (۳-۴) بیان شده است که خطای آن یک خطای مطلق است و معادله (۳-۵)، که خطای آن یک خطای نسبی است:

$$f_i = \sum_{j=1}^{C_t} (M - |C_{(i,j)} - T_{(j)}|) \quad (۱۲-۳)$$

$$f_i = \sum_{j=1}^{C_t} (M - |\frac{C_{(i,j)} - T_{(j)}}{T_{(j)}} \cdot 100|) \quad (۱۳-۳)$$

که در آن M دامنه‌ی انتخاب است، C_{ij} مقادیر بازگشتی از کروموزوم فردی i برای تابع برازندگی z (خارج از توابع برازندگی C_t) و T_j مقدار هدف برای تابع برازندگی z است. باید توجه داشت که برای بهترین جواب، $C(i,j) = T_j$ و $f_i = f_{\max} = C_t.M$ باید برقرار باشد. نکته‌ی دیگر این است که با این نوع تابع برازندگی، سیستم می‌تواند راه حل بهینه برای خود پیدا کند.

در یکی دیگر از کاربردهای مهم الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، یادگیری مفهوم بولی یا منطق سنتز، تابع برازندگی یک فرد یک تابع از توابع برازندگی است که به درستی عمل می‌کند. با این حال، برای اکثر برنامه‌های بولی، ضروری است که افرادی را که می‌توانند حدود ۵۰ درصد از توابع برازندگی را حل کنند، حذف شوند، زیرا این تنها نشان‌دهنده ۵۰ درصد احتمال درستی حل یک عمل بولی دوتایی است. بنابراین، توصیه می‌شود، تنها افرادی را که قادر به حل بیش از ۵۰ تا ۷۵ درصد توابع برازندگی هستند، انتخاب شود. در زیر این علامت، ارزش نمادین برازندگی را می‌توان به عنوان مثال $f_i = 1$ در نظر گرفت. به طور معمول، روند تکامل با افراد نامناسب آغاز می‌شود، زیرا آن‌ها در جمعیت اولیه به راحتی می‌توانند ایجاد شوند. با این حال، در نسل‌های آینده، افراد بسیار متناسب شروع به ظاهر شدن می‌کنند و به سرعت در جمعیت گسترش می‌یابند. برای مسائل آسان، مانند توابع بولی با ۲ تا ۵ آرگومان، این واقعاً مهم نیست، اما برای مسائل پیچیده‌تر، انتخاب خط پایین برای حل مناسب است. برای این مسائل، تابع برازندگی زیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد:

$$\text{If } n \geq \frac{1}{2} C_t . \text{ then } f_t = n ; \text{ else } f_t = 1 \quad (14-3)$$

N تعداد توابع برازندگی صحیح مورد استفاده و C_t تعدا کل توابع برازندگی است.

۳-۱۲-۶-۲- انتخاب

در تمام مسائل ارائه شده در این پژوهش، افراد با توجه به برازندگی نمونه‌گیری رولت‌ویل^{۳۶} همراه با همسان‌سازی^{۳۷} از بهترین افراد انتخاب شدند (نخبه‌گرایی ساده). مطالعات مقدماتی طرح‌های مختلف انتخاب پیشنهاد می‌شود:

۱- انتخاب رولت‌ویل با نخبه‌گرایی یا بدون نخبه‌گرایی؛

۲- مسابقه‌ی انتخاب با نخبه‌گرایی یا بدون نخبه‌گرایی؛

۳- انواع مختلفی از انتخاب قطعی با نخبه‌گرایی یا بدون نخبه‌گرایی؛

که تا زمانی که همسان‌سازی بهترین فرد تضمین شود (نتایج نشان داده نمی‌شود). تفاوت خاصی بین آن‌ها وجود ندارد، بعضی از برنامه‌ها در یک مسأله بهتر عمل می‌کنند، دیگر برنامه‌ها در مسائل دیگر. اما برای مسائل پیچیده‌تر به نظر می‌رسد، انتخاب رولت‌ویل با نخبه‌گرایی بهترین است.

۳-۱۲-۷- تولید با اصلاح

با توجه به برازندگی و شانس رولت، افراد برای تولید با اصلاح مجدد انتخاب می‌شوند، ایجاد تنوع ژنتیکی لازم، امکان ران‌های بلند مدت را فراهم می‌آورد.

به جز برای تکرار، که در آن ژنوم‌های تمام افراد انتخاب شده دقیقاً کپی می‌شوند، تمام اپراتورهای باقی‌مانده به طور تصادفی کروموزوم را انتخاب می‌کنند تا تحت یک اصلاح خاص قرار گیرند. با این حال، به جز جهش،

³⁶ Roulette wheel Sampling

³⁷ Cloning

هر اپراتور مجاز به تغییر یک کروموزوم بیش از یک بار نیست. به عنوان مثال، برای یک نرخ انتقال برابر ۰/۷ یعنی ۷ از ۱۰ کروموزوم‌های مختلف به طور تصادفی انتخاب شده‌اند.

علاوه بر این، در الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، یک کروموزوم ممکن است توسط یک یا چند اپراتور ژنتیکی انتخاب شود که تنوع در جمعیت را نشان می‌دهند. همچنین ویژگی دیگری که الگوریتم توسعه ژنی (GEP) را از برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP) مجزا می‌کند، این است که در آن یک نهاد هرگز در یک زمان توسط بیش از یک اپراتور اصلاح نمی‌شود. بنابراین، در الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، اصلاح بعضی از اپراتورهای ژنتیکی در طول تولید جمع‌آوری می‌شوند و تولید فرزندان^{۳۸} بسیار متفاوت از والدین می‌کند.

۳-۱۲-۷-۱- تکرار

تکرار گرچه حیاتی است، اما به تنهایی کمکی به تنوع ژنتیکی نمی‌کند. در واقع تکرار، همراه با انتخاب، تنها قادر به ایجاد رانش ژنتیکی است. با توجه به برازندگی و شانس رولت، کروموزوم‌ها به درستی به نسل بعدی کپی می‌شوند. فرد مؤید این است که احتمال توانایی فرزندان بیش‌تر را بیش‌تر کند. بنابراین، در طی تکرار، ژنوم افراد انتخاب شده آنقدر کپی می‌شوند که نتیجه‌ی خروجی آن رولت شوند. رولت به اندازه‌ی افرادی که در جمعیت وجود دارند، می‌چرخد و همیشه اندازه‌ی جمعیت را حفظ می‌کند.

۳-۱۲-۷-۲- جهش

³⁸ Offspring

جهش در هر جایی از کروموزوم رخ می‌دهد. با این حال، ساختار سازمان‌یافته کروموزوم‌ها باید تغییرناپذیر باقی بماند. در سر، هر نماد می‌تواند به یکدیگر (تابع یا ترمینال) تغییر کند؛ در دم‌ها، ترمینال‌ها فقط می‌توانند به ترمینال‌های دیگر تغییر کنند. به این ترتیب، ساختار سازمان‌یافته کروموزوم‌ها حفظ می‌شود و همه‌ی افراد جدید تولید شده توسط جهش، ساختار درستی دارند.

به‌طور معمول، نرخ جهش (Pm) معادل دو نقطه‌ی جهش در هر کروموزوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. کروموزوم ۳ ژنی زیر را در نظر بگیرید:

$$012345678012345678012345678$$

$$- + - + a b a a a / b b / a b a b b * Q * + a a a b a$$

شکل (۲۴-۳): کروموزوم ۳ ژنی (Ferreira, 2001)

فرض کنید جهش عضو در موقعیت صفر در ژن اول به "Q" تغییر پیدا کند؛ عضو در موقعیت ۳ در ژن دوم به "Q" تغییر پیدا کند و هم‌چنین عضو در موقعیت ۱ در ژن سوم به "b" تغییر پیدا کند، داریم:

$$012345678012345678012345678$$

$$Q + - + a b a a a / b b Q a b a b b * b * + a a a b a$$

شکل (۲۵-۳): کروموزوم جهش‌یافته کروموزوم شکل (۲۴-۳) (Ferreira, 2001)

توجه داشته باشید که اگر یک تابع به یک ترمینال جهش یابد و یا برعکس این عمل اتفاق بیفتد، یا یک تابع از یک آرگومان به یک تابع از ۲ آرگومان جهش یابد یا برعکس این عمل اتفاق بیفتد، درخت توسعه

(ET) به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر پیدا می‌کند. هم‌چنین توجه داشته باشید که جهش در ژن ۲ نمونه‌ای از جهش خنثی است زیرا در ناحیه‌ی کدگذاری نشده در ژن رخ داده است.

لازم به ذکر است که در الگوریتم توسعه ژنی (GEP) هیچ محدودیتی در نوع جهش و تعداد جهش در یک کروموزوم وجود ندارد.

در طبیعت، نقطه‌ی جهش در دنباله‌ای از یک ژن می‌تواند کمی ساختار پروتئین را تغییر دهد و یا اصلاً تغییر ندهد؛ به این نوع جهش، جهش خنثی می‌گویند که زیاد هم اتفاق می‌افتد. (به‌عنوان مثال، جهش در اینترون‌ها^{۳۹}، جهش‌هایی که در نتیجه‌ی همان آمینو اسید به‌علت فراوانی کد ژنتیکی اتفاق می‌افتد). در این‌جا، اگرچه جهش‌های خنثی وجود دارد (مثلاً جهش در منطقه کدگذاری نشده)، جهش در کدگذاری شده در یک ژن تأثیر زیادی دارد که معمولاً باعث تغییر شکل درخت توسعه می‌شود.

۳-۱۲-۷-۳ - انتقال و قرار دادن اعضا به دنبال هم

اعضای قابل انتقال از الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، قطعاتی از ژنوم هستند که می‌توانند فعال شوند و به مکان دیگری در کروموزوم بروند. در الگوریتم توسعه ژنی (GEP) سه نوع اعضای قابل انتقال وجود دارد:

۱- قطعات کوتاه با حداقل یک تابع یا ترمینال در موقعیت اول که به سر ژن‌ها منتقل می‌شود، به غیر از ریشه (اعضای IS)؛

³⁹ Introns

۲- قطعات کوتاه با حداقل یک تابع در موقعیت اول که می‌تواند به ریشه‌ی ژن‌ها منتقل شود (ریشه‌ی اعضای IS یا اعضای RIS)؛

۳- تمام ژن‌هایی که به آغاز کروموزوم‌ها منتقل می‌شوند.

۳-۱۲-۷-۳-۱- اعضای IS

هر دنباله‌ای در ژنوم ممکن است یک عضو IS باشد، بنابراین این اعضا به‌طور تصادفی از سراسر کروموزوم انتخاب می‌شوند. یک نسخه از ترانسپوزون ساخته شده که می‌تواند در هر موقعیت به سر یک ژن وارد شود، به جز در موقعیت شروع.

به‌طور معمول، مقدار IS transposition (Pis) ۰/۱ است و مجموعه‌ای از سه عضو IS با طول‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. اپراتور انتقال، کروموزوم‌ها را به‌طور تصادفی انتخاب می‌کند، شروع عضو IS، منطقه‌ی هدف و طول ترانسپوزون را انتخاب می‌کند. کروموزوم ۲ ژنی زیر را در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

* - + * a - + a * b b a b b a a b a b a b Q * * + a b Q b b * a a b b a a a b b a

شکل (۳-۲۶): کروموزوم ۲ ژنی (Ferreira, 2001)

فرض کنید که دنباله‌ی "bba" در ژن ۲ (موقعیت ۱۲ تا ۱۴) به‌عنوان یک عضو IS انتخاب شده باشد و منطقه‌ی هدف، بند ۶ در ژن ۱ (بین موقعیت ۵ و ۶) باشد. سپس یک برش در بند ۶ ایجاد می‌شود و بلوک "bba" به محل ورودی کپی می‌شود، کروموزوم زیر به‌دست می‌آید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

$* - + * a - b b a + b a b b a a b a b a b Q * * + a b Q b b * a a b b a a a b b a$

شکل (۳-۲۷): کروموزوم ۲ ژنی تغییر یافته (Ferreira, 2001)

در طول انتقال، دنباله‌ی بالادست منطقه‌ی ورودی بدون تغییر باقی می‌ماند، درحالی که دنباله پایین دست از عضو IS کپی شده را از دست می‌دهد، در انتهای سر، مانند بسیاری از نمادها، طول عضو IS (در این مورد دنباله‌ی $a * b$ حذف شد) توجه داشته باشید که با وجود این ورود، ساختار سازمان یافته کروموزوم‌ها حفظ می‌شود، بنابراین همه‌ی افرادی که تازه ایجاد شده‌اند به صورت درست تشکیل شده‌اند. همچنین توجه داشته باشید که انتقال می‌تواند باعث تغییر شکل اساسی در درخت توسعه شود.

