

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه

ارائه مدل های جدید جهانی روابط کاهندگی برای مولفه افقی بیشینه شتاب زلزله

نگارنده: مهر آسا عجم

اساتید راهنما

دکتر محمد شامخی امیری

دکتر حسین پهلوان

مهر ۱۳۹۹

تقدیم به

پدرم تکیه گاه استوارم

و مادرم آرایش وجودم

که از محاشان صلابت، از رفقایشان محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

برادرم پشتوانه زندگیم

که گرمای وجودش امیدبخش زندگیم است.

شکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت که این پایان نامه را به پایان برسانم. بر خود واجب می دانم مراتب

سپاس و قدردانی خود را خدمت اساتید گرامی و تقدیر جناب آقای دکتر محمد شامخی امیری و جناب آقای دکتر حسین پهلوان که در طی

تلاش این پایان نامه بهواره مروری نموده و راهنمایی نمودند، تقدیم نمایم.

همچنین از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر سید مهدی توکلی و جناب آقای دکتر ابراهیم زمانی بیدختی که زحمات داری این

پایان نامه را بر عهده داشتند کمال شکر را دارم.

تهدیه نامه

اینجانب مهرآسا عجم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مهندسی عمران-سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارائه مدل های جدید جهانی روابط کاهندگی برای مولفه افقی بیشینه شتاب زلزله تحت راهنمایی جناب آقای 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 پژوهشهای 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 بافتهای آنها) 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 .

تاریخ ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامهای رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) 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

زلزله یکی از حوادث طبیعی است که همواره زندگی بشر را تحت تاثیر قرار داده است. گرچه جلوگیری از وقوع زلزله و یا پیش‌بینی دقیق زمان وقوع آن کاری غیرممکن است، ولی با طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله می‌توان تا حدی از میزان خسارات مالی و تلفات جانی وارده کاست. البته این طراحی مقاوم، مستلزم بهره‌گیری از علم تحلیل خطر زلزله می‌باشد که به واسطه تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین از جمله شتاب، سرعت و جابه‌جایی در هر ناحیه ممکن خواهد شد. باید توجه داشت، تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین جز از طریق به دست آوردن روابط کاهندگی مناسب مقدور نخواهد بود. در این پژوهش تلاش بر این است که روابط کاهندگی مناسب برای تخمین مقدار مولفه افقی بیشینه شتاب زلزله ممکن‌الوقوع در هر منطقه با استفاده از دو روش الگوریتم هوشمند توسعه‌یابی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی با تقریب بالایی تخمین زده شده و در نهایت به مقایسه دو روش مطرح شده با سایر پژوهش‌ها پرداخته شود. برای تحقق این مهم، کاتالوگ به‌روز و وسیعی متشکل از ۱۱۸۵ رکورد زلزله به وقوع پیوسته در سراسر جهان، تهیه و از پارامترهای بزرگ، فاصله کانونی و سرعت موج برشی این زلزله‌ها برای حصول رابطه کاهندگی مناسب استفاده شده است. در نهایت تابع برازندگی با استفاده از ریشه حداقل مربعات خطا محاسبه شده که در روش الگوریتم هوشمند توسعه‌یابی ۷۶۵/۵۵ و در روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی ۷۶۸/۴ از ۱۰۰۰ به دست آمده است که تناسب بالای مقادیر حاصل از روابط کاهندگی نهایی به دست آمده از هر دو روش، با مقادیر اندازه‌گیری شده از زلزله‌های گذشته را نشان می‌دهد.

به طور کلی، اولاً وسیع بودن جامعه آماری و اضافه شدن رکوردهای ثبت شده در سال‌های اخیر به کاتالوگ زلزله که منجر به ارائه رابطه کاهندگی دقیق‌تری شده، دوماً بهره‌گیری از دو روش هوشمند الگوریتم توسعه‌یابی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و مقایسه نتایج حاصل از این دو روش، از نقاط قوت این پژوهش به حساب می‌آیند.

کلمات کلیدی: رابطه کاهندگی، بیشینه شتاب افقی زمین، الگوریتم توسعه‌یابی، الگوریتم مدیریت داده-

ها به روش گروهی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- ارائه مدل جهانی رابطه کاهندگی برای مولفه افقی بیشینه شتاب زلزله به وسیله الگوریتم هوشمند

توسعه ژنی

فهرست مطالب

فصل ۱: کلیات تحقیق..... ۱

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق..... ۵

۱-۳- اهداف و چشم انداز انجام پژوهش..... ۵

۱-۴- مراحل انجام پژوهش..... ۶

فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی و پیشینه تحقیق..... ۹

۱-۲- مقدمه..... ۱۰

۲-۲- مروری بر مدل های ارائه شده از سال ۱۹۸۰..... ۱۱

۲-۲-۱- مدل کاهندگی اسپینوسا (۱۹۸۰)..... ۱۱

۲-۲-۲- مدل کاهندگی باتیس (۱۹۸۱)..... ۱۱

۲-۲-۳- مدل کاهندگی کمپیل (۱۹۸۱)..... ۱۲

۲-۲-۴- مدل کاهندگی بور (۱۹۸۲)..... ۱۲

۲-۲-۵- مدل کاهندگی سابتا و پاگلیز (۱۹۸۷)..... ۱۲

۲-۲-۶- مدل کاهندگی پتروفسکی و مارسلینی (۱۹۸۸)..... ۱۳

۲-۲-۷- مدل کاهندگی آتکینسون و بور (۱۹۸۸)..... ۱۳

۲-۲-۸- مدل کاهندگی تامورا و همکاران (۱۹۹۰)..... ۱۳

۲-۲-۹- مدل کاهندگی تئودولیدیس و پاپازاچوز (۱۹۹۲)..... ۱۴

۲-۲-۱۰- مدل کاهندگی تنتو و همکاران (۱۹۹۲)..... ۱۴

- ۱۴.....۱۱-۲-۲-مدل‌های کاهندگی صدیق و همکاران (۱۹۹۳)
- ۱۴.....۱۲-۲-۲-مدل کاهندگی بور و همکاران (۱۹۹۳)
- ۱۵.....۱۳-۲-۲-مدل کاهندگی سارما و فری (۱۹۹۵)
- ۱۵.....۱۴-۲-۲-مدل کاهندگی امبرسیز و سیمپسون (۱۹۹۶)
- ۱۶.....۱۵-۲-۲-مدل کاهندگی آبراهامسون و سیلوا (۱۹۹۷)
- ۱۷.....۱۶-۲-۲-مدل کاهندگی بور و همکاران (۱۹۹۷)
- ۱۸.....۱۷-۲-۲-مدل کاهندگی اسپودیچ و همکاران (۱۹۹۹)
- ۱۹.....۱۸-۲-۲-مدل کاهندگی آمبرسیز و داگلاس (۲۰۰۰)
- ۲۰.....۱۹-۲-۲-مدل کاهندگی خادمی (۲۰۰۲)
- ۲۰.....۲۰-۲-۲-مدل کاهندگی فوکوشیما و همکاران (۲۰۰۳)
- ۲۱.....۲۱-۲-۲-مدل کاهندگی سم اوزبی و همکاران (۲۰۰۴)
- ۲۱.....۲۲-۲-۲-مدل کاهندگی مگاواتی و همکاران (۲۰۰۵)
- ۲۲.....۲۳-۲-۲-مدل امیری و همکاران (۲۰۰۷)
- ۲۳.....۲۴-۲-۲-مدل کاهندگی مندال و همکاران (۲۰۰۹)
- ۲۴.....۲۵-۲-۲-مدل کاهندگی اورنساماراس و همکاران (۲۰۱۰)
- ۲۴.....۲۶-۲-۲-مدل کاهندگی علوی (۲۰۱۱)
- ۲۵.....۲۷-۲-۲-مدل کانورتیتو و همکاران (۲۰۱۲)
- ۲۵.....۲۸-۲-۲-مدل گرایزر و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۳)
- ۲۷.....۲۹-۲-۲-مدل وکارینو و همکاران (۲۰۱۴)
- ۲۷.....۳۰-۲-۲-مدل شامخی امیری (۲۰۱۴)

۲۸	 مدل کان و شربام (۲۰۱۵)
۲۹	 مدل زاگولو و همکاران (۲۰۱۷)
۲۹	 مدل کاهندگی کامار و همکاران (۲۰۱۷)
۳۰	 مدل ون و همکاران (۲۰۱۸)
۳۰	 مدل کاهندگی جوان و همکاران (۲۰۱۸)
۳۳	فصل ۳: معرفی روش‌های توسعه روابط کاهندگی
۳۴	 ۱-۳- مقدمه
۳۵	 ۲-۳- روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی (GEP)
۳۵	 ۱-۲-۳- الگوریتم هوشمند توسعه ژنی در بیان کلی
۳۷	 ۱-۱-۲-۳- الگوریتم ژنتیک
۳۹	 ۲-۱-۲-۳- برنامه‌نویسی ژنتیکی
۳۹	 ۲-۲-۳- ژنوم
۳۹	 ۳-۲-۳- ژن‌های الگوریتم توسعه ژنی
۴۲	 ۴-۲-۳- کروموزوم‌های چند ژنی
۴۴	 ۵-۲-۳- تعاملات پس از ترجمه و توابع ارتباطی
۴۸	 ۶-۲-۳- عملگرهای ژنتیکی
۴۸	 ۱-۶-۲-۳- انتخاب و تکرار
۵۰	 ۲-۶-۲-۳- جهش
۵۱	 ۳-۲-۲-۳- جابجایی و قرار دادن عناصر به دنبال هم
۵۲	 ۴-۲-۲-۳- نو ترکیبی