۳-۱۲-۷-۳-۲- اعضای RIS

تمام اعضای RIS با یک تابع شروع می‌شوند و از این جهت از میان دنباله سرها انتخاب می‌شوند. یک نقطه در سر به طور تصادفی انتخاب می‌شود و ژن پایین دست را تا زمانی که یک تابع پیدا شود، اسکن می‌کند. این تابع به عنوان موقعیت شروع در عضو RIS انتخاب می‌شود. اگر هیچ تابعی پیدا نشد، کاری انجام نمی‌دهد. معمولاً، مقدار انتقال ریش (pris) از ۰/۱ است و مجموعه‌ای از سه عضو RIS با اندازه‌های مختلف استفاده می‌شود. این اپراتور به صورت تصادفی کروموزوم، ژنی که اصلاح می‌شود، شروع عنصر RIS و طول آن را انتخاب می‌کند. کروموزوم ۲ ژنی زیر را در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

- b a * + - + - Q / a b a b a b b b a a a Q * b / + b b a b b a a a a a a a b b b

شکل (۳-۲۸): کروموزوم ۲ ژنی (Ferreira, 2001)

فرض کنید که دنباله‌ی "bb" در ژن ۲ به‌عنوان عضو RIS انتخاب شده است. سپس، یک نسخه از ترانسپوزون در ریشه‌ی ژن ساخته می‌شود، داریم:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

- b a * + - + - Q / a b a b a b b b a a a + b b Q * b / + b b a a a a a a a b b b

شکل (۳-۲۹): کروموزوم ۲ ژنی تغییر یافته (Ferreira, 2001)

در طول انتقال ریشه، کل سر تغییر می‌کند تا عضو RIS را جایگزین کند، در عین حال، آخرین نماد سر را از دست می‌دهد. همانند اعضای IS، دم ژن در معرض انتقال قرار می‌گیرد و تمام ژن‌های اطراف آن بدون تغییر باقی می‌مانند. باید توجه داشت، برنامه‌های جدید ایجاد شده درست است، زیرا ساختار سازمان‌یافته کروموزوم‌ها حفظ شد.

تغییرات ناشی از انتقال ریشه بسیار شدید است، زیرا ریشه خود اصلاح شده است. در طبیعت، اگر یک عنصر قابل انتقال در ابتدای دنباله‌ی کدگذاری یک ژن وارد شده باشد که موجب تغییر شکل جهش شود، پروتئین کد شده را به‌طور اساسی دچار تغییر می‌کند. مانند جهش و IS transposition، ورودی ریشه دارای قدرت تغییر شکل فوق‌العاده‌ای است که برای ایجاد تنوع ژنتیکی عالی است.

۳-۱۲-۷-۳- انتقال ژن

در انتقال ژن، کل ژن به عنوان یک ترانسپوزون عمل می کند و خود را به نقطه‌ای شروع کروموزوم انتقال می دهد. در مقابل شکل های انتقال، در انتقال ژن ترانسپوزون (ژن) از جای منشأ خود حذف می شود. به این ترتیب، طول کروموزوم ثابت می ماند.

کروموزوم برای انتقال ژن به صورت تصادفی انتخاب می شود و یکی از ژن های آن (به جز اول، بدیهی است) به صورت تصادفی برای انتقال انتخاب می شود. کروموزوم زیر را که شامل ۳ ژن است، در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

* a - * a b b a b - Q Q / a a a b b Q + a b a b a b b

شکل (۳-۳۰): کروموزوم ۳ ژنی (Ferreira, 2001)

فرض کنید ژن ۲ برای انتقال ژن انتخاب شده است. سپس کروموزوم زیر به دست می آید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

- Q Q / a a a b b * a - * a b b a b Q + a b a b a b b

شکل (۳-۳۱): کروموزوم ۳ ژنی تغییر یافته (Ferreira, 2001)

۳-۱۲-۷-۴- نو ترکیبی

در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) سه نوع نو ترکیبی وجود دارد:

۱- یک نقطه‌ای؛

۲- دو نقطه‌ای؛

۳- نو ترکیبی ژنی.

در تمام موارد، دو کروموزوم پدر و مادر به‌طور تصادفی انتخاب شده و برای تبادل برخی مواد بین آن‌ها جفت می‌شوند.

۳-۱۲-۷-۴-۱- نو ترکیبی یک نقطه‌ای

در طول نو ترکیبی یک نقطه‌ای، نقطه‌ی تقاطع کروموزوم‌ها به‌صورت تصادفی برای تشکیل دو کروموزوم فرزند انتخاب شده است. کروموزوم پدر و مادر زیر را در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

- b + Q b b a b b / a Q b b b a a b

/ - a / a b a b b - b a - a b a a a

شکل (۳-۳۲): کروموزوم‌های ۲ ژنی پدر و مادر (Ferreira, 2001)

فرض کنید بند ۳ در ژن ۱ (بین موقعیت ۲ و ۳) به‌صورت تصادفی به‌عنوان نقطه‌ی تقاطع انتخاب شد. سپس، کروموزوم‌های جفت شده در این بند قطع شوند و تبادل مواد بین آن‌ها از پایین‌دست نقطه‌ی تقاطع انجام گیرد و فرزندان زیر را تشکیل دهند:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

- b + / a b a b b - b a - a b a a a

/ - a Q b b a b b / a Q b b b a a b

شکل (۳-۳۳): کروموزوم‌های جدید ایجاد شده (Ferreira, 2001)

با این نوع نو ترکیب، اغلب اوقات، فرزندان با جزئیات متفاوتی از والدین ایجاد می‌شوند. نو ترکیب یک نقطه‌ای، مانند اپراتورهای ذکر شده‌ی فوق، یک منبع بسیار مهم برای تغییر ژنتیک است که بعد از جهش، یکی از اپراتورهایی که باید در الگوریتم توسعه ژنی (GEP) انتخاب شود. میزان نو ترکیبی یک نقطه‌ای (p1r) به میزان اپراتورهای دیگر وابسته است. به‌طور معمول میزان جهانی تقریباً ۰/۷ (مجموع سه نوع نو ترکیب) استفاده می‌شود.

۳-۱۲-۷-۴-۲- نو ترکیبی دو نقطه‌ای

در نو ترکیبی دو نقطه‌ای کروموزوم‌ها جفت می‌شوند و دو نقطه از نو ترکیبی به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند. مواد بین نقاط نو ترکیبی بین دو کروموزوم مبادله می‌شود و بعد از آن دو کروموزوم فرزند تشکیل می‌شود. کروموزوم‌های پدر و مادر زیر را در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

+ * a * b bc c c a c * b a Q * a c a b a b-[1]

* c b b + cc c b c c + + * * b a c b a a b-[2]

شکل (۳-۳۴): کروموزوم‌های ۲ ژنی پدر و مادر (Ferreira, 2001)

فرض کنید بند ۷ در ژن ۱ (بین موقعیت‌های ۶ و ۷) و بند ۳ در ژن ۲ (بین موقعیت‌های ۲ و ۳) به‌عنوان نقاط تقاطع انتخاب شوند. سپس کروموزوم‌های جفت شده در این نقاط برش داده می‌شوند، مبادله‌ی مواد بین نقاط تقاطع شکل می‌گیرد و باعث تشکیل فرزندان زیر می‌شود:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

+ * a * b b c c b c c + + * Q * a c a b a b-[3]

* c b b + c c c c a c * b a * b a c b a a b-[4]

شکل (۳-۳۵): کروموزوم‌های جدید ایجاد شده (Ferreira, 2001)

توجه داشته باشید که ژن اول در هر دو والدین، تقسیم از پایین دست نقطه‌ی پایان انجام می‌شود. در واقع، مناطق کدگذاری نشده در کروموزوم‌های الگوریتم توسعه ژنی (GEP)، مناطق ایده‌آل هستند که کروموزوم‌ها را می‌توان بدون دخالت ORF ها از هم جدا کرد. همچنین توجه داشته باشید که ژن دوم کروموزوم ۱ نیز از پایین دست نقطه‌ی پایان برش داده می‌شود. با این حال، ژن دوم کروموزوم ۲ از بالای دست نقطه‌ی پایان تقسیم شد و درخت زیر توسعه را دچار تغییرات زیادی کرد. همچنین توجه داشته باشید که زمانی که این کروموزوم‌ها دوباره ترکیب شدند، منطقه‌ی کدگذاری نشده‌ی ژن ۲ از کروموزوم ۱ فعال شد و با کروموزوم ۳ یکپارچه شد.

قدرت تبدیل نو ترکیبی دو نقطه‌ای بیش‌تر از نو ترکیبی یک نقطه‌ای است و برای حل مسائل پیچیده‌تر مفیدتر است، به‌ویژه زمانی که کروموزوم‌های چندگانه متشکل از چندین ژن استفاده شود.

۳-۱۲-۷-۴-۳- نو ترکیبی ژنی

در نو ترکیبی ژنی یک ژن کامل در طول تقاطع مبادله می‌شود. ژن‌های مبادله شده به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و همان موقعیت خود در کروموزوم‌های پدر و مادر را تصرف می‌کنند. کروموزوم‌های پدر و مادر زیر را در نظر بگیرید:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

$$/ a a - a b a a a / a * b b a a a b / Q * + a a a a b$$

$$/ - * / a b b a b Q + a Q b a b a a - Q / Q b a a b a$$

شکل (۳-۳۶): کروموزوم‌های ۳ ژنی پدر و مادر (Ferreira, 2001)

فرض کنید که ژن ۲ برای مبادله انتخاب شده است. در این مورد فرزندان زیر تشکیل می‌شود:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8 0 1 2 3 4 5 6 7 8

$$/ a a - a b a a a Q + a Q b a b a a / Q * + a a a a b$$

$$/ - * / a b b a b / a * b b a a a b - Q / Q b a a b a$$

شکل (۳-۳۷): کروموزوم‌های جدید ایجاد شده (Ferreira, 2001)

افراد تازه‌ی ایجاد شده حاوی ژن‌های هر دو والدین هستند. توجه داشته باشید که با این نوع از نو ترکیبی، ژن‌های مشابه می‌توانند مبادله شوند، اما اغلب اوقات، ژن‌های رد و بدل شده بسیار متفاوت هستند و مواد جدید به جمعیت معرفی می‌شوند.

قابل ذکر است که این اپراتور قادر به ایجاد ژن‌های جدید نیست: افراد ایجاد شده ساختار متفاوتی از ژن‌های موجود دارند. در حقیقت، وقتی که نو ترکیبی ژنی به عنوان منبع منحصر به فرد تنوع ژنتیکی مورد استفاده قرار گیرد، مسائل پیچیده‌ای را می‌توان با استفاده از جمعیت‌های اولیه‌ی بسیار بزرگ به منظور فراهم کردن تنوع لازم ژن‌ها حل کرد. با این حال، قدرت ساخت در الگوریتم توسعه‌ی ژنی (GEP) تنها براساس ترکیب ژن‌ها و یا ساخت بلوک‌ها نیست، بلکه در ایجاد با ثبات مواد ژنتیکی جدید است.