۳-۳-روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی (GMDH).....	۵۴
۳-۳-۱-الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی در بیان کلی.....	۵۴
۳-۳-۲-طریقه عملکرد الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی.....	۵۸
فصل ۴: ارائه مدل‌های کاهندگی جدید.....	۶۵
۴-۱-مقدمه.....	۶۶
۴-۲-عوامل موثر بر جنبش نیرومند زمین.....	۶۶
۴-۲-۱-بزرگای زلزله (M).....	۶۷
۴-۲-۲-فاصله (R).....	۶۸
۴-۲-۳-سرعت موج برشی (V_s).....	۶۹
۴-۳-پارامتر جنبش نیرومند زمین.....	۷۰
۴-۴-تهیه کاتالوگ نهایی.....	۷۱
۴-۵-پیشنهاد روابط کاهندگی.....	۷۵
۴-۵-۱-رابطه کاهندگی حاصل از روش الگوریتم هوشمند توسعه‌زنی (GEP).....	۷۵
۴-۵-۲-رابطه کاهندگی حاصل از روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی (GMDH).....	۸۱
۴-۶-مقایسه رابطه کاهندگی حاصل از دو روش الگوریتم هوشمند توسعه‌زنی (GEP) و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی (GMDH).....	۸۴
۴-۷-مقایسه رابطه کاهندگی حاصل شده با برخی پژوهش‌های اخیر.....	۸۹
فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۹۵
۵-۱-مقدمه.....	۹۶
۵-۲-نتیجه‌گیری.....	۹۶

۹۷ ۵-۳-نوآوری

۹۷ ۵-۴-پیشنهادهات

۹۹ پیوست

۱۱۳ مراجع

فهرست جداول

جدول ۴-۱: عملگرهای تعریف شده در الگوریتم توسعه ژنی ۷۶

جدول ۴-۲: تنظیمات لحاظ شده در الگوریتم توسعه ژنی ۷۷

جدول ۴-۳: مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، تابع برازندگی، ضریب تبیین و انحراف معیار باقیمانده‌ها برای رکوردهای آموزشی و آزمایشی در دو روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی ۸۶

جدول ۴-۴: مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، تابع برازندگی، ضریب تبیین و انحراف معیار باقیمانده‌ها برای دو روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و پژوهش‌های اخیر ۹۴

فهرست اشکال

- شکل ۳-۱: فلوجارت الگوریتم توسعه ژنی ۳۷
- شکل ۳-۲: ژن با طول ژن ۳۱ و طول سر ۱۵ و طول دنباله ۱۶ ۴۰
- شکل ۳-۳: درخت توسعه ژن شکل (۲-۳) ۴۰
- شکل ۳-۴: ژن جهش یافته ژن شکل (۲-۳) در موقعیت ۲ ۴۱
- شکل ۳-۵: درخت توسعه ژن جهش یافته شکل (۲-۳) ۴۱
- شکل ۳-۶: ژن و درخت توسعه ژن جهش یافته ژن شکل (۲-۳) در موقعیت ۵ ۴۲
- شکل ۳-۷: کروموزوم با سه ژن و زیر درخت توسعه ۴۳
- شکل ۳-۸: کروموزوم جبری با سه ژن و زیر درخت توسعه ۴۵
- شکل ۳-۹: کروموزوم جبری با سه ژن و زیر درخت توسعه با تابع ارتباطی جبری ۴۵
- شکل ۳-۱۰: کروموزوم بولی با سه ژن و زیر درخت توسعه با تابع ارتباطی بولی ۴۷
- شکل ۳-۱۱: نسلهای ۰ و ۱ و ۸ با انتخاب و تکرار ۵۰
- شکل ۳-۱۲: جهش در یک کروموزوم ۵۰
- شکل ۳-۱۳: جابه‌جایی نوع ۱ در یک کروموزوم ۵۱
- شکل ۳-۱۴: جابه‌جایی نوع ۲ در یک کروموزوم ۵۲
- شکل ۳-۱۵: جابه‌جایی نوع ۳ در یک کروموزوم ۵۲
- شکل ۳-۱۶: نوترکیبی یک نقطه‌ای در یک کروموزوم ۵۳

- شکل ۳-۱۷: نوترکیبی دو نقطه‌ای در یک کروموزوم ۵۳
- شکل ۳-۱۸: نوترکیبی ژنی در یک کروموزوم ۵۴
- شکل ۳-۱۹: محاسبه متغیرهای با درجه بالاتر از نمونه ساده آنها ۵۶
- شکل ۳-۲۰: برنامه پایه توزیع متغیرها ۵۷
- شکل ۳-۲۱: ورودی به الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی ۵۹
- شکل ۳-۲۲: ساختمان متغیرهای جدید ۶۰
- شکل ۳-۲۳: ساختار آرایه جدید Z ۶۱
- شکل ۳-۲۴: درخت چندجمله‌ای ۶۳
- شکل ۴-۱: انواع فواصل تعریف شده ۶۹
- شکل ۴-۲: نمودار پراکندگی بزرگا بر حسب فاصله و سرعت موج برشی ۷۳
- شکل ۴-۳: نمودار تعداد رکوردها بر حسب بزرگا و فاصله ۷۴
- شکل ۴-۴: درختان توسعه رابطه کاهندگی بیشینه شتاب افقی زمین ۷۹
- شکل ۴-۵: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۸۰
- شکل ۴-۶: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فواصل کانونی ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۸۱
- شکل ۴-۷: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۸۲
- شکل ۴-۸: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فواصل کانونی ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۸۳

شکل ۴-۹: اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GEP و هدف برای هر رکورد ۸۷

شکل ۴-۱۰: اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GMDH و هدف برای هر رکورد ۸۸

شکل ۴-۱۱: درصد اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GEP و هدف برای هر رکورد زلزله ۸۸

شکل ۴-۱۲: درصد اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GMDH و هدف برای هر رکورد زلزله ۸۹

شکل ۴-۱۳: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۴/۵ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۹۰

شکل ۴-۱۴: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۶ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۹۱

شکل ۴-۱۵: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۷/۵ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۹۱

شکل ۴-۱۶: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۹۲

شکل ۴-۱۷: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فاصله کانونی ۶۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۹۳

شکل ۴-۱۸: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فاصله کانونی ۱۰۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه ۹۳

فصل ۱: کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

زندگی بشر همواره متأثر از حوادث طبیعی از جمله سیل، طوفان، زلزله و ... بوده است و این حوادث همواره جان و مال انسان‌ها را مورد تهدید قرار داده‌اند. صد البته که وقوع این حوادث طبیعی هیچگاه متوقف نخواهد شد و آیندگان نیز همواره مورد تهدید قرار خواهند داشت. زلزله یکی از مهمترین و غیر قابل پیش‌بینی‌ترین این حوادث می‌باشد. معمولاً تعداد زیادی زلزله به صورت سالانه در جهان اتفاق می‌افتد، البته تعدادی از آن‌ها در محیط‌های خالی از سکنه و نقاط بایر رخ می‌دهند که قطعاً تهدیدی برای انسان به حساب نمی‌آیند و تعدادی از آن‌ها هم آنقدر خفیف و با شدت کم بوده که حتی توسط انسان حس نشده و تنها توسط دستگاه‌های شتابنگار ثبت می‌شوند. با این حال وقوع زلزله‌هایی با شدت بالا در محیط‌های مسکونی نیز محتمل می‌باشد و خطر همواره بشر را تهدید می‌کند.

کشورهای ژاپن، آمریکا، چین، هند، نیوزلند و ایران جزو کشورهای لرزه‌خیز دنیا به حساب می‌آیند. در ژاپن از سال ۱۹۴۵ تا ۱۹۹۵ میلادی، طی ۵۰ سال ۱۴ زلزله با بزرگای بیشتر از ۶/۵ ریشتر رخ داده است که بیش از ۸۰۰۰ نفر قربانی بر جای گذاشته است. زلزله فوکوشیما (۲۰۱۱) با بزرگای گشتاوری حدود ۹ جزو شدیدترین زلزله‌های ژاپن از سال ۱۹۰۰ می‌باشد. رکورد بزرگ‌ترین زلزله تاریخ با بزرگای ۹/۵ ریشتر نیز متعلق به کشور شیلی می‌باشد، که در سال ۱۹۶۰ میلادی رخ داده است [۱].

گرچه در چند سده قبل، از زلزله به عنوان پدیده‌ای ناشناخته یاد می‌شده است، اما امروزه با توجه به پیشرفت‌های علمی حاصل شده در زمینه ژئوتکنیک لرزه‌ای و شناخت بیشتر ساختار درونی زمین، درک مراحل مختلف وقوع زلزله و اثرات آن بر جنبش زمین ممکن شده است.

البته با وجود پیشرفت‌های حاصل شده، همچنان امکان پیش‌بینی دقیق زمان وقوع زلزله در هیچ نقطه از جهان وجود ندارد، ولی می‌توان با ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، تا اندازه‌ای برای مقابله با آن آماده شد. در واقع هدف از طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، ساخت سازه‌هایی است که بتوانند در برابر بار لرزه‌ای مقاومت کرده و متحمل خسارات زیاد و جدی نشده و جان ساکنین را به خطر نیندازند. برای حصول این هدف، به پیش‌بینی و تخمین شدت زلزله محتمل در هر ناحیه به تناسب ویژگی‌های مختلف آن ناحیه نیاز می‌باشد، که جز از طریق تحلیل خطر امکان‌پذیر نخواهد بود.