در نهایت، به منظور طراحی الگوریتم توسعه ژنی پنج گام زیر باید انجام گیرد (Ferreira, 2001a):

۱- تعریف تابع برزندگی؛

۲- تعریف ترمینال‌ها و توابع؛

۳- تعیین ساختار کروموزوم‌ها (تعداد در نسل، طول ژن‌ها و تعداد آن‌ها)؛

۴- تعیین تابع اتصال ژن‌ها؛

۵- تعیین مشخصات عملگرها و در انتها اجرای الگوریتم.

فصل چهارم: یافته‌های پژوهش و آنالیز داده‌ها

۴-۱- مقدمه

در بخش‌های گذشته، متغیرهایی که برای رابطه‌ی سرعت موج برشی تأثیرگذار است مورد بررسی قرار گرفت. بزرگای گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر (T) و نسبت طیفی حداکثر مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V) 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 صورت گرفت. هر یک از این داده‌ها شامل ۳ مؤلفه است که یک شتاب‌نگاشت مربوط به مؤلفه‌ی قائم (V) و دو شتاب‌نگاشت دیگر مربوط به مؤلفه‌ی (L) و (T) است. سپس پارامترهایی همچون بزرگی گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر (T) استخراج گردید. در اقدام به رگرسیون‌گیری صورت گرفت و بهترین جواب به عنوان رابطه‌ی سرعت موج برشی زلزله انتخاب و در این فصل ارائه گردید.

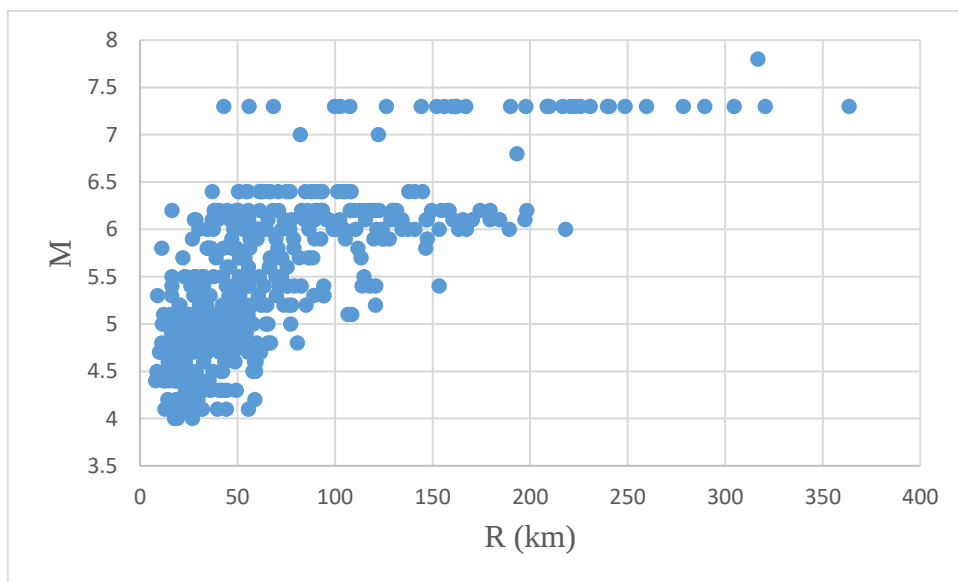
۴-۲- داده‌های شتاب‌نگاری

برای به دست آوردن رابطه‌ی سرعت موج برشی نیاز به جمع‌آوری داده‌های ثبت شده است که از نظر تعداد و دقت دارای کیفیت لازم باشند. در اینجا نیز جهت محاسبه‌ی نسبت طیفی موج افقی به قائم H/V ، از رکوردهای شتاب واقع در دستگاه‌های مختلف شتاب‌نگاری در ایران که توسط سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن گزارش شده‌اند، استفاده شده است. در این پژوهش ۴۸۰ رکورد زلزله که دارای پراکندگی بیشتر

مناطق کشور بوده است، مورد استفاده قرار گرفت. در انتخاب رکوردها، در دسترس بودن اطلاعات زلزله مانند دقت و صحت بزرگا، عمق کانونی، فاصله‌ی رومرکزی و سرعت موج برشی در نظر گرفته شد.

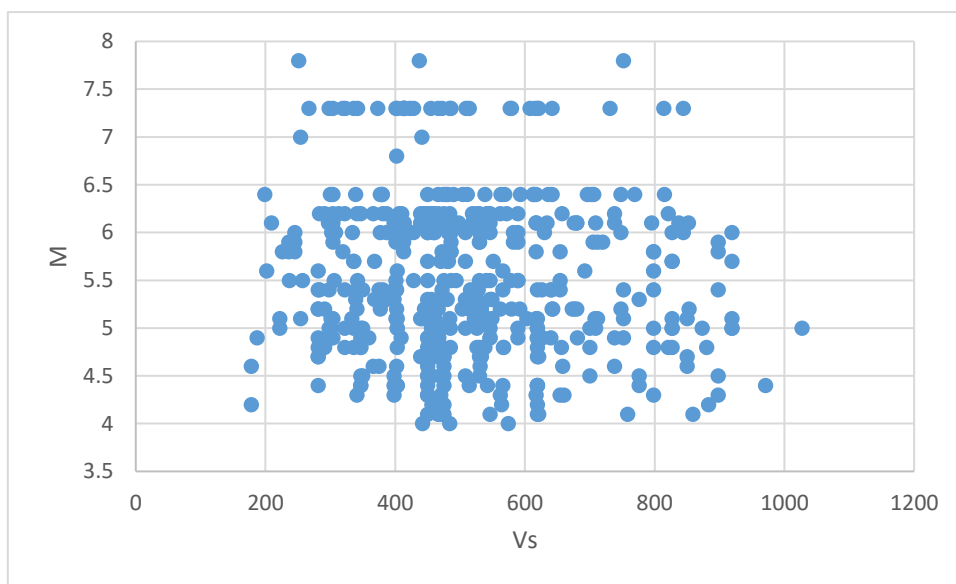
۴-۲-۱- مشخصات بانک اطلاعات

رکوردهای شتاب هم با دستگاههای آنالوگ (SMA-1) و هم با دستگاههای دیجیتالی (SSA-2) ثبت شده‌اند که دستگاههای دیجیتالی قابلیت ثبت پیش- حادثه و پس- حادثه را نیز دارند. در این پژوهش از داده‌های شتابنگاری ثبت شده از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ که از نظر مهندسی قابل استفاده باشد، استفاده شد. رکوردها مربوط به رخداد‌های با بزرگی گشتاوری $4 < M_w < 7/8$ و فاصله‌ی کانونی $8 < R < 400$ می‌باشند. در نهایت داده‌های مورد استفاده که نیازمند تصحیح بودند تصحیحات لازم بر روی آنها صورت گرفت و کاتالوگ نهایی مورد نظر به صورت زیر به دست آمد.



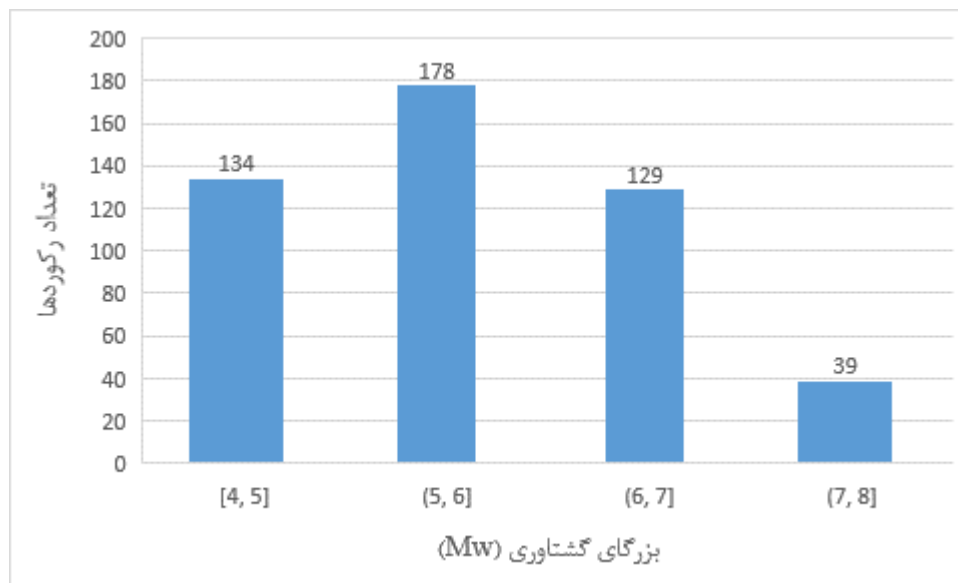
شکل (۴-۱): نمودار پراکندگی بزرگا برحسب فاصله

در شکل (۱-۴) پراکندگی رکوردهای زلزله برحسب بزرگای گشتاوری زلزله (M) و فاصله‌ی کانونی زلزله (R) نشان داده شده است که بزرگی گشتاوری در محدوده‌ی $4 < M_w < 7/8$ و فاصله‌ی کانونی در بازه‌ی $8 < R < 400$ می باشد.



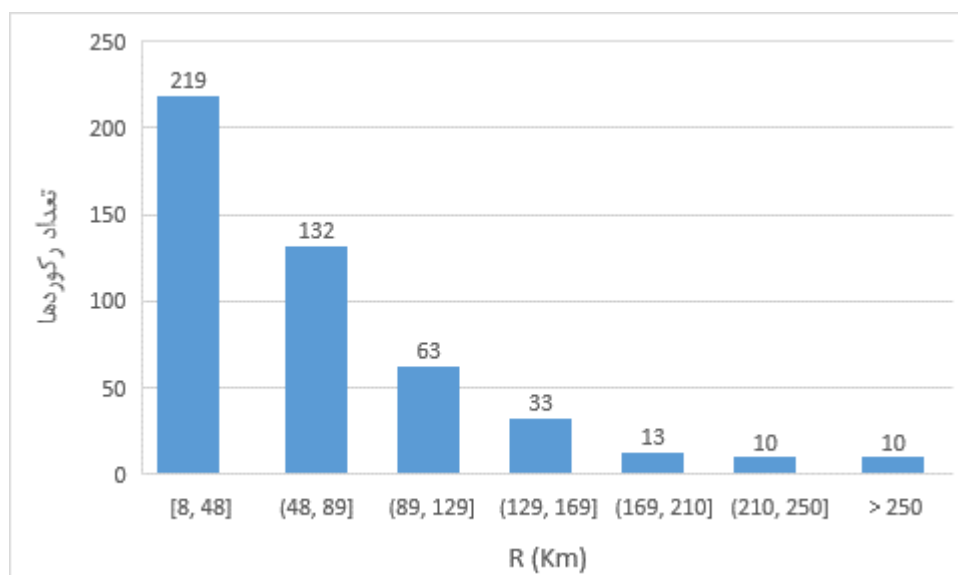
شکل (۲-۴): نمودار پراکندگی بزرگا برحسب سرعت موج برشی

شکل (۲-۴) نمایشگر پراکندگی بزرگای زلزله برحسب سرعت موج برشی می باشد.



شکل (۳-۴): نمودار تعداد رکوردها برحسب بزرگا

شکل (۳-۴) تعداد رکوردهای زلزله در بازه‌های مشخص شده در نمودار بالا که محدوده‌ی بزرگای زلزله می باشد، نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴): نمودار تعداد رکوردها برحسب فاصله

شکل (۳-۴) تعداد رکوردهای زلزله در بازه‌های مشخص شده در نمودار بالا که محدوده‌ی فاصله‌ی کانونی زلزله می‌باشد، نمایش می‌دهد.