هنگامی که زلزله‌ای رخ می‌دهد امواج لرزه‌ای از منبع زلزله به اطراف منتشر شده و به سرعت در امتداد پوسته جامد زمین حرکت می‌کنند. زمانی که این امواج به سطح زمین می‌رسند، لرزشی ایجاد می‌کنند که ممکن است ثانیه‌ها تا دقیقه‌ها به طول انجامد. شدت و دوام لرزش در یک محل خاص به بزرگی و موقعیت زلزله و همچنین خصوصیات محل بستگی دارد. در محل‌هایی نزدیک به منبع زلزله‌های شدید، لرزش زمین ممکن است خسارات سنگینی به بار آورد. گرچه امواج زلزله در بخش عمده‌ای از مسیرشان، از منبع زلزله تا سطح زمین، در بستر سنگی حرکت می‌کنند، لیکن قسمت پایانی مسیر آنها غالبا در داخل لایه‌های خاک بوده و خصوصیات خاک می‌تواند ماهیت ارتعاشات سطح زمین را بسیار تحت تاثیر قرار دهد. لایه‌های خاک در مقابل امواج زلزله شبیه فیلترها عمل می‌کنند زیرا فرکانس خاصی از ارتعاشات را مستهلک و در فرکانس‌های دیگر آنها را تشدید می‌نمایند. از آنجایی که غالبا شرایط خاک در طول یک فاصله کم شدیداً تغییر می‌کند، میزان لرزش زمین در یک ناحیه کوچک ممکن است تغییرات زیادی داشته باشد. بنابراین میزان جنبش نیرومند زمین به بزرگا، فاصله سایت تا منبع، مکانیک منبع، زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی سطح و خواص دینامیکی انتشار ماده نسبت داده می‌شود [۲]. همچنین پارامترهای دیگری از جمله رفتار غیرخطی خاک، جهت‌داری، انتشار گسیختگی، اثرات حوزه و اثر افت تنش بر جنبش زمین، می‌توانند حتی از برخی از پارامترهای مستقل فوق نیز موثرتر واقع شوند [۳].

برای پیش‌بینی و تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین به واسطه استفاده از پارامترهای موثر فوق از روابطی به نام روابط کاهندگی استفاده می‌شود. برای حصول این روابط معمولاً از دو روش استفاده می‌شود که عبارتند از روش تجربی و روش تصادفی (نیمه تئوری) [۴].

روش تجربی روشی قدیمی‌تر است که در اوایل ظهور روابط کاهندگی برای تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین مورد استفاده قرار می‌گرفت. این روش برای مناطقی که دارای داده‌های قابل ملاحظه‌ای می‌باشند قابل استفاده است. فرم کلی روابط تجربی بدین صورت می‌باشند:

$$\ln A = C_0 + f(m) + f(r) + f(soil) + \varepsilon \quad (1-1)$$

که در این رابطه A دامنه حرکت زمین است و نیز می‌تواند شتاب حرکت زمین یا دامنه طیفی باشد. $f(m)$ تابعی از بزرگا، $f(r)$ تابعی بر حسب فاصله محل ثبت رکورد تا منبع و $f(soil)$ تابعی از شرایط محیطی و نوع زمین می‌باشد. C_0 یک مقدار ثابت و ε یک متغیر تصادفی است که به ازای هر مشاهده یک مقدار خاص حاصل می‌شود.

همچنین فرم روابط تجربی برای تخمین شدت زلزله محتمل نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$I_s = C_0 + f(m, I_0) + f(r) + f(soil) + \varepsilon \quad (2-1)$$

که در این رابطه I_s شدت زلزله در محل مورد بررسی و I_0 شدت زلزله در محل گسلش سطحی است.

روش تصادفی دومین روش برای تخمین پارامترهای جنبش نیرومند زمین بوده و که بر اساس خواص فیزیکی انرژی آزاد شده و مسیری که امواج لرزه‌ای آزاد شده طی می‌کنند عمل می‌کند. این روش نسبت به روش تجربی دارای دو مزیت عمده است. اول اینکه به واسطه این روش یک ارتباط تئوری بین خصوصیات

فیزیکی منبع و پارامترهای جنبش نیرومند زمین فراهم شده و دوما این روش در مناطقی که داده‌های کمی حاصل از زلزله‌های اخیر در آنها وجود دارد قابلیت استفاده دارند، در حالی که در این مناطق نمی‌توان از روش تجربی استفاده کرد.

به طور کلی روابط کاهندگی نشانگر کاهش پارامترهای جنبش نیرومند زمین با فاصله گرفتن از مرکز زلزله می‌باشند و معمولا خروجی حاصل از آنها بیشینه شتاب‌های افقی و عمودی زمین، بیشینه سرعت زمین و طیف‌های پاسخ الاستیک و غیر الاستیک می‌باشند [۵]. البته در اغلب پژوهش‌ها و مطالعات از روابط کاهندگی برای به دست آوردن بیشینه شتاب زمین استفاده می‌شود.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

امروزه اغلب مردم جهان با خطرات ناشی از زلزله‌ها مواجه و یا حداقل متاثر از آن هستند. کشورهای مختلف هر کدام تا حدودی در معرض خطر صدمات ناشی از زلزله قرار دارند. در واقع می‌توان گفت گرچه جلوگیری از وقوع زلزله و آسیب‌ها و خسارات آن غیرممکن است اما می‌توان با طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله علی‌الخصوص در نواحی حساس و پر خطر از نظر زلزله، تلفات جانی و خسارات ناشی از آن را کاهش داد که البته این طراحی مقاوم، نیازمند مطالعات لرزه خیزی و برآورد خطر لرزه‌ای است. از این رو در این پژوهش به تخمین پارامترهای جنبش نیرومند محتمل زمین پرداخته شده است.

۱-۳- اهداف و چشم انداز انجام پژوهش

انجام صحیح بررسی‌های تحلیل خطر زمین‌لرزه برای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، مستلزم بکار بردن مدل‌های کاهندگی مناسب است. لذا در این پژوهش با استفاده از روش‌های نوین و پیشرفته مبتنی بر هوش مصنوعی

به توسعه و ارائه روابط کاهندگی مناسب پرداخته می‌شود. هدف از انجام پژوهش پیش رو، ارائه رابطه کاهندگی جدید جهانی برای تخمین بیشینه شتاب افقی زمین^۱ با استفاده از دو روش هوشمند، الگوریتم هوشمند توسعه زنی^۲ و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی^۳ و در نهایت مقایسه نتایج حاصله می‌باشد.

باید در نظر داشت با توجه به گسترش شبکه شتابنگاری در سطح معین و وقوع زلزله‌های متعدد در سال‌های اخیر که باعث افزایش و کامل‌تر شدن بانک اطلاعاتی ثبت شده از لرزش‌ها شده است، دقت پیش‌بینی‌ها در ارائه روابط کاهندگی افزایش خواهد یافت که این مهم خود تاثیر به‌سزایی در بالابردن دقت روابط کاهندگی ارائه شده خواهد داشت. همچنین استفاده از دو روش هوشمند مطروحه امکان مقایسه بین نتایج به دست آمده برای یک کاتالوگ مشابه را فراهم آورده که در نهایت می‌تواند منجر به یک نتیجه‌گیری منصفانه بین این دو روش و گزینش روش دقیق‌تر شود.

۱-۴- مراحل انجام پژوهش

در این پژوهش ابتدا به مطالعه روابط کاهندگی موجود برای نواحی مختلف و روش‌های مورد استفاده پرداخته و مشاهده می‌شود، روابط کاهندگی در ابتدای ظهور خود با استفاده از روش‌های سنتی و در پی پیشرفت تکنولوژی و ظهور روش‌های هوشمند عمدتاً به واسطه روش الگوریتم هوشمند توسعه زنی ارائه شده‌اند. سپس به انواع روش‌های رگرسیونی اشاره شده و دو روش استفاده شده در این پژوهش به تفصیل شرح داده خواهند شد. در فصل چهارم نیز مراحل جمع‌آوری داده و آماده‌سازی کاتالوگ زلزله مورد بررسی قرار گرفته

^۱Horizontal component of peak ground acceleration(PGAH)

^۲Gene Expression Programming (GEP)

^۳Group Method of Data Handling (GMDH)

و به پردازش اطلاعات موجود پرداخته می‌شود. سپس به واسطه پردازش صورت گرفته مقادیر بیشینه شتاب افقی زمین برای هر یک از رکوردهای ثبت شده، استخراج می‌گردد.

در مرحله بعد با تعریف مقادیر بیشینه شتاب افقی زمین به عنوان خروجی و مقادیر بزرگا، فاصله کانونی و سرعت موج برشی به عنوان ورودی و اعمال تنظیمات اولیه مناسب، به تحقیق رابطه کاهندگی مناسب با بیشترین تطابق و کمترین خطا پرداخته می‌شود. در نهایت نیز به منظور سنجش میزان دقت روابط حاصله و ایجاد امکان مقایسه بین دو روش مطرح شده به محاسبه چند پارامتر مهم پرداخته خواهد شد .

فصل ۲: مروری بر ادبیات فنی و مهندسی تحقیق

۲-۱- مقدمه

اولین مدل‌های کاهندگی از دهه ۶۰ میلادی ارائه گردید. مدل‌های اولیه بسیار ساده و بر اساس پارامترهایی مانند بزرگا و فاصله تهیه می‌گردید و نقش قوی خاک‌ها در میزان و چگونگی خسارات وارده در ارائه این روابط نادیده گرفته می‌شد اما به دنبال خسارات وارده از زلزله‌های سال ۱۹۶۴ در نیگاتای ژاپن و آلاسکا و مخاطرات بالقوه ناشی از رشد صنعت نیروگاه‌های اتمی در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ پیشرفت‌هایی در این زمینه ایجاد شد و هم‌اکنون مدل‌های کاهندگی به مدل‌های پیچیده‌تری تبدیل شده‌اند که پارامترهای مختلفی مانند بزرگا، فاصله، جنس خاک، شرایط تکتونیکی و ... در آن‌ها لحاظ شده است. به علاوه توسعه علوم کامپیوتری موجب دقیق‌تر شدن این مدل‌ها گردیده است.