۴-۳- روش انجام کار

۴-۳-۱- استخراج متغیرهای مورد نیاز از داده‌ها

پس از انتخاب و تهیه داده‌های مورد نظر از شبکه‌ی شتابنگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، مرحله بعدی کار، اصلاح و فیلتر نمودن این داده‌ها است. بعضی از داده‌ها دارای نویز شدیدی هستند که در محاسبه‌ی نتایج تأثیرات منفی می‌گذارند و به موجب آن نتیجه‌ی کار دور از واقعیت به دست آید، بنابراین برای اطمینان بیشتر و افزایش دقت در نتیجه‌ی کار اصلاحات لازم صورت می‌گیرد. هر یک از این داده‌ها شامل ۳ مؤلفه است که یک شتاب نگاشت مربوط به مؤلفه‌ی قائم (V) و دو شتاب نگاشت دیگر مربوط به مؤلفه‌ی (L) و (T) است. برای به دست آوردن رابطه‌ی سرعت موج برشی باید متغیرهای متأثر مانند بزرگای گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر (T) و نسبت طیفی حداکثر مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V) تعیین گردند.

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 آورده و جدولی مانند جدول (۴-۱) برای هر یک از رکوردهای زلزله تشکیل می‌دهیم.

جدول (۴-۱): نمونه‌ای از جدول تشکیل شده برای هر رکورد زلزله

Period (s)	L (m/s ²)	T (m/s ²)	H (m/s ²)	V (m/s ²)	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
0.07	0.100	0.107	0.146	0.033	4.423
0.08	0.103	0.114	0.153	0.037	4.202
0.09	0.101	0.112	0.151	0.039	3.851
0.1	0.102	0.117	0.155	0.042	3.703
0.11	0.102	0.133	0.168	0.053	3.179
0.12	0.108	0.133	0.171	0.059	2.900
0.13	0.104	0.142	0.176	0.073	2.413
0.14	0.140	0.144	0.200	0.067	2.982
0.15	0.139	0.148	0.203	0.052	3.918
0.16	0.140	0.170	0.220	0.057	3.860
0.17	0.164	0.178	0.242	0.051	4.721
0.18	0.175	0.180	0.251	0.061	4.087
0.19	0.175	0.188	0.257	0.071	3.614

همان‌طور که در فصل دوم بیان گردید برای محاسبه‌ی یک مقدار میانگین برای دو مؤلفه‌ی افقی روش‌های متعددی بیان شده است که در این پژوهش از جذر مجموع مربعات مؤلفه‌های افقی استفاده گردید و در نهایت با استفاده از رابطه‌ی زیر نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم به‌دست آمد:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{L^2 + T^2}}{V} \quad (۴-۱)$$

برای هر یک از رکوردهای زلزله در پریودهای مختلف، مقدار $\frac{H}{V}$ محاسبه گردید. سپس بیشینه‌ی نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم و پریود مربوط به آن استخراج شد.

پس از به دست آمدن نسبت طیفی حداکثر و پریود مربوط به آن، بزرگای زلزله و فاصله‌ی کانونی را برای هر رکورد زلزله استخراج می‌کنیم. در این پژوهش از بزرگای گشتاوری استفاده می‌کنیم و برای یکسان-سازی رکوردها، همه‌ی بزرگاها را به بزرگای گشتاوری تبدیل می‌کنیم. سپس با استخراج پارامترهای عمق

کانونی و فاصله‌ی رومرکزی برای هر رکورد زلزله، فاصله‌ی کانونی را از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌کنیم:

$$R = \sqrt{r^2 + D^2} \quad (۲-۴)$$

R: فاصله‌ی کانونی

r: فاصله‌ی رومرکزی

D: عمق کانونی

در نهایت پس از تعیین پارامترهای ذکر شده جدولی مطابق زیر برای داده‌ها تشکیل شد.

جدول (۲-۴): نمونه‌ای از جدول تشکیل شده برای داده‌ها

Record	mw	R (Km)	T (s)	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
5380	5.2	32.25	0.22	3.43
5383	5.2	59.20	1.36	6.98
5387	4.8	50.96	0.44	6.48
5388	4.8	37.70	0.16	5.64
5395	4.8	32.20	0.30	3.77
5401	5.2	65	0.23	5.24
5404	5.2	57.28	1.77	2.99
5408	5.2	102.26	0.38	6.20
5409.02	5	30.81	0.35	5.02

۴-۳-۲- رگرسیون گیری به روش الگوریتم توسعه‌ی ژنی

برای رگرسیون گیری از روش الگوریتم توسعه‌ی ژنی استفاده شد. بزرگی گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، پریود زلزله (T) و نسبت طیفی مؤلفه‌ی افقی به قائم (H/V) به عنوان متغیرهای ورودی برای الگوریتم توسعه‌ی ژنی تعیین شدند و لگاریتم تابع سرعت موج برشی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد.

جدول (۴-۳): نمونه‌ای از جدول ورودی به نرم‌افزار الگوریتم توسعه‌ی ژنی

mw	R (Km)	T (s)	H/V	Logvs (m/s)
4.9	25.46	1.80	7.25	2.19
4.9	24.08	0.51	7.76	2.67
4.2	18.36	0.90	5.28	2.66
5.2	34	0.34	6.43	2.87
5.2	42.15	0.72	4.13	2.71
5.2	65.97	0.24	5.78	2.89
5.2	32.25	0.22	3.43	3
5.2	59.20	1.36	6.98	2.87
4.8	50.96	0.44	6.48	2.53
4.8	37.70	0.16	5.64	3.14
4.8	32.20	0.30	3.77	2.92
5.2	65	0.23	5.24	2.83
5.2	57.28	1.77	2.99	2.83
5.2	102.26	0.38	6.20	2.91
5	30.81	0.35	5.02	2.97

۴-۳-۲-۱- تنظیمات مربوط به الگوریتم توسعه‌ی ژنی

جدول (۴-۴): تنظیمات در نظر گرفته برای استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی

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

۴-۳-۲-۱-۱- داده‌های آموزشی و آزمایشی

برای استفاده از این الگوریتم ۸۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی و ۲۰٪ دیگر به عنوان داده‌های آزمایشی در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های آزمایشی به صورتی انتخاب شده‌اند که متغیرهای این داده‌ها در بازه‌ی متغیرهای داده‌های آموزشی هستند. این کار به صحیح‌تر شدن آموزش و آزمایش کمک میکند.

۴-۳-۲-۱-۲- تعیین تابع برازندگی

گام بعدی تعیین تابع برازندگی است، این تابع براساس ریشه‌ی حداقل مربعات خطا (RMSE) که به وسیله‌ی رابطه‌ی (۳-۴) محاسبه می‌شود، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2} \quad (3-4)$$

در معادله‌ی فوق Y'_i مقادیر پیش‌بینی شده و Y_i مقادیر هدف برای هر مورد می‌باشند و زمانی که این دو مقدار پیش‌بینی شده و هدف برابر گردند، مقدار خطا برابر صفر خواهد شد ($E = 0$) و مشاهده می‌شود هر چه مقدار E کمتر باشد، تابع پیش‌بینی و هدف مطابقت بیشتری خواهند داشت.

در نهایت تابع ارائه شده توسط رابطه‌ی (۴-۴) به عنوان تابع برازندگی مورد استفاده واقع شد:

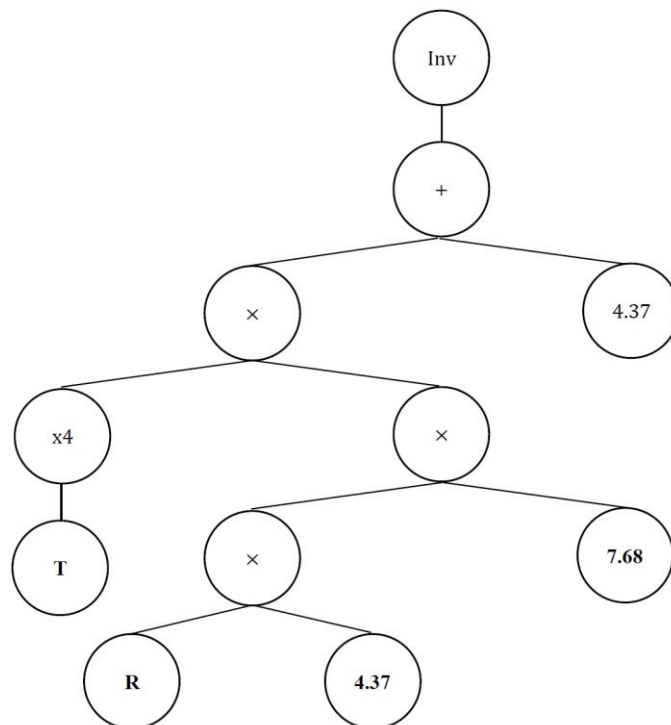
$$f = \frac{1000}{1+E} \quad (4-4)$$

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

در انتها سیستم شروع به ران‌گیری می‌کند. تعداد زیادی ران گرفته شده تا بهترین و مناسب‌ترین جواب-ها از بین آن‌ها انتخاب شود.

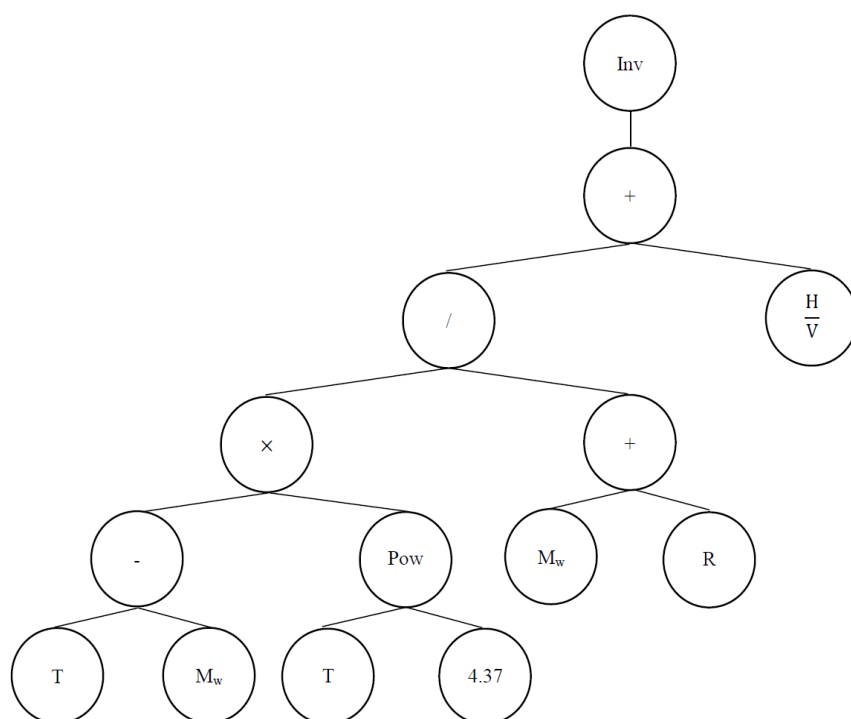
۴-۴- ارائه‌ی رابطه

با توجه به توضیحاتی که در بخش قبل بیان شد، رابطه‌ی سرعت موج برشی معادل با درختان توسعه نشان داده شده در شکل ۵ است. تابع اتصال در این پروژه جمع است پس با جمع کردن درختان توسعه با هم برای ژن‌ها، رابطه‌ی (۴-۵) به‌دست می‌آید:

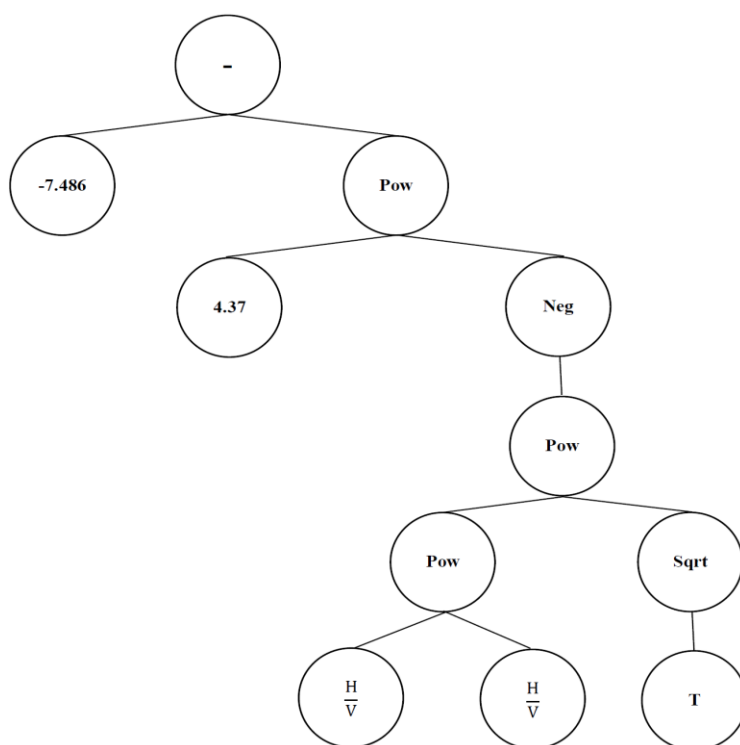


ژن ۱

ژن ۲



ژن ۳



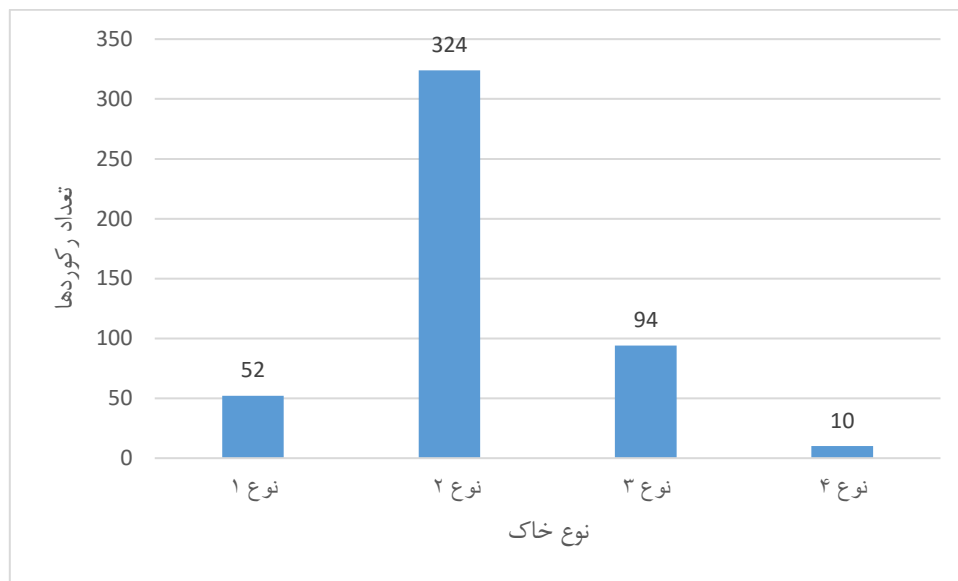
شکل (۴-۵): درخت توسعه‌ی مربوط به رابطه‌ی سرعت موج برشی

$$\log (V_s) = \frac{1}{33.562T^4 \times R + 4.37} + \frac{1}{\frac{(T - M_W) \times T^{2.904}}{M_W + R} + \frac{H}{V}} + 2.454 \quad (5-4)$$

که در این رابطه V_s سرعت موج برشی براساس متر بر ثانیه، R فاصله‌ی کانونی که واحد آن کیلومتر است، T پریود زمانی نسبت طیفی حداکثر و H/V نسبت طیفی حداکثر مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله در نظر گرفته شد.

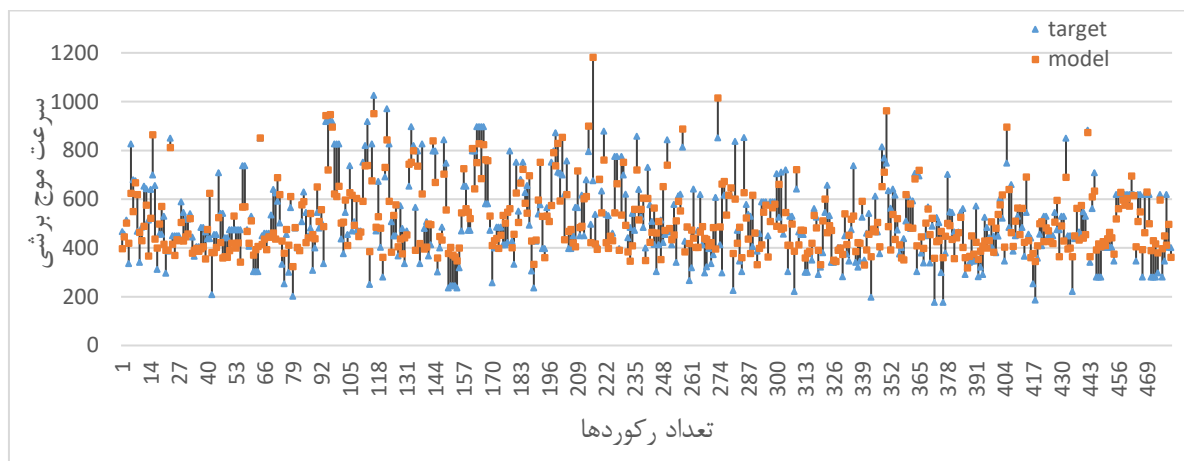
در این پژوهش پس از گرفتن ران‌های متعدد تابع برازندگی $f = 911.57$ حاصل شده و با جای‌گذاری در رابطه‌ی $f = \frac{1000}{1+E}$ مقدار $RMSE = 0.097$ به‌دست آمد. پارامتر دیگر به‌دست آمده R^2 می‌باشد که به آن ضریب تعیین یا تشخیص گفته می‌شود و نشان‌گر این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تاثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می‌باشد. هرچه این ضریب به ۱ یا ۱- نزدیک‌تر باشد شدت رابطه‌ی خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته شدیدتر است. مقدار حاصل شده‌ی ضریب تعیین در این پژوهش $R^2 = 0.545$ می‌باشد. با مقایسه‌ی رابطه‌ی ارائه شده و تعیین نوع خاک، مشاهده شد ۷۳ درصد با مقادیر پیش‌بینی شده مطابقت دارد.

۴-۵- بررسی مدل ارائه شده



شکل (۴-۶): نمودار نوع خاک براساس تعداد رکوردها

همان طور که در نمودار مشاهده می شود نوع زمین مربوط به هریک از رکوردهای زلزله با توجه به سرعت موج برشی آنها، براساس آیین نامه ی 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.



شکل (۴-۷): نمودار مقایسه ی سرعت موج برشی رکوردها

در شکل (۷-۴)، سرعت موج برشی target و model مربوط به رکوردهای زلزله با یکدیگر مقایسه شده است که مقادیر آبی مربوط به سرعت موج برشی پیش‌بینی شده شده و نارنجی، سرعت موج برشی مدل ارائه شده می‌باشد.

۴-۶- بررسی نتایج معیارهای طبقه‌بندی خاک

در این پژوهش پس از ارائه‌ی رابطه برای سرعت موج برشی، طبقه‌بندی خاک با استفاده از آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ انجام شد. برای مقایسه‌ی طبقه‌بندی خاک، طبقه‌بندی‌هایی براساس زارع و همکاران، قائم‌مقامیان و نوجوان، کمک پناه و همکاران، سینائیان، آیین‌نامه‌ی UBC 1997 و آیین‌نامه‌ی NEHRP در نظر گرفته شد که توضیح هریک از این روش‌ها در فصل دوم به طور مفصل شرح داده شد. در نهایت پس از انجام مقایسه‌ی بین مقادیر سرعت برشی هدف و مدل‌شده براساس هریک از این طبقه‌بندی‌ها جدولی مطابق زیر به‌دست آمد که به آن پرداخته می‌شود.

جدول (۴-۵): روش‌های تخمین ساختگاه براساس زارع و همکاران، قائمقامیان و نوجوان، کمک پناه و همکاران، سینائیان،
آیین‌نامه ۲۸۰۰، UBC 1997 و NEHRP

record number	Vs (target)	Vs (model)	زارع		قائمقامیان		کمک پناه		سینائیان		2800		UBC		NEHRP	
			C (target)	C (model)	C (target)	C (model)	C (target)	C (model)	C (target)	C (model)	C (target)	C (model)	C (target)	C (model)	C (target)	C (model)
5363	467	398.18	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5369	457	446.63	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5376	514	502.34	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5387	336	419.77	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5395	827	624.39	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5401	680	549.78	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5404	676	668.06	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5410	469	619.65	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5446	342	465.33	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5451	486	430.13	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5452	654	490.35	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5501	643	576.38	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5506	514	367.74	2	3	2	3	3	3	2	3	2	3	SC	SC	C	C
5518	640	522.63	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5519	700	864.49	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
5522.02	657	436.99	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5534	313	400.06	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5536.01	457	498.68	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5536.02	457	570.61	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5540.03	530	416.62	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5541	297	391.80	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5542	387	391.24	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5545.02	850	813.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
5547.01	450	415.56	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5547.03	450	370.75	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
5547.04	450	434.97	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5547.07	450	430.32	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5548	589	505.85	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5554.01	546	429.23	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5556.01	519	446.01	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5556.02	519	457.57	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5559	541	520.65	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5560	445	379.50	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C

5563	366	391.74	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	SC	SC	C	C
5564.01	406	399.45	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5564.02	406	386.86	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5565.01	484	398.05	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5565.02	484	405.77	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5566.02	466	356.48	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SD	C	D
5568.01	439	476.16	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5568.02	439	625.10	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5569.01	209	382.16	4	3	4	3	4	3	4	3	3	2	SD	SC	D	C
5571.01	456	382.60	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5571.02	456	403.45	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5575.01	709	525.03	1	2	1	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5576.01	542	423.33	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5576.02	542	359.25	2	3	2	3	3	3	2	3	2	3	SC	SD	C	D
5577.01	442	365.43	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
5577.02	442	361.90	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
5579.01	475	389.42	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5579.02	475	419.66	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5579.04	475	531.76	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5579.07	475	399.86	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5579.11	475	421.87	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5579.19	475	342.98	3	3	2	3	3	4	3	3	2	3	SC	SD	C	D
5580.01	738	568.24	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5580.02	738	569.67	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5589.07	475	468.79	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5590	407	420.47	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5593.02	530	512.04	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5604.01	304	371.36	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
5604.02	304	394.35	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5604.03	304	406.63	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5605.03	850	852.31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
5608.02	450	414.50	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5639.01	461	437.53	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5639.02	461	393.32	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5639.03	461	446.23	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5661	535	444.98	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5686	640	462.72	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5687	626	437.29	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5692	592	689.30	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5693	503	619.89	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5696	333	429.64	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C

5697	254	379.02	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5700	456	476.73	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5701	301	412.46	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5732	566	611.70	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5760.02	202	324.56	4	3	4	3	4	4	4	3	3	3	SD	SD	D	D
5778	482	483.84	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5780.01	401	403.25	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5780.02	401	390.28	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5781	508	577.71	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5782	630	590.73	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5784	546	422.16	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5785	450	442.55	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5788	482	542.21	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5789	308	456.23	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5792	401	438.09	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5793	546	650.54	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5794	482	510.02	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5797	508	557.41	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5798	336	488.98	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5800.01	919	943.88	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
5800.02	919	720.94	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5800.03	919	947.85	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
5800.11	919	896.90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
5814.01	827	622.83	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5814.02	827	612.11	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5814.05	827	653.83	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5849	437	502.71	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5853	377	506.19	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5856	546	597.68	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5857	456	411.57	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5858	738	627.67	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5867.03	470	617.02	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5888	508	493.10	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5891.03	470	603.67	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5891.04	470	447.71	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5891.06	470	465.92	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5892	752	592.51	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	C	C
5896	821	737.75	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5918	919	739.63	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5933	251	385.55	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5946	827	675.85	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C

5947	1027	951.94	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
5971.01	470	486.22	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5978	673	528.89	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6031.01	403	481.85	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6033.01	281	362.45	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
6036.01	692	730.75	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6063.03	971	844.45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6064	827	592.29	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6066	508	383.55	2	3	2	3	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6067.01	450	534.34	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6067.02	450	577.09	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6068	368	405.67	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	SC	SC	C	C
6073	574	436.68	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6077	480	376.85	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6078	336	442.38	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
6079.02	470	454.84	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6101	654	744.15	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6103	898	752.05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	C
6124.02	821	799.13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6125	567	391.86	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6128	798	736.07	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6197	336	419.01	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
6198	827	622.71	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6218	480	396.49	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6221	508	404.97	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6222.01	368	498.39	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	SC	SC	C	C
6278	413	496.62	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6279.08	798	840.32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6279.09	798	669.71	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6280	302	360.14	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
6281	401	447.88	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6284	486	433.04	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6285	844	703.47	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6286	748	556.66	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6288.02	236	377.64	4	3	4	3	4	3	4	3	3	2	SD	SC	D	C
6289.01	245	402.77	4	3	3	2	4	3	4	3	3	2	SD	SC	D	C
6289.02	245	371.65	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	SD	SC	D	C
6289.03	245	363.60	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	SD	SC	D	C
6290	236	348.02	4	3	4	3	4	4	4	3	3	3	SD	SD	D	D
6291	319	400.11	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
6299.02	470	544.99	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C

6300.02	654	725.40	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6300.03	654	561.47	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6301.01	472	547.10	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6301.02	472	520.71	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6303.03	798	807.96	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6303.04	798	643.79	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6306.01	898	750.94	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	C
6306.03	898	828.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6306.04	898	685.02	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6306.11	898	823.98	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6311.01	582	763.14	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
6311.03	582	758.33	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	C
6313	472	532.19	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6321	257	411.45	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
6322	401	430.38	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6328.01	486	440.12	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6328.02	486	399.61	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6328.03	486	452.51	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6337.01	413	534.95	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6337.03	413	502.92	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6342	423	547.31	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6344	798	562.36	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6366.02	428	401.29	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6372	334	456.58	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
6377	752	626.33	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	C	C
6420	551	505.41	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6427	681	666.34	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6428.01	752	723.22	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	C	C
6429	627	583.95	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6460	656	543.57	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6481	494	697.35	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6482	306	429.78	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
6484	237	333.92	4	3	4	3	4	4	4	3	3	3	SD	SD	D	D
6485	428	432.66	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6486	540	596.90	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6504	578	751.56	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	C
6544	398	529.87	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6546	398	361.37	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
6549	566	532.19	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6551	516	509.30	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6566	752	574.64	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	C	C

6627	798	790.92	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6629	873	737.64	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
6665	712	829.77	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
6671.02	708	593.51	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6737	700	854.34	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
6741	621	434.89	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6743	758	619.32	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	C	C
6770	398	468.14	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6779	398	476.07	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6790	450	421.59	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6806	567	405.70	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6898.02	566	716.95	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6933	450	484.48	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6937	617	490.11	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6938	450	601.97	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
6995	680	611.51	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
6996	795	900.25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6997	498	422.45	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
6999	676	1182.75	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
7001	538	416.98	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7006	414	395.11	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7025	680	682.95	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7028	634	544.65	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7051	880	761.19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
7055	538	422.65	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7064	533	398.55	2	3	2	3	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7067	445	449.00	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7069	461	431.24	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7090.01	776	544.35	1	2	1	2	1	3	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7090.02	776	664.85	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7150	398	390.93	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7153	776	535.30	1	2	1	2	1	3	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7157.01	700	752.74	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	C
7172	621	493.59	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7181	442	384.71	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7183.01	484	347.08	3	3	2	3	3	4	3	3	2	3	SC	SD	C	D
7184	542	409.32	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7197	472	559.07	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
7199	859	721.18	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7260	641	515.43	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7261	528	559.56	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C

7277	484	604.94	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
7284	401	349.35	3	3	2	3	3	4	3	3	2	3	SC	SD	C	D
7286	731	604.46	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7288	577	424.37	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7289	509	464.13	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7293	415	564.07	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
7295	304	462.01	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7298	413	508.92	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
7304	514	352.84	2	3	2	3	3	3	2	3	2	3	SC	SD	C	D
7309	423	652.72	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
7312	455	473.02	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7314	844	740.73	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7315	466	480.83	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7320	413	435.10	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7331	579	454.04	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7332	342	511.83	3	2	3	2	4	3	3	2	3	2	SD	SC	D	C
7340	615	591.87	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7343	621	552.28	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7348	814	888.92	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
7350	428	384.19	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7351	486	486.63	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7352	267	418.88	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7356	319	473.59	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7375	642	441.35	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7377.01	403	403.16	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7381	472	402.68	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7384.01	619	465.78	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7385	413	488.59	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7398	298	440.04	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7411	323	435.58	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7438	398	409.82	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7451	336	423.05	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7452	373	484.76	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	SC	SC	C	C
7453	608	396.48	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7462	852	1015.37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
7465	414	487.31	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7492	298	663.40	4	2	3	2	4	2	3	2	3	2	SD	SC	D	C
7505.02	617	673.44	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7505.04	617	535.17	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7505.06	617	617.42	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7505.08	617	646.96	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C

7509	226	378.13	4	3	4	3	4	3	4	3	3	2	SD	SC	D	C
7513.01	837	601.74	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7523	473	420.72	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7525.01	347	485.58	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7532	304	360.61	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
7573	853	627.72	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
7574	579	523.74	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
1674	538	436.60	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
1687	530	377.74	2	3	2	3	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
1725	406	616.60	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
1730	461	462.51	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
1733	387	332.05	3	3	3	3	3	4	3	3	2	3	SC	SD	C	D
1735	459	399.10	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
1833.02	589	413.17	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
1833.15	589	547.86	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
1833.23	589	575.77	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
1836	450	364.24	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
1905.03	589	509.49	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
1920.04	589	566.15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
1927.13	589	580.76	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
1939	705	489.95	1	3	1	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
1955	526	662.01	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2008.01	712	478.27	1	3	1	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2016	457	482.51	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2033.01	720	546.17	1	2	1	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2041	304	411.96	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2046	530	411.58	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2071.01	530	498.27	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2188.02	222	387.61	4	3	4	3	4	3	4	3	3	2	SD	SC	D	C
2197	642	722.46	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2198	466	413.30	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2205.02	456	473.39	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2205.04	456	472.27	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2207.02	301	359.83	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SD	D	D
2207.03	301	379.12	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2208	377	387.51	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2230	350	419.53	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2276.02	562	533.79	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2295	526	482.75	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2298.02	291	391.62	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2299	322	332.53	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	SD	SD	D	D

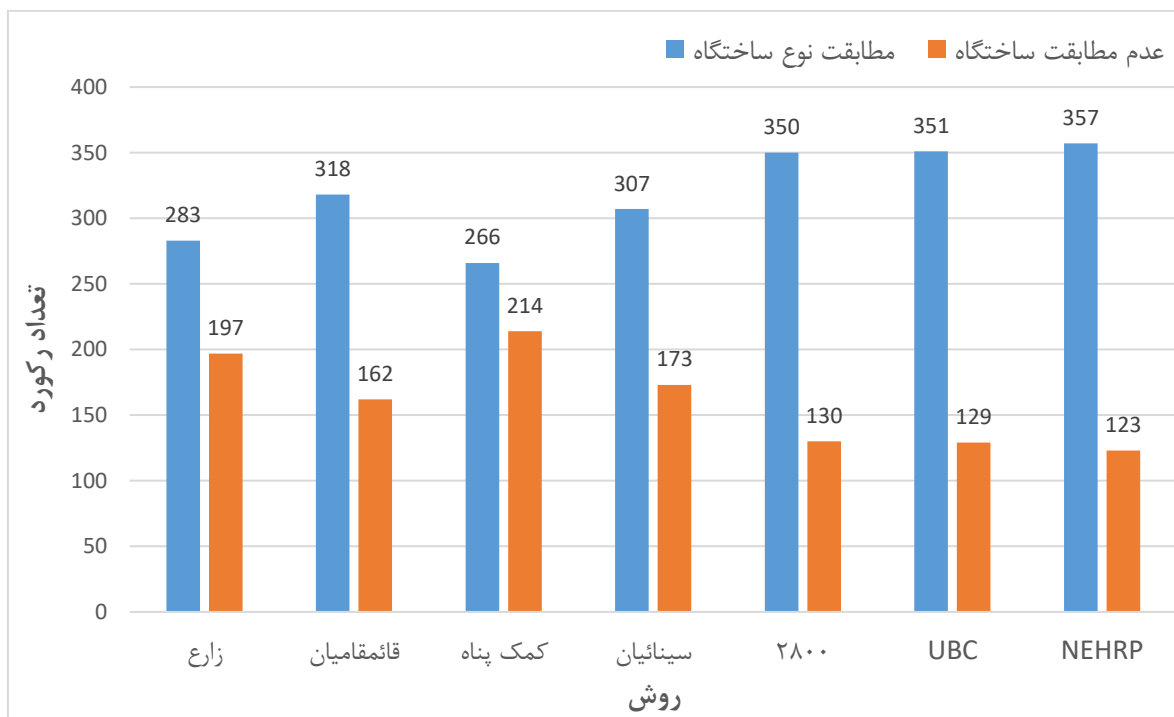
2306	381	512.42	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
2309.04	546	601.64	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2315	658	462.98	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2327.01	533	492.74	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2343.01	341	472.23	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2343.02	341	350.51	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SD	D	D
2345	350	345.07	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	SD	SD	D	D
2356	402	391.70	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2358	402	400.61	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2360	283	373.71	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
2362	450	541.43	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
2363	375	414.32	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2371	347	452.66	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2372	475	517.91	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
2373.02	738	531.10	1	2	1	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2384	341	385.90	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2387	322	422.71	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2389	347	419.98	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
2390	526	591.91	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2392	350	331.04	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	SD	SD	D	D
2410	461	391.95	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2431	542	456.68	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2748.01	199	364.97	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	SD	SC	D	C
2751.01	478	477.91	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2754.01	613	467.92	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2757	466	505.09	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
2758	377	405.69	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2760.02	815	652.99	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
2761	769	711.61	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
2768	748	962.86	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
2769.02	636	488.57	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2770	563	392.45	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2772	642	538.01	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2786.02	617	435.92	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
2793	474	521.64	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
2989	375	413.02	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
2992	402	360.38	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
3024	439	352.53	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SD	C	D
3295	511	619.57	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3302	613	485.42	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3306	481	581.60	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C

3311	593	482.17	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3315	706	683.85	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3321	304	409.17	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3323	696	719.96	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3332	380	446.74	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3333	339	399.56	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3343	450	503.33	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
3347	569	560.88	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3365.03	339	455.02	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3367	490	522.52	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
3369.04	178	358.96	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	SE	SD	E	D
3370	525	426.54	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3387	504	431.93	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3403	300	469.18	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3419	178	361.33	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	SE	SC	E	C
3423	380	448.67	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3445	702	501.72	1	2	1	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3466.01	549	492.41	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3468	546	435.56	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3472	466	357.52	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SD	C	D
3475	456	442.60	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3522	466	463.72	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3538	546	526.43	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3542	562	403.21	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3545	291	361.13	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
3546	322	319.14	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	SD	SD	D	D
3556.01	341	366.41	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C
3557.02	347	450.37	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3557.03	347	376.04	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3559	572	424.25	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3560.01	283	354.09	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SD	D	D
3568	322	387.84	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3572	291	408.15	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3590	526	429.93	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
3632	484	400.82	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3634	442	430.30	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3636.01	410	508.62	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
3639.01	449	383.92	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3642.01	381	482.18	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
3654.01	449	538.66	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
3881	603	577.80	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C