نیومن^۱ اولین کسی بود که در سال ۱۹۵۴ مدل کاهندگی بیشینه شتاب جنبش نیرومند زمین را بر پایه زمین‌لرزه‌های آمریکا برای شتاب نگاشت‌های وابسته به فاصله شتابنگار از مرکز زلزله و مستقل از بزرگای زلزله، ارائه نمود [۶].

پس از آن در سال‌های بین دهه ۷۰ تا ۸۰ میلادی پژوهش‌هایی توسط توسط محققینی همچون میلن^۲ و داوینپورت^۳ [۷]، استوا^۴ [۸]، دنهام^۵ و اسمال^۶ [۹]، دنووان^۷ [۱۰]، استوا و ویلاورد^۸ [۱۱]، ارفال^۹ و لاهود^{۱۰}

^۱Neumann

^۲Milne

^۳Davenport

^۴Esteva

^۵Denham

^۶Small

^۷Donovan

^۸Villaverde

^۹Orphal

^{۱۰}Lahoud

[۱۲]، تریفوناک^۱ [۱۳] و... انجام شد. در این پژوهش‌ها از داده‌های زمین‌لرزه‌ای و شتابنگاری کانادا و غرب آمریکا استفاده شده است. همچنین بزرگا و فاصله کانونی زمین‌لرزه در تمامی مدل‌ها دخالت داده شده‌اند. بزرگای موج سطحی (Ms) زمین‌لرزه‌های بکار گرفته شده بین ۴ تا ۷/۷ بوده و فاصله دستگاه‌های شتابنگار از کانون زلزله بین ۵ تا حداکثر ۳۰۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۲- مروری بر مدل‌های ارائه شده از سال ۱۹۸۰

۲-۲-۱- مدل کاهندگی اسپینوسا^۲ (۱۹۸۰)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های باختر آمریکا که دارای بزرگای محلی (M_L) ۴ تا ۷/۵ بوده و در فواصل ۵ تا ۳۰۰ کیلومتری ایستگاه شتابنگاری به وقوع پیوسته‌اند، ارائه شده است [۱۴].

۲-۲-۲- مدل کاهندگی باتیس^۳ (۱۹۸۱)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های کالیفرنیا که دارای بزرگای موج حجمی (M_b) ۵ تا ۶/۵ بوده و در فواصل ۱۰ تا ۳۵۰ کیلومتری ایستگاه شتابنگاری به وقوع پیوسته‌اند، ارائه شده است [۱۵].

^۱Trifunac

^۲Espinosa

^۳Battis

۲-۲-۳-مدل کاهندگی کمپبل^۱(۱۹۸۱)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های جهان با بزرگای بین ۵ تا ۷/۷ که در فواصل کمتر از ۵۰ کیلومتری ایستگاه ثبت‌کننده شتاب جنبش نیرومند زمین رخ داده اند، ارائه شده است. در این پژوهش نوع ساختگاه نیز در مطالعه ورود کرده و برای ساختگاه سنگی و خاکی با ضخامت بیش از ۱۰ متر در نظر گرفته شده است [۱۶].

۲-۲-۴-مدل کاهندگی بور^۲(۱۹۸۲)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های غرب آمریکا برای ساختگاه‌های خاکی و سنگی ارائه شده است [۱۷].

۲-۲-۵-مدل کاهندگی سابتا^۳ و پاگلیز^۴(۱۹۸۷)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های باختر آمریکا برای بسترهای سنگی می‌باشد. نوع سازوکار گسل نیز در این مدل وارد شده و دو نوع راندگی و امتداد لغز در آن در نظر گرفته شده است. به طوری که هر سازوکار شامل دو مدل بوده که مدل اول مربوط به زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۴/۵ تا ۶/۵ و مدل دوم مربوط به زمین‌لرزه با بزرگای ۶/۵ تا ۷/۴ می‌باشد [۱۸].

^۱Campbell

^۲Boore

^۳Sabetta

^۴Pugliese

۲-۲-۶-مدل کاهندگی پتروفسکی^۱ و مارسلینی^۲ (۱۹۸۸)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های کشورهای اروپایی، برای بسترهای خاکی و سنگی، بزرگای ۳ تا ۷ و فواصل ۸ تا ۲۰۰ کیلومتری ایستگاه‌های شتابنگاری ارائه گردیده است [۱۹].

۲-۲-۷-مدل کاهندگی آتکینسون^۳ و بور (۱۹۸۸)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های شمال باختری آمریکا که دارای بزرگای گشتاوری (M_w) ۵ تا ۷ بوده و در فواصل ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتری ایستگاه‌های شتابنگاری به وقوع پیوسته‌اند، ارائه شده است [۲۰].

۲-۲-۸-مدل کاهندگی تامورا^۴ و همکاران (۱۹۹۰)

این مدل بر اساس زمین‌لرزه‌های کانادا با بزرگای محلی (M_L) یا بزرگای موج حجمی (M_b) ۴/۵ تا ۷ که در فواصل بین ۱۰ تا ۲۰۰ کیلومتری از ایستگاه شتابنگاری ثبت شده‌اند، به منظور برآورد بیشینه شتاب افقی و قائم زمین ارائه گردیده است [۲۱].

^۱Petrovski
^۲Marcellini
^۳Atkinson
^۴Tamura

۲-۲-۹-مدل کاهندگی تئودولیدیس^۱ و پاپازاچوز^۲ (۱۹۹۲)

این مدل بر اساس زمین‌لرزه‌های کشورهای یونان، ژاپن و آلاسکا که دارای بزرگای موج سطحی (Ms) ۴/۵ تا ۷ بوده و در فواصل ۵ تا ۲۴۰ کیلومتری ایستگاه شتابنگاری به وقوع پیوسته‌اند، ارائه گردیده است [۲۲].

۲-۲-۱۰-مدل کاهندگی تنتو^۳ و همکاران (۱۹۹۲)

این مدل بر پایه داده‌های حاصل از زمین‌لرزه‌های ایتالیا که دارای بزرگای ۴ تا ۶/۶ بوده و در فواصل ۳۲ تا ۱۷۰ کیلومتری ایستگاه شتابنگاری به وقوع پیوسته‌اند، ارائه شده است [۲۳].

۲-۲-۱۱-مدل‌های کاهندگی صدیق^۴ و همکاران (۱۹۹۳)

این مدل بر پایه زمین‌لرزه‌های باختر آمریکا ارائه شده و شامل دو مدل برای بزرگای کوچکتر از ۶/۵ و بزرگتر از ۶/۵ می‌باشد که در آن نوع سازوکار گسل نیز وارد شده و این دو مدل برای هر دو سازوکار راندگی و امتداد لغز به صورت جداگانه ارائه شده‌اند [۲۴].

۲-۲-۱۲-مدل کاهندگی بور و همکاران (۱۹۹۳)

این مدل به صورت زیر ارائه شده است:

$$\log Y = b_1 + b_2 (M - 6) + b_3 (M - 6)^2 + b_4 r + b_5 \log r + b_6 G_B + b_7 G_C \quad (1-2)$$

^۱Theodulidis

^۲Papazachos

^۳Tento

^۴Sadigh

و شرایط ساختگاهی آن نیز به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} A: & \quad V_{S,30} > 750 \text{ m/s} \rightarrow G_B = 0, G_C = 0 \\ B: & \quad 360 < V_{S,30} \leq 750 \text{ m/s} \rightarrow G_B = 1, G_C = 0 \\ C: & \quad 180 < V_{S,30} \leq 360 \text{ m/s} \rightarrow G_B = 0, G_C = 1 \end{aligned} \quad (2-2)$$

که $V_{S,30}$ متوسط سرعت امواج برشی در عمق ۳۰ متری می باشد [۲۵].

۲-۲-۱۳-مدل کاهندگی سارما^۱ و فری^۲ (۱۹۹۵)

این مدل به شکل زیر ارائه شده است:

$$\log(PGA) = -3.436 + 0.8532M - 0.0192M^2 - (0.9011 \times \log(R)) - 0.002R - 0.0316S \quad (3-2)$$

که متغیر S در این رابطه برای بستر سنگی، صفر و برای بستر خاکی یک می باشد [۲۶].

۲-۲-۱۴-مدل کاهندگی امبرسیز و سیمپسون^۳ (۱۹۹۶)

در این مطالعه ۴۲۲ رکورد برداشت شده از ۱۵۷ زلزله به وقوع پیوسته در اروپا مورد استفاده قرار گرفته اند که دارای بزرگای موج سطحی (Ms) ۴ تا ۷/۹ و عمق کانونی کمتر از ۳۰ کیلومتر می باشد. همچنین مولفه افقی شتاب افقی ماکزیمم زمین به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده و مدل حرکت زمین به صورت زیر ارائه شده است:

^۱Sarma

^۲Free

^۳Simpson

$$\begin{aligned}\log Y &= b_1 + b_2 M_s + b_3 r + b_4 \log r + C_A S_A + C_S S_S \\ \log Y &= b_1 + b_2 M_s + b_3 r + b\end{aligned}\quad (4-2)$$

مقادیر ضرایب به کار رفته در این فرمول به صورت زیر می‌باشند:

$$b_1 = -1.48 ; b_2 = 0.266 ; b_3 = 0 ; b_4 = -0.922 ; C_A = 0.117 ; C_S = 0.124$$

و شرایط ساختگاهی در این مدل به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}\text{Rock :} & \quad V_s > 750 \text{ m/s} \rightarrow S_A = 1, S_S = 0 \quad (\text{site class: } R) \\ \text{Stiff Soil :} & \quad 360 < V_s \leq 750 \text{ m/s} \rightarrow S_A = 1, S_S = 0 \quad (\text{site class: } A) \\ \text{Soft Soil :} & \quad 180 < V_s \leq 360 \text{ m/s} \rightarrow S_A = 0, S_S = 1 \quad (\text{site class: } S) \\ \text{Very Soft Soil :} & \quad V_s \leq 180 \text{ m/s} \rightarrow S_A = 0, S_S = 1 \quad (\text{site class: } L)\end{aligned}\quad (5-2)$$

که V_s سرعت موج برشی در لایه خاکی می باشد.