3884	522	617.78	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
3920	347	404.39	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
3964	748	896.73	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	SC	SB	C	B
4206	485	639.95	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
4337	660	462.85	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
4419	387	406.82	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
4465	450	510.43	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
4480	531	564.78	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
4502.01	564	455.24	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
4562	485	562.53	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
4656	366	424.23	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	SC	SC	C	C
4663	546	692.33	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
4849	457	430.65	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5323	441	361.43	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
5329	254	377.77	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5365	187	345.24	4	3	4	3	4	4	4	3	3	3	SD	SD	D	D
5366	359	410.12	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
5368	457	500.24	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5371	409	508.14	3	2	2	2	3	3	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5540.01	530	426.37	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5540.02	530	482.99	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5547.02	450	471.84	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5547.06	450	427.15	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5547.09	450	419.19	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5554.02	546	506.88	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
5579.05	475	596.61	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5589.12	475	365.63	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C
5593.01	530	490.93	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5593.05	530	429.38	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
5605.04	850	690.03	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	SB	SC	B	C
5608.03	450	397.16	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5608.04	450	400.86	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5695	222	365.39	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	SD	SC	D	C
5698	439	450.44	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5710	450	563.80	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5851	466	433.78	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
5855	457	575.64	3	2	2	2	3	2	3	2	2	2	SC	SC	C	C
5939.02	549	441.01	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6007	531	456.23	2	3	2	2	3	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
6576	883	874.55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	SB	SB	B	B
6621	341	364.89	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	SD	SC	D	C

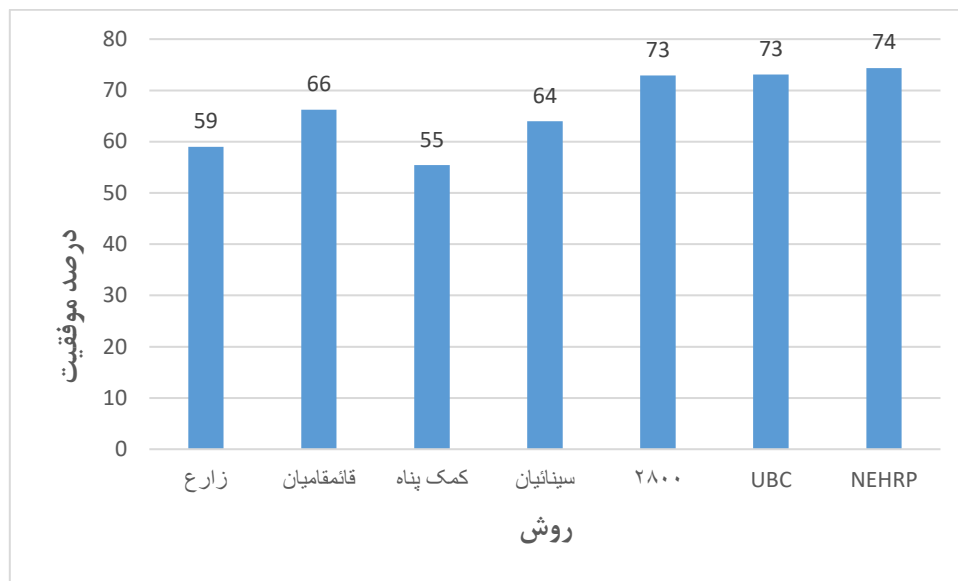
6622	562	609.80	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
2369.04	709	634.48	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7420	281	392.94	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7491.06	281	417.98	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7337	281	405.74	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7377.02	403	427.15	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7377.03	403	410.84	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7377.04	403	438.97	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7377.05	403	464.72	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7377.07	403	442.32	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
7382.02	347	375.86	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7384.02	619	519.68	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7384.03	619	561.47	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7384.09	619	628.17	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7384.1	619	597.20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7384.11	619	576.59	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7384.14	619	604.46	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7384.15	619	572.35	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7414.01	619	696.14	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7414.03	619	616.28	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7424.01	347	405.73	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7426.03	619	509.00	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7427	619	548.85	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7469	281	394.08	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7470.02	619	463.01	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7479.01	619	629.82	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7485.03	619	499.63	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7491.05	281	389.73	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7527.03	281	430.60	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7559.02	281	418.05	4	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7560	298	381.17	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7564.03	619	597.95	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	SC	SC	C	C
7624.02	281	398.47	4	3	3	3	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7686.01	347	449.69	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	SD	SC	D	C
7687.01	619	412.85	2	3	2	2	2	3	2	3	2	2	SC	SC	C	C
7689	403	497.44	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	SC	SC	C	C
1711	402	362.48	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	SC	SC	C	C

در جدول بالا براساس طبقه‌بندی هر یک از محققان، ساختگاه مورد نظر طبق سرعت موج برشی هدف و مدل به دست آمده در این پژوهش، حاصل گردید.



شکل (۴-۸): نمودار مقایسه‌ی مطابقت ساختگاه براساس تعداد رکورد طبق هر یک از روش‌ها

نمودار بالا نشان می‌دهد طبق هر یک از روش‌های طبقه‌بندی، چه تعداد رکورد زلزله ساختگاهشان مطابقت دارد که در هر یک از روش‌ها، ستون چپ مربوط به رکوردهای مطابقت داشته و ستون راست مربوط به عدم مطابقت می‌باشد.



شکل (۹-۴): درصد موفقیت هریک از روش‌ها در تخمین رده‌ی ساختگاه

با توجه به نمودار بالا مشخص شد درصد موفقیت برای رده‌ی ساختگاه طبق روش زارع و همکاران ۵۹ درصد، قائم مقامیان و همکاران ۶۶ درصد، کمک پناه و همکاران ۵۵ درصد، سینائیان ۶۴ درصد، (آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰) ۷۳ درصد، آیین‌نامه‌ی UBC، ۷۳ درصد و NEHRP، ۷۴ درصد می‌باشد.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این پژوهش، ۴۸۰ رکورد زلزله از شبکه‌ی شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استخراج گردید و مورد استفاده قرار گردید. این رکوردها شامل زلزله‌های با بزرگای گشتاوری $4 < M_w < 7/8$ و فاصله‌ی کانونی $8 < R < 400$ می‌باشند. در این پژوهش رابطه‌ی سرعت موج برشی، به صورت تابعی پیوسته از بزرگای گشتاوری (M_w)، فاصله‌ی کانونی (R)، پرپود زمانی نسبت طیفی حداکثر (T) و نسبت طیفی حداکثر مؤلفه‌ی افقی به قائم زلزله (H/V) ارائه شد.

۵-۲- نتیجه‌گیری

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 بزرگ-نمایی 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 اسکلت خاک را اندازه گرفت. بنابراین برای به دست آوردن سرعت موج برشی، با توجه به هزینه‌ها، زمان‌بر بودن و نیاز به زدن گمانه در روش‌های لرزه‌ای و ژئوتکنیکی، ارائه‌ی رابطه‌ای تجربی به دست آمده برای این پارامتر طبق این پژوهش، بسیار مفید می‌باشد.

با استفاده از الگوریتم توسعه‌ی ژنی، رابطه‌ای برای سرعت موج برشی به صورت تابع پیوسته و با دقتی مناسب ارائه شد. در نهایت رابطه‌ی محاسبه شده در این پژوهش دارای برازندگی $f = 911.57$ بوده است. همچنین با مقایسه‌ی رابطه‌ی ارائه شده و تعیین نوع خاک مشاهده شد براساس آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، ۷۳ درصد، طبق روش زارع و همکاران ۵۹ درصد، قائمقامیان و همکاران ۶۶ درصد، کمک‌پناه و همکاران ۵۵ درصد، سینائیان ۶۴ درصد، آیین‌نامه‌ی UBC، ۷۳ درصد و NEHRP، ۷۴ درصد با مقادیر پیش‌بینی شده مطابقت دارد.

۵-۳- پیشنهادها

معیار پیشنهادی بر اساس مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته بر روی ۴۸۰ رکورد می‌باشد. بنابراین با توجه به این که این روابط بر پایه‌ی زلزله‌های رخ داده است و زلزله هر روز در حال وقوع و شتاب‌نگاشت‌ها در حال افزایش می‌باشند، پیشنهاد می‌گردد با افزایش تعداد رکوردها و ایستگاه‌ها و در حقیقت جامعه‌ی آماری، معیار ارائه شده مجدداً مورد بررسی قرار گیرد تا به این ترتیب دقت آن افزایش یابد چرا که با افزایش تعداد رکوردها در هر ایستگاه، تخمین‌ها دارای نرخ موفقیت بیشتری خواهند بود.

روش‌های مختلفی برای رگرسیون‌گیری و محاسبه‌ی تابع هدف وجود دارد که روش الگوریتم توسعه‌ی ژنی یکی از جدیدترین روش‌هاست بنابراین با دقت بالای این روش و بروز رسانی و افزایش رکوردها می‌توان رابطه‌ی بهتری برای سرعت موج برشی و روشی برای طبقه‌بندی نوع ساختگاه با نرخ موفقیت بیشتر، ارائه نمود. همچنین می‌توان با استفاده از روش‌های رگرسیون‌گیری دیگر رابطه‌ی سرعت موج برشی را به دست آورد و با نتایج حاصل از این پژوهش مقایسه نمود.

در این پژوهش، رکوردهای مربوط به ایران پردازش و بررسی گردید که می‌توان در کارهای بعدی مناطق دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد و با استفاده از رکوردهای زلزله‌ی آن مناطق، رابطه‌ی سرعت موج برشی تعیین گردد.

مراجع

"آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان در برابر زلزله"، استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۳)، ویرایش ۴، مرکز تحقیقات مسکن، شماره‌ی ض-۲۵۳.

امامی ر، رضایی ر و رضاپور م، (۱۳۹۱) "تعیین منحنی تضعیف تجربی و مقیاس بزرگی محلی (M_L) برای شمال باختر ایران بر پایه‌ی روش JHD" نشریه‌ی علمی-پژوهشی علوم زمین، شماره ۹۲، دوره ۲۳، صفحه ۸۵-۹۲.

رفیعی گزنی م، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد: "ارزیابی اثرات ساختگاهی در تهران با استفاده از روش‌های تجربی"، دانشکده‌ی ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

سینائیان ف، (۱۳۸۵)، پایان‌نامه‌ی دکترا: "پژوهشی بر جنبش نیرومند زمین در ایران (از کاتالوگ تا روابط کاهندگی)"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

صحرائیان م. ص، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد: "تعیین پروفیل سرعت موج برشی آبرفت به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های آرایه‌ای میکروترموور با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه تهران.

قاسمی ه، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه‌ی دکترا: "مطالعه‌ی کاهندگی جنبش نیرومند زمین در ایران"، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

قدرتی امیری غ. و زاهدی م. و مهدویان ع. و غلامی س، (۱۳۸۳) "محدوده فرکانسی مناسب جهت پردازش شتاب‌نگاشت‌های ایران برای انواع شرایط ساختگاهی" نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، شماره ۴، دوره ۲-۳ ص ۸۵-۹۵.

قدرتی امیری غ. و شامخی امیری م ، (۱۳۹۳) "ارائه روابط کاهندگی برای بیشینه شتاب افقی و قائم جنبش‌های نیرومند زمین در فلات ایران با استفاده از الگوریتم توسعه ژنی (GEP)" نشریه علمی-پژوهشی شریف، جلد ۳۸ ، شماره ۲.

Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological research letters*, 68(1), 94-127.

Aki, K., (1988). "Local site effects on ground motion, in *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*." Geotechnical Special Publication No. 20, ASCE., New York, PP. 103-155.

Aki, K., 1993, Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophysics.*, 218, 93-111.

Anbazhagan P, Srilakshmi KN, Bajaj K, Moustafa SS, Al-Arifi NS. Determination of seismic site classification of seismic recording stations in the Himalayan region using HVSR method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019 Jan 1;116:304-16.