همچنین مقدار انحراف معیار این رابطه محاسبه شده و برابر با ۰/۲۳ می‌باشد [۲۷].

۲-۲-۱۵-مدل کاهندگی آبراهامسون^۱ و سیلوا^۲ (۱۹۹۷)

در این مطالعه ۶۵۵ رکورد برداشت شده از ۵۸ زمین لرزه کم عمق به وقوع پیوسته، مورد استفاده قرار گرفته‌اند و طیف پاسخ شتاب برای میانگین مولفه‌های افقی و قائم به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در نهایت مدل کاهندگی آن به واسطه روش تجربی به صورت زیر ارائه شده است [۲۸]:

$$\ln S_a = f_1(M_w, r_{rup}) + F f_3(M_w) + H f_4(M_w, r_{rup}) + S f_5(PGA_{rock}) \quad (6-2)$$

^۱Abrahamson

^۲Silva

S_a : طیف پاسخ شتاب بر حسب (g)

F: نوع گسلش (۱ برای گسل معکوس، ۰,۵ برای گسل معکوس_مایل و صفر برای غیر از آن)

S: ضریب ساختگاه (صفر برای سنگ یا خاک کم عمق و یک برای خاک عمیق)

۲-۲-۱۶-مدل کاهندگی بور و همکاران (۱۹۹۷)

در این مطالعه از ۲۷۱ رکورد برداشت شده از ۲۱ زمین‌لرزه سطحی به وقوع پیوسته در شمال غربی آمریکا، استفاده شده است. در این مدل پارامترهای بزرگا گشتاوری، فاصله کانونی و سرعت موج برشی به عنوان متغیر و شتاب حرکت زمین برحسب g نیز به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. بزرگا گشتاوری رکوردهای مورد استفاده بین ۵/۵ تا ۷/۵ بوده و همچنین مکانیزم گسلش نیز به طور غیر مستقیم در روابط دخالت داده شده‌اند، بدین شکل که برای هر نوع گسلش داده‌ها به طور جداگانه دسته‌بندی شده و در نهایت برای هر دسته رابطه‌ای مجزا ارائه شده است.

این مدل به صورت زیر می‌باشد [۲۹]:

$$\ln(Y) = b_1 + b_2(M_w - 6) + b_3(M_w - 6)^2 + b_4r + b_5 \ln(r) + b_v \ln\left(\frac{V_s}{V_A}\right) \quad (۷-۲)$$

لازم به ذکر است که مقدار ضریب b_1 وابسته به نوع گسلش بوده (b_{1SS} برای زلزله‌ها با مکانیزم راستالغز، b_{1RS} برای زلزله‌های با مکانیزم معکوس و b_{1ALL} برای زلزله‌هایی که نوع گسلش در آن‌ها مشخص نمی‌باشد) و مقادیر ضرایب به کار رفته در این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$b_{1SS} = -0.313 ; b_{1RS} = -0.117 ; b_{1ALL} = -0.242 ; b_2 = 0.527$$

$$b_3 = 0.000 ; b_4 = 0.000 ; b_5 = -0.778 ; b_V = -0.371 ; V_A = 1396$$

۲-۲-۱۷-مدل کاهندگی اسپودیچ^۱ و همکاران (۱۹۹۹)

در این تحقیق از ۱۴۲ شتابنگاشت ثبت شده حاصل از ۳۹ زلزله به وقوع پیوسته در سراسر آمریکا استفاده شده است. داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده دارای بزرگای گشتاوری بزرگتر از ۵ بوده که در فاصله کمتر از ۱۰۵ کیلومتری نیز ثبت شده‌اند. در نهایت مدل ارائه شده به صورت زیر می‌باشد [۳۰]:

$$\log(Z) = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4 \log(D) + b_5 \Gamma \quad (۸-۲)$$

که پارامتر D به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$D = \sqrt{r_{jb}^2 + h^2} \quad (۹-۲)$$

ضریب Γ هم ضریب تاثیر نوع زمین می‌باشد که به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\text{Rock : } V_S > 620 \text{ m/s} \rightarrow \Gamma = 0$$

$$\text{Soil : } V_S \leq 620 \text{ m/s} \rightarrow \Gamma = 1$$

و باقی ضرایب ثابت به کار رفته در این رابطه کاهندگی به صورت زیر می‌باشند:

$$b_1 = 0.299 ; b_2 = 0.299 ; b_3 = 0 ; b_4 = -1.052 ; b_5 = 0.112 ; h = 7.27$$

^۱Spudich

۲-۲-۱۸-مدل کاهندگی آمبرسیز و داگلاس^۱(۲۰۰۰)

در این پژوهش مدل جنبش نیرومند زمین به صورت زیر ارائه شده است:

$$\log y = b_1 + b_2 M_s + b_3 d + b_4 S_A + b_5 S_S \quad (۲-۱۰)$$

که این رابطه بر اساس شتابنگاشت‌هایی با فاصله کانونی کمتر از ۲۰ کیلومتر و بزرگا بیشتر از ۵/۸ حاصل شده و y نشاندهنده‌ی بیشینه شتاب زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد [۳۱].

مقادیر ثوابت استفاده شده در رابطه بالا برای مولفه افقی بیشینه شتاب زمین به صورت زیر می‌باشد:

$$b_1 = 0.299 ; b_2 = 0.299 ; b_3 = 0 ; b_4 = -1.052 ; b_5 = 0.112 ; h = 7.27$$

همچنین این مقادیر برای مولفه قائم بیشینه شتاب زمین به صورت زیر می‌باشد:

$$b_1 = 0.299 ; b_2 = 0.299 ; b_3 = 0 ; b_4 = -1.052 ; b_5 = 0.112 ; h = 7.27$$

در این پژوهش نوع خاک بر اساس سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری به چهار دسته تقسیم شده است

که مقادیر S_A و S_S بر اساس آن به صورت زیر تعیین می‌شوند:

Rock :	$V_s > 750 \text{ m/s}$	$\rightarrow S_A = 0, S_S = 0$	; 23 recods
Stiff Soil :	$360 < V_s \leq 750 \text{ m/s}$	$\rightarrow S_A = 1, S_S = 0$	; 68 recods
Soft Soil :	$180 < V_s \leq 360 \text{ m/s}$	$\rightarrow S_A = 0, S_S = 1$	; 87 recods
Very Soft Soil :	$V_s \leq 180 \text{ m/s}$	$\rightarrow S_A = 0, S_S = 1$	; 4 recods

^۱Douglas

۲-۲-۱۹-مدل کاهندگی خادمی (۲۰۰۲)

در این پژوهش مدل حرکت زمین به صورت زیر ارائه شده است:

$$Y = C_1 \exp(C_2 M) ((R + C_3 \exp(C_4 M)) C_5) + C_6 S \quad (۱۱-۲)$$

مقادیر ضرایب ثابت C به ازای بیشینه شتاب افقی برابر است با:

$$C_1 = 0.040311 ; C_2 = 0.417342 ; C_3 = 0.001$$

$$C_4 = 0.65 ; C_5 = -0.351119 ; C_6 = -0.035852$$

مقادیر ضرایب ثابت C به ازای بیشینه شتاب عمودی برابر است با:

$$C_1 = 0.0015 ; C_2 = 0.8548 ; C_3 = 0.001$$

$$C_4 = 0.4 ; C_5 = -0.463 ; C_6 = 0.0006$$

این مطالعه برای دو بستر سنگی و خاکی انجام شده است که به ازای بستر سنگی $S=0$ و به ازای بستر خاکی $S=1$ می باشد [۳۲].

۲-۲-۲۰-مدل کاهندگی فوکوشیما و همکاران (۲۰۰۳)

در این مطالعه مدل کاهندگی به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$\log S_a = aM - \log(R + d10^{eM}) + bR + C_R S_R + C_S S_S \quad (۱۲-۲)$$

^۱Khademi

^۲Fukushima

که در این رابطه اگر ساختگاه خاک باشد، $C_R=0$, $C_S=1$ و اگر ساختگاه سنگ باشد $C_R=1$, $C_S=0$ می باشد [۳۳].

۲-۲-۲۱- مدل کاهندگی سم اوزبی^۱ و همکاران (۲۰۰۴)

این مدل به صورت زیر ارائه شده است [۳۴]:

$$\log(Y) = a + b(M - 6) + c(M - 6)^2 + d \log(\sqrt{R^2 + h^2}) + eG_1 + fG_2 + \sigma \quad (۱۳-۲)$$

که در آن برای بزرگ‌های کمتر از ۶ از بزرگای محلی (M_L) و برای بزرگ‌های بزرگتر از ۶ از بزرگای گشتاوری (M_W) استفاده شده است. همچنین مقادیر G_1 و G_2 با توجه به نوع ساختگاه برابر با مقادیر زیر خواهند بود:

$$A, B \rightarrow G_1 = G_2 = 0$$

$$C \rightarrow G_1 = 1, G_2 = 0$$

$$D \rightarrow G_1 = 0, G_2 = 1$$

۲-۲-۲۲- مدل کاهندگی مگاواتی^۲ و همکاران (۲۰۰۵)

این مدل برای محاسبه بیشینه شتاب افقی زمین و بیشینه سرعت زمین به صورت زیر ارائه شده است [۳۵]:

$$\ln(Y) = a_0 + a_1 M_w + a_2 M_w^2 + a_3 \ln(R) + a_4 R + a_5 H + \varepsilon \quad (۱۴-۲)$$

^۱Cem Özbey

^۲Megawati

که ضرایب ثابت به کار رفته در این رابطه برای محاسبه بیشینه شتاب افقی زمین به صورت زیر تعیین شده است:

$$a_0 = -7.198 ; a_1 = 2.3691 ; a_2 = -0.013856$$

$$a_3 = -1.000 ; a_4 = -0.001548 ; a_5 = -0.08909$$

همچنین ضرایب مورد استفاده برای محاسبه بیشینه سرعت زمین نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$a_0 = -12.94 ; a_1 = 3.6232 ; a_2 = -0.105778$$

$$a_3 = -0.9978 ; a_4 = -0.000528 ; a_5 = -0.08447$$

۲-۲-۲۳- مدل امیری^۱ و همکاران (۲۰۰۷)

مدل کاهندگی ارائه شده برای ایران در این پژوهش به صورت زیر می‌باشد [۳۶]:

$$\ln y = C_1 + C_2 M_s + C_3 \ln(R + C_4 \exp(M_s)) + C_5 R \quad (۱۵-۲)$$

که y نشاندهنده بیشینه شتاب زمین بر حسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در این مطالعه ایران به دو ناحیه البرز-ناحیه مرکزی و زاگرس و همچنین نوع بستر به صورت زیر به دو دسته خاک و سنگ تقسیم بندی شده است:

$$\text{Rock : } V_s \geq 375 \text{ m/s}$$

$$\text{Soil : } V_s < 375 \text{ m/s}$$

ضرایب ثابت با توجه به تقسیم‌بندی ذکر شده برای محاسبه شتاب افقی زمین به صورت زیر می‌باشند:

^۱Amiri

rock sites and Alborz-central Iran: $C_1 = 4.15$, $C_2 = 0.623$, $C_3 = -0.96$

soil sites and Alborz-central Iran: $C_1 = 3.65$, $C_2 = 0.678$, $C_3 = -0.95$

rock sites and Zagros: $C_1 = 5.67$, $C_2 = 0.318$, $C_3 = -0.77$, $C_5 = -0.016$

soil sites and Zagros: $C_1 = 5.51$, $C_2 = 0.55$, $C_3 = -1.31$

همچنین این ضرایب برای محاسبه شتاب قائم زمین به صورت زیر می‌باشند:

rock sites and Alborz-central Iran: $C_1 = 3.46$, $C_2 = 0.635$, $C_3 = -0.996$

soil sites and Alborz-central Iran: $C_1 = 3.03$, $C_2 = 0.732$, $C_3 = -1.03$

rock sites and Zagros: $C_1 = 5.26$, $C_2 = 0.289$, $C_3 = -0.8$, $C_5 = -0.018$

soil sites and Zagros: $C_1 = 5.52$, $C_2 = 0.36$, $C_3 = -1.25$

۲-۲-۲۴- مدل کاهندگی مندال^۱ و همکاران (۲۰۰۹)

این مدل به صورت زیر می‌باشد [۳۷]:

$$\ln(Y) = a + bM_w - \ln(r_{jb}^2 + c^2)^{1/2} + dS \quad (۲-۱۶)$$

ضرایب a، b، c و d نیز برابر با مقادیر زیر هستند:

$$a = -7.9527 ; b = 1.4043 ; c = 19.82 ; d = -0.0682$$

ضریب S که به نوع ساختگاه مربوط می‌شود نیز به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\text{Rock / Stiff : } V_s > 760 \text{ m/s} \rightarrow S = 0$$

$$\text{Soil : } 250 \leq V_s < 760 \text{ m/s} \rightarrow S = 1$$

^۱Mandal

۲-۲-۲۵-مدل کاهندگی اورنساماراس^۱ و همکاران (۲۰۱۰)

این مدل به صورت زیر ارائه شده است [۳۸]:

$$\log(PGA) = -2.622 + 0.643M_w - 1.249 \log\left(\sqrt{r_{jb}^2 + 3.19^2}\right) + 0.344S_s \quad (۱۷-۲)$$

که در این رابطه S_s با توجه به مقدار سرعت موج برشی برابر با مقادیر زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$360 \leq V_{s30} \leq 750 \text{ m/s} \rightarrow S_s = 1$$

$$V_{s30} > 750 \text{ m/s} \rightarrow S_s = 0$$

۲-۲-۲۶-مدل کاهندگی علوی^۲ (۲۰۱۱)

در این مطالعه رابطه کاهندگی برای تخمین پارامتر جنبش نیرومند زمین برای داده‌های شتابنگاشتی جهانی

به صورت زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \ln(PGA) = & 6 - \ln(R_{ClstD}) + \left(\frac{-1}{6}\right)(\ln(R_{ClstD}))^2 + \left(\frac{1}{6}\right)M_w \ln(R_{ClstD}) + \frac{6}{V_{s,30}} \\ & + \frac{(\ln(R_{ClstD}))^3}{V_{s,30}} + \frac{64}{-8 - V_{s,30} + (5 * V_{s,30} \sin(\lambda)) + \frac{V_{s,30}}{M_w - 7}} \end{aligned} \quad (۱۸-۲)$$

^۱Ornthammarath

^۲Alavi

که در این رابطه بزرگا گشتاوری (M_w)، فاصله، متوسط سرعت موج برشی در عمق ۳۰ متری و زاویه گسل به عنوان متغیرها و شتاب افقی زمین بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند [۳۹].

۲-۲-۲۷-مدل کانورتیتو^۱ و همکاران (۲۰۱۲)

در این پژوهش از اطلاعات زلزله‌های به وقوع پیوسته در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ که توسط ۲۹ ایستگاه ثبت شده‌اند استفاده شده است و در نهایت رابطه کاهندگی برای تخمین شتاب افقی زمین به صورت زیر ارائه شده است:

$$\log(PGA) = a + bM + c \log \sqrt{R^2 + h^2} + dR + eS \quad (19-2)$$

که در این رابطه M ممان گشتاوری (M_w) و R فاصله کانونی می‌باشد [۴۰].

۲-۲-۲۸-مدل گرایزر^۲ و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۳)

در این پژوهش مدل جنبش نیرومند زمین به صورت زیر ارائه شده است [۴۱، ۴۲]:

$$\begin{aligned} \ln(Y) = \ln(A) - 0.5 \ln \left(\left(1 - \frac{R}{R_2} \right)^2 + 4D_2^2 \frac{R}{R_2} \right) - 0.5 \ln \left(\left(1 - \sqrt{\frac{R}{100}} \right)^2 \right. \\ \left. + 4D_3^2 \sqrt{\frac{R}{100}} \right) - 0.24 \ln \left(\frac{V_{S,30}}{484.5} \right) - 0.5 \ln \left(\left(1 - \sqrt{\frac{R}{R_5}} \right)^2 + 1.96 \sqrt{\frac{R}{R_5}} \right) \end{aligned} \quad (20-2)$$

^۱ Convertito

^۲ Graizer

که مقادیر A ، R₂ ، D₂ و R₅ به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} A &= (c_1 + \arctan(M + c_2) + c_3)F \\ R_2 &= c_4M + c_5 \\ D_2 &= c_6 \cos(c_7(M + c_8)) + c_9 \\ R_5 &= c_{11}M^2 + c_{12}M + c_{13} \end{aligned} \quad (21-2)$$

بزرگای به کار رفته در این روابط از نوع بزرگای گشتاوری (M_w) بوده و مقادیر ثابت‌های c به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.14 ; c_2 = -6.25 ; c_3 = 0.37 ; c_4 = 3.67 ; c_5 = -12.42 \\ c_6 &= -0.125 ; c_7 = 1.19 ; c_8 = -6.15 ; c_9 = 0.525 ; c_{10} = -0.16 \\ c_{11} &= 18.04 ; c_{12} = -167.9 ; c_{13} = 476.3 \end{aligned}$$

همچنین مقدار D₃ یا توجه به عمق لای موجود در محل محاسبه شده و به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} Z < 1km &\rightarrow D_3 = 0.65 \\ Z \geq 1km &\rightarrow D_3 = 0.35 \end{aligned}$$

همچنین نوع گسل نیز با استفاده از پارامتر F به کار رفته در رابطه کاهندگی ذکر شده وارد شده است، به این صورت که به ازای گسل‌های نرمال و امتدادلغز مقدار F برابر با ۱ و برای گسل‌های معکوس مقدار آن برابر با ۱/۲۸ می‌باشد.

۲-۲-۲۹-مدل و کارینو^۱ و همکاران (۲۰۱۴)

در این مطالعه رابطه کاهندگی به صورت زیر می‌باشد:

$$\ln y = C_1 + C_2(M - 6) + C_3(M - 6)^2 - \ln R + C_5 R + C_6 h \quad (22-2)$$

در این مدل بزرگا به صورت مستقیم وارد نشده و به واسطه ضریب M که با توجه به مقدار بزرگا گشتاوری (M_w) و زمان تناوب ارتعاش تعیین می‌شود، در رابطه کاهندگی موردنظر اثرگذار خواهد بود.

$$M_w > 7.6 \text{ and } T \leq 1s \rightarrow M = 7.6$$

$$M_w > 8.0 \text{ and } T > 1s \rightarrow M = 8.0$$

ضرایب C ثابت‌های معادله هستند که مقادیر آن‌ها به صورت زیر می‌باشند:

$$C_1 = 8.5851 ; C_2 = 1.4863 ; C_3 = -0.4758 ; C_5 = -0.00138 ; C_6 = 0.00484$$

همانطور که مشاهده می‌شود تاثیر نوع زمین در این رابطه کاهندگی در نظر گرفته نشده است [۴۳].

۲-۲-۳۰-مدل شامخی امیری (۲۰۱۴)

این مدل به ارزیابی مقدار بیشینه شتاب افقی و قائم زمین برای ایران می‌پردازد و در آن ایران به دو ناحیه البرز- ایران مرکزی و زاگرس با ساختگاه خاکی و سنگی تقسیم‌بندی شده که در نهایت چهار رابطه از آن نتیجه شده است.

^۱Vakareanu

روابط ارزیابی شده برای ناحیه البرز- ایران مرکزی به صورت زیر بوده:

$$\begin{aligned} \text{rock: } \log(PGA) &= \sqrt{2M} - \log(M+R) + \frac{0.69}{\sqrt{R}} - \log(A) \\ \text{soil: } \log(PGA) &= \frac{2.53}{\exp(A+\sqrt{A})} + \log\left(\frac{35+M^4}{RA}\right) \end{aligned} \quad (23-2)$$

و روابط ارزیابی شده برای ناحیه زاگرس به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \text{rock: } \log(PGA) &= \ln\left[\log(M^4+101-2R)\right] + 3.11 - R^{0.25} - (\ln(A))^3 \\ \text{soil: } \log(PGA) &= \ln\left[\frac{(5.74-A)^2}{8.05+R} + 5.74\right] + 0.5\ln\left[\frac{M^2A-3.55}{A^2R}\right] \end{aligned} \quad (24-2)$$

که در این رابطه M بزرگای موج سطحی (Ms) و R فاصله کانونی بوده و پارامتر A برای بیشینه شتاب افقی برابر با یک و برای بیشینه شتاب قائم برابر با دو می‌باشد [۴۴].

۲-۲-۳۱- مدل کان^۱ و شربام^۲ (۲۰۱۵)

در این مطالعه مدل جنبش نیرومند زمین به صورت زیر ارائه شده است [۴۵]:

$$\ln Y = a_0 + a_1 M_w + a_2 M_w^2 + (a_3 + a_4 M_w) \ln \sqrt{R_{JB}^2 + a_5^2} + a_6 \ln \frac{V_{S,30}}{760} + a_7 S_N + a_8 S_R \quad (25-2)$$

که مقادیر ثوابت استفاده شده در آن به صورت زیر می‌باشند:

^۱Kuehn

^۲Scherbaum

$$a_1 = -2.015257331 ; a_2 = -0.160029327 ; a_3 = -2.819451336 ; a_4 = 0.227083419$$

$$a_5 = 12.11797779 ; a_6 = -0.448080444 ; a_7 = -0.141680182 ; a_8 = 0.128978526$$

همچنین نوع گسل نیز به واسطه دو پارامتر و در این رابطه وارد شده است که با توجه به دسته‌بندی گسل‌ها به سه دسته به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{Normal} & : S_N = 1 , S_R = 0 \\ \text{Reverse} & : S_N = 0 , S_R = 1 \\ \text{Strike-slip} & : S_N = S_R = 0 \end{aligned}$$

۲-۲-۳۲-مدل زاگولو و همکاران (۲۰۱۷)

در این پژوهش مدل حرکت زمین به صورت زیر ارائه شده است:

$$\log Y = a + bM + c \log R \quad (2-26)$$

در صورتی که واحد پارامتر Y بر حسب m/s^2 باشد ثابت‌های a ، b و c برابر با مقادیر زیر خواهند بود:

$$a = -2.1575 ; b = 0.8359 ; c = -1.969$$

این پژوهش برای فواصل کمتر از ۳۰ کیلومتر و و غالباً ۱۲ تا ۲۰ کیلومتر انجام شده است [۴۶].

۲-۲-۳۳-مدل کاهندگی کامار و همکاران (۲۰۱۷)

این رابطه کاهندگی برای ناحیه شمال شرق هیمالیا و به صورت زیر ارائه شده است:

^۱Zuccolo

^۲Kumar

$$\log(PGA) = -1.497 + 0.3882M - 1.19\log(R + e^{0.2876M}) \quad (27-2)$$

بزرگا رکوردهای استفاده شده در این پژوهش بین ۴ تا ۶/۸ می باشد [۴۷].

۲-۲-۳۴-مدل ون'و همکاران (۲۰۱۸)

در این پژوهش از شتابنگاشت‌های ثبت شده طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ در ۱۰۳ ایستگاه مختلف استفاده شده و مدل حرکت زمین به صورت زیر ارائه شده است:

$$\ln(Y) = a_1 + a_2M_S + a_3 \ln(R_{jb} + a_4M_S) + a_5R_{jb} + a_6 \ln(V_{S,30}) \quad (28-2)$$

که ثابت‌هایی که در این رابطه به کار رفته‌اند به شرح زیر می باشند:

$$a_1 = 0.5258 ; a_2 = -1.7383 ; a_3 = -1.0153 ; a_4 = 0.4079 ; a_5 = -0.0006 ; a_6 = -0.179$$

حدود بزرگا زلزله‌های به کار گرفته شده در این مطالعه بین ۴ تا ۷ و فاصله کمتر از ۲۰۰ کیلومتر می باشد [۴۸].

۲-۲-۳۵-مدل کاهندگی جوان'و همکاران (۲۰۱۸)

در این پژوهش روابط کاهندگی متعلق به هر دو مولفه قائم و افقی شتاب زمین بر اساس زلزله‌های شمال ایران ارائه شده است که مدل مولفه افقی به صورت زیر می باشد [۴۹]:

^۱Wen

^۲Javan

$$\log(PGA) = \log\left(\frac{M}{\sqrt{\log(e^{s^3} + e^M - R - (1/F))}}\right) + \ln\left(\frac{M+1}{RM}\right) + (\ln(\log(\sqrt{M}))) + 3 \quad (29-2)$$

در این مطالعه شتاب نگاشت‌های با بزرگای گشتاوری (M_w) ۴/۵ تا ۷/۴ و فاصله کانونی ۲-۱۰۰ کیلومتر استفاده شده‌اند. مقدار ضریب F که نشانگر نوع گسلش است با توجه به نوع گسل از ۰/۲۵ تا ۱ خواهد بود و ضریب S که نشانگر نوع گسل است نیز به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$Rock : \quad V_s \geq 375 \text{ m/s} \rightarrow S = 0$$

$$Soil : \quad V_s < 375 \text{ m/s} \rightarrow S = 1$$

فصل ۳: معرفی روش‌های توسعه روابط کابینگی

۳-۱- مقدمه

مدل‌ها نسخه کوچک شده یک پدیده هستند که دارای بیشترین شباهت به آن پدیده در مقیاسی متفاوت می‌باشند که در مواقع نیاز جایگزین پدیده‌ای واقعی می‌شوند تا خصوصیات آن را به نمایش بگذارند. می‌توان گفت مدل‌ها بازنمایی کلی و ساده شده از پدیده‌های جهان حقیقی هستند. هر گاه برای به نمایش درآوردن ساختار، فرایند یا پدیده‌ای تلاش شود بایستی از مدل‌ها بهره گرفت. امروزه روش‌های هوشمند که غالباً از طبیعت الهام می‌گیرند در حل مسائل پیچیده به کمک انسان آمده‌اند. از جمله روش‌های هوشمند که اخیراً مورد توجه و استفاده واقع شده‌اند می‌توان به روش‌های داده مبنای هوشمند مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، اسپالین رگرسیونی چند متغیره تطبیقی، الگوریتم هوشمند توسعه زنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و ... اشاره کرد که قادر به ارائه یک رابطه کلی بین اطلاعات پیچیده و حجیم حاصل از هر پدیده‌ای می‌باشند. در واقع در این روش‌ها یک برنامه برای ارزیابی خروجی مسئله‌ها با تعداد زیادی متغیر ورودی نوشته شده که با بهره‌گیری از روش‌های برنامه‌نویسی متداول امروزی کاری غیرممکن می‌باشد زیرا در نظر گرفتن تاثیر تمامی متغیرها بر روی یکدیگر و همچنین خروجی مورد نظر کاری غیرعملی می‌باشد. به علاوه ساختار روش‌های برنامه‌نویسی امروزی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که وجود کوچکترین اشتباه در اطلاعات ورودی، می‌تواند منجر به بروز اشتباه و خطا در تمامی محاسبات و حصول نتایجی کاملاً متناقض شود، اما در روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از آنجایی که آموزش کاملاً مبتنی بر تجربه است وجود اشتباه و خطا در داده‌های ورودی منجر به بروز خطا در خروجی مورد نظر نشده و برنامه به اندازه قابل توجهی قابلیت تحمل خطا را خواهد داشت. در مطالعه پیش رو از آنجا که داده‌های ورودی، اطلاعات ثبت شده توسط شتاب نگاشت‌های موجود بوده و احتمال خطا در ثبت این داده‌های ورودی وجود دارد و همچنین حجم داده‌های ورودی بالا می‌باشد الزام به بهره‌گیری از روش‌های هوشمند وجود دارد.

در این پژوهش از دو روش هوشمند الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی به منظور ارائه رابطه کاهندگی کلی برای داده‌های لرزه‌ای ثبت شده جهانی استفاده شده است که در ادامه هریک از روش‌های به کار گرفته شده به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۲- روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی (GEP)

الگوریتم توسعه ژنی یک الگوریتم ژنتیکی، مانند الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیکی است که به عنوان جمعیت از افراد بهره برده و انتخاب آن‌ها با توجه به برازندگی و معرفی تنوع ژنتیکی به واسطه استفاده از یک یا چند اپراتور ژنتیکی می‌باشد. تفاوت اساسی این سه الگوریتم در مشخصه‌های طبیعی آن‌ها است. در الگوریتم ژنتیک مشخصه‌ها بصورت رشته‌های نمادین با طول ثابت (کروموزوم) می‌باشند. در برنامه‌نویسی ژنتیکی مشخصه‌ها بصورت نهادی غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال مختلف (درخت تجزیه) هستند. در الگوریتم توسعه ژنی مشخصه‌ها به عنوان رشته‌های نمادین با طول ثابت (کروموزوم) هستند که به عنوان نهادهای غیرخطی با اندازه‌ها و اشکال مختلف (درخت توسعه) بیان شده‌اند.

۳-۲-۱- الگوریتم هوشمند توسعه ژنی در بیان کلی

الگوریتم توسعه ژنی توسعه‌ای طبیعی از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی ژنتیکی است که در سال ۱۹۹۹ بوسیله فریرا^۱ پیشنهاد شده است. الگوریتم توسعه ژنی از این جهت مشابه برنامه‌نویسی ژنتیکی عمل می‌کند که از نمودارهای مشابه آن استفاده می‌شود اما در نهادهای تولید شده با هم متفاوت بوده و نهادهای تولید شده در الگوریتم توسعه ژنی ژنوم می‌باشند. بنابراین به واسطه الگوریتم توسعه ژنی از دومین آستانه تکاملی هم گذر کرده و راه حل‌های جدید و کارآمد برای محاسبات تکاملی مطرح شده است. سپس الگوریتم توسعه

^۱Ferreira

ژنی به ابداع کروموزوم‌هایی می‌پردازد که قادر به نمایندگی از هر درخت توسعه می‌باشد و باعث ایجاد یک زبان جدید، به نام کاروا^۱ شده که برای خواندن و بیان اطلاعات کروموزوم‌های الگوریتم توسعه ژنی استفاده می‌شود.

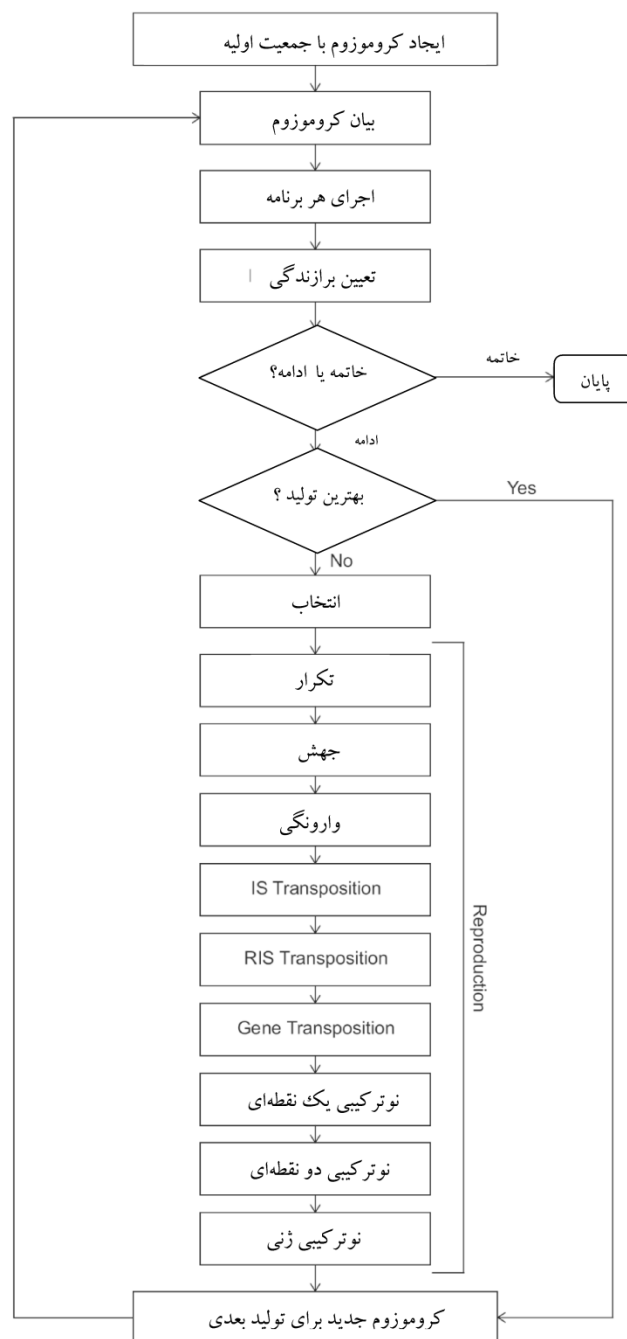
عناصر اصلی در الگوریتم توسعه ژنی تنها دو عنصر کروموزوم‌ها و و درختان توسعه هستند. ساختار کروموزوم‌ها به گونه‌ای سازماندهی شده‌اند که اجازه ایجاد ژن‌های متعدد، که هر کدام به عنوان زیر درخت توسعه معرفی شده‌اند، را می‌دهد. ساختار ژن‌ها نیز طوری طراحی شده‌اند که هر ژن دارای یک سر^۲ و یک دنباله^۳ است و این سازمان ساختاری و کارکردی از ژن در الگوریتم توسعه ژنی، همیشه تضمین‌کننده تولید برنامه‌های معتبر می‌باشد و اینکه چقدر یا چگونه عمق کروموزوم را تغییر دهند، مهم نمی‌باشد. درختان توسعه نیز عبارت از اطلاعات ژنتیکی کد شده در کروموزوم‌ها می‌باشد. همانطور که در طبیعت، فرآیند رمزگشایی اطلاعات ترجمه نامیده می‌شود و این ترجمه به وضوح نوع کد و مجموعه‌ای از قوانین را نشان می‌دهد. کد ژنتیکی نیز بسیار ساده بوده و رابطه یک به یک بین نمادهای کروموزوم و توابع و یا ترمینال‌ها را نشان می‌دهد. قوانین نیز بسیار ساده هستند، آن‌ها این سازمان متشکل از توابع و ترمینال‌ها در درختان توسعه و نوع تعامل میان زیر درخت توسعه‌ها را تعیین می‌کنند [۵۰].

^۱Karva

^۲Sub-expression tree

^۳Head

^۴Tail



شکل ۳-۱: فلوچارت الگوریتم توسعه ژنی [۵۰]

۳-۲-۱-۱-الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیکی، توسط هولند در دهه ۶۰ میلادی و براساس تئوری تکاملی داروین ارائه شد، که به انتشار

کتابی از او با عنوان انطباق در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی در سال ۱۹۷۵ منجر شد [۵۱]. مانند همه‌ی سیستم‌های تکاملی کامپیوتری، الگوریتم ژنتیک دارای بیش ساده‌سازی از تکامل بیولوژیکی است. مراحل الگوریتم ژنتیک بصورت زیر است:

(۱) شروع : ایجاد یک جمعیت تصادفی از تعداد n فرد.

(۲) ارزیابی تابع برازندگی $f(x)$ برای هر فرد x در جمعیت.

(۳) جمعیت جدید: ایجاد یک جمعیت جدید با تکرار گام‌های زیر تا زمانی که جمعیت جدید کامل شود:

(۳-۱) انتخاب : انتخاب دو فرد به عنوان والدین از جمعیت با توجه به برازندگی آن‌ها (امتیاز بیشتر به معنای شانس بیشتر برای انتخاب خواهد بود).

(۳-۲) ترکیب متقابل : با ترکیب متقابل عضو جدیدی ایجاد می‌شود، در صورتیکه ترکیب متقابل انجام نشود فرزند کپی دقیقی از والدین خواهد بود.

(۳-۳) جهش : با عامل جهش، فرزند جدید با احتمال در نظر گرفته شده برای جهش، در یک موقعیت معمولاً تصادفی، جهش پیدا خواهد کرد.

(۳-۴) پذیرش: قرار دادن فرزند جدید در میان جمعیت جدید.

(۴) جایگزینی: از جمعیت جدید ایجاد شده به عنوان جمعیت اولیه برای گام جدید الگوریتم استفاده می‌کند.

(۵) آزمایش: اگر شرایط پایان الگوریتم ارضا شده باشد، الگوریتم پایان می‌پذیرد و بهترین گزینه در آن جمعیت را به عنوان جواب بهینه معرفی می‌کند.

۶) حلقه : بازگشت به گام ۲ .

۳-۲-۱-۲- برنامه‌نویسی ژنتیکی

برنامه‌نویسی ژنتیکی بوسیله کرامر در سال ۱۹۸۵ ارائه شده و در سال ۱۹۹۲ بوسیله کوزا توسعه داده شده است [۵۲]. این روش با ایجاد نهادهای غیرخطی دارای اندازه‌ها و اشکال مختلف مسائل را حل می‌کند. الفبای مورد استفاده برای ایجاد این نهادها نیز برای تعیین سیستمی تطبیق پذیرتر، متنوع‌تر و غنی‌تر است. با این حال، افراد جمعیت ایجاد شده فاقد ژنوم ساده، مستقل و کارآمد هستند. همچنین این روش نیاز به جمعیت‌های بزرگ دارد و هرچه جمعیت بیشتر باشد، کارایی نیز بالاتر بوده و به همان نسبت به دست آوردن شایستگی، دارای هزینه بالاتری خواهد بود. به طور کلی از آنجا که روش‌های برنامه‌نویسی ژنتیکی ملزم به کار با درخت‌های تجزیه هستند بسیار کند می‌باشند.

۳-۲-۲- ژنوم

ژنوم یا کروموزوم در الگوریتم هوشمند توسعه ژنی شامل رشته‌ای نمادین و خطی، با طول ثابت متشکل از یک یا چند ژن می‌باشد. البته ملاحظه