Arai H, Tokimatsu K. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bull Seismol Soc Am* 2004;94:53–63.

Bard Y, Theodulidis NP. Horizontal to vertical spectral ratios and geological conditions and analysis of strong motion data from Greece and Taiwan (smart-1). *Soil Dyn Earthq Eng* 1995;14:177–97.

Bard YP. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? In the effects of surface. In: Irikura K, Kudo K, Okada H, Satasani T, editors. *Geology on seismic motion*. Rotterdam: Balkema; 1999. p. 1251–79.

Bindi D, Parolai S, Spallarossa D, Cattaneo M. Site effects by H/V ratio: comparison of two different procedures. *J Earthq Eng* 2000;4:97–113.

Boatwrigth, j, Seekoing, L. C., Fumal, T. E., Liu, H-P. and Muller, C S [1991]. Ground motion amplification in the marina desert. *Bulletin of seismological society of America*, 81, pp., 1980-1997.

Bonilla LF, Steidl JH, Lindley GT, Tumarkin AG, Archuleta RJ. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site-effect estimation using the Swave, coda, and H/V methods. *Bull Seismol Soc Am* 1997;87:710–30.

Bonnefoy-Claudet S, Cornou C, Bard PY, Cotton F, Moczo P, Kristek J, Fah D. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys J Int* 2006;167:827–37.

Boore M., Watson-Lamprey J., Abrahamson N. A., 2006. “Orientation-Independent Measures of Ground Motion,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 4A, pp. 1502-1511.

Boore M., Watson-Lamprey J., Abrahamson N. A., 2006. “Orientation-Independent Measures of Ground Motion,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 4A, pp. 1502-1511.

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.

Castro R. R., Mucciarelli M., Pacor F., and Petrongaro C., 1997. “S-Wave Site-Response Estimates Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 1, pp. 256-260.

Di Alessandro C, Bonilla LB, Boore DM, Rovelli A, Scotti O. Predominant period site classification for response spectra prediction equations in Italy. *Bull Seismol Soc Am* 2012;102(2):680–95.

Diagourtas D, Makropoulos K, Tzanis A. Comparative study of microtremor analysis methods. *Pure Appl Geophys* 2001;158:2463–79.

Ferreira C. (2001) “Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems” Vol. 13, pp. 87–129.

Ferreira C. (2001a) “Gene expression programming in problem solving. In: *Proceedings of the Sixth Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications*” pp. 10–24.

Field E. F., and 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, Vol. 85, No. 4, pp. 1127-1143.

Finn W. D. L., 1991. "Geotechnical Engineering Aspects of Microzonation," Proc. Fourth Int. Conf. on Seismic Zonation, Stanford, California, I, 199-259.

Ghasemi H., Zare M., Fukushima Y., Sinaeian F., 2009. "Applying empirical methods in site classification, using response spectral ratio (H/V): case study on Iranian strong motion network (ISMN)," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 121-132.

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).

Ghayamghamian, M.R [1997]. Non-linear and linear response of the site with evaluation of actual dynamic soil properties using vertical array accelerogram and microtermors. Departemant of civil and environmental engineering. Ph.D. Thesis Saitama University, Japan

Ghodrati Amiri Shamekhi Amiri (2013) "Attenuation relationship for inelastic earthquake spectra in Iran" Proceedings of the Institution of Civil Engineers.

Goldberg, D.E., (1989). "Genetic algorithm in search optimization and machine learning." Addison-wesley publishing company Inc, New York, N.K.

H.R.Ramazi and H. Mirzaei Alavijeh, (1997). Criteria for selection of station in accelerograph networks. Building and Housing Reaserch Center.

Hays, W. W. (1986). SITE AMPLIFICATION OF EARTHQUAKE GROUND MOTION. In Proceedings of the Third US National Conference on Earthquake Engineering. (pp. 357-368).

Herak M. Model HVSR - a matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. Comput Geosci 2008;34:1514–26.

Jafari MK, Kamalian M, Chamanzad M. Microzonation of the Tehran Region. In: Proceedings of the Second International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE-2), Tehran, vol. 2, 1995, pp. 1301-1311.

Jafari MK, Kamalian M, Chamanzad M. Microzonation study in the Tehran region. In: Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Accopolco, paper no.895, 1996.

Kobayashi H. Preliminary report on the ambient noise measurements in Thessaloniki, UNDP/SF, REM; 1973, p. 70–172.

Komak Panah A., Hafezi Moghaddas A., Ghayamaghamian M. R., Motasaka M., Jafari M. K., and Uromieh A (2002). Site Effect Classification in Earth-Central of iran, journal of seismology and Earthquake engineering, vol.4, No.1.

Kramer S. L., 1996. “Geotechnical Earthquake Engineering,” Upper Saddle River, N. J., Prentice Hall, 635p.

Lachet, 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.

Lermo J, Chávez-García FJ. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bulletin of the seismological society of America. 1993 Oct 1;83(5):1574-94.

Lunedei E, Albarello D. Theoretical HVSR curves from full wavefield modelling of ambient vibrations in a weakly dissipative layered Earth. Geophys J Int 2010;181:1093–108.

Michalewics, Z., (1992). “Genetic algorithm + Data structure = Evolution programs.”, Springer-verlag, Berlin.

Milne, J. (1898). Earthquakes and other Earth novernements. Londo: Paul, Trench, Triibner & Co.

Mlagnini L., Mayeda K., Akinci A., and Bragato P. L., 2004. “Estimating Absolute Site Effects,” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, No. 4, pp. 1343-1352.

Molnar S., and Cassidy J. F., 2006, “A comparison of Site Response Techniques Using Weak-Motion Earthquakes and Microtremors,” *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 1, pp169-188.

Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Q Report RTRI* 1989;30:25–33.

Nakamura Y. Clear identification of fundamental idea of Nakamura’s technique and its applications. In: *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*, New Zealand; 2000.

Nath, S. K., Sengupta, P., Sengupta, S., & Chakrabarti, A. (2000). Site response estimation using strong motion network: A step towards microzonation of the Sikkim Himalayas. *Current Science*, 1316-1326.

Nogoshi M, Igarashi T. On the amplitude characteristics of microtremor -Part 2 (in Japanese with English abstract). *J Seismol Soc Jpn* 1971;24:26–40.

Nogoshi, M., Igarashi, T., (1970). “On the amplitude characteristics of microtremor.” *Journal of the Seismic Society of Japan*, 24, PP. 264-280.

Phung, V., Atkinson, G. M., & Lau, D. T. (2006). Methodology for site classification estimation using strong ground motion data from the Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Earthquake spectra*, 22(2), 511-531.

Picozzi M, Albarello D. Combining genetic and linearized algorithms for a two-step joint inversion of Rayleigh wave dispersion and H/V spectral ratio curves. *Geophys J Int* 2007;169:189–200.

Riepl J., Bard P.-Y., Hatzfeld D., Papaioannou C., and Nechtschein S., 1998, “Detailed Evaluation of Site-Response Estimation Methods Across and Along the Sedimentary of Volvi (EURO-SEISTEST),” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 88, No. 2, pp. 448-502.

Sardinal, V. H. R., & Midorikawa, S. (2004, August). Site Classification Based on Spectral Amplification Patterns For Microtremor H/V Ratios. In 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver.

Schell, B. A. (1978). PLATE TECTONICS OF THE NORTHEASTERN CARIBBEAN SEA REGION.

Scherbaum F, Riepl J, Bettig B, Ohnberger M, Cornou C, Cotton F, Bard PY. Dense array measurements of ambient vibrations in the Grenoble basin to study local site effects. AGU Fall meeting, San Francisco, December; 1999.

Seed H.B. , Whitman V. R, Idriss . I, 1972, Soil Condition and Building Damage in 1976 Cases, EQ, journal Soil Mechanic and Foundating Eng. ASCE, Aga, 1972,P.P 787-807.

Seed, H. B., Ugas, C., & Lysmer, J. (1976). Site-dependent spectra for earthquake-resistant design. Bulletin of the Seismological society of America, 66(1), 221-243.

Travasariou T. and Bray J.D. and Abrahamson N.A. (2003) “Empirical attenuation relationship for Arias Intensity” Earthquake Eng. Structure Dynamics, Vol. 32, pp. 1133–55.

Trifunac, M. D., & Lee, V. W. (1989). Empirical models for scaling Fourier amplitude spectra of strong ground acceleration in terms of earthquake magnitude source to station distance, site intensity and recording site conditions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 8(3), 110-125.

Tsuboi S., Saito M., and Ishihara Y., 2001. “Verification of Horizontal-to-Vertical Spectral-Ratio Technique for Estimation of Site Response Using Borehole Seismographs,” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No. 3, pp. 499-510.

Wood, H. O. (1908). Distribution of apparent intensity in San Francisco. The California Earthquake of April, 18(1906), 220-227.

Yaghmaei-Sabegh S, Tsang H-H. A new site classification approach based on neural networks. Soil Dyn Earthq Eng 2011;31:974–81.

Yaghmaei-Sabegh S, Tsang H-H. Site class mapping based on earthquake ground motion data recorded by regional seismographic network. Nat Hazards 2014;73(3):2067–87.

Zare M, Bard PY, Ghafory-Ashtiany M. Site characterizations for the Iranian strong motion network. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1999 Feb 1;18(2):101-23.

Zare M. Deux exemples de mouvements de forts séismes en champ proche en Iran. In: 4em Colloque National en Géologie Parasismique, AFPS, Paris, Proc. vol.1, 1996. pp. 112-119.

Zare M. Site dependent attenuation of strong motions for Iran. In: International conference on seismic zonation 1995 (pp. 1227-1236).

Zare M. 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).

Zhao JX, Irikura K, Zhang J, Fukushima Y, Somerville PG, Asano A, Ohno Y, Oouchi T, Takahashi T, Ogawa H. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bull Seismol Soc Am* 2006;96:914–25.

Abstract

Earthquakes are one of the most destructive natural disasters that have ever threatened human and financial communities. Iran is one of the earthquake-prone countries in the world, so that every year it experiences many small to medium earthquakes and every ten years it experiences a major earthquake. Due to the earthquake situation and the special geographical and climatic situation, Iran has the potential to cause numerous and severe earthquakes. Therefore, seismic studies and construction conditions are necessary. An overall assessment of the damage to structures and facilities in earthquakes shows that the construction conditions have had a significant impact on the distribution of damage in cities and villages. Therefore, it is necessary to identify the effect of the construction site, the type of soil and its impact on earthquake waves in the design and construction of resistant structures. Determining the type of soil in a seismic record area is a laborious and costly task. The aim of this study was to predict the relationship between determining the seismic shear wave velocity using the gene expression program (GEP) and determining the soil type of the region using the horizontal to vertical (H/V) spectral ratio method. Factors influencing the magnitude of the earthquake include the distance from the source of the earthquake to the structure, the spectral ratio of the horizontal to vertical component (H/V), and the time period of the maximum spectral ratio. In this study, large torque was used as the magnitude and focal length as the distance between the earthquake source and the construction site.

The first step in the research is to collect acceleration data, which used 480 accelerometers, and the required corrections were made to these data, and then the input parameters mentioned were extracted to determine the correlation of the shear wave velocity. After preparing the earthquake catalog, the smart method of the gene development algorithm was finally used to obtain the predictive relationship. The advantage of this algorithm is that the fixed regression model is not used and the model is calculated intelligently. The computational results have a fitness of 911.57 and correspond to 73% with the predicted values, which provides a good knowledge of the soil condition of the region compared to the exact method, ie laboratory work, faster, more affordable and at a much lower cost.

Keywords: Horizontal to vertical component spectral ratio, shear wave velocity, gene expression programming, soil type of the region



**Shahrood University of
Technology**

**Faculty of Civil Engineering
Master's Thesis for Geotechnical Engineering**

Site classification using H/V spectral ratio (HVSR) method

By: Iman Khazaei

Supervisor:
Dr. Mohamad Shamekhi Amiri

June, 2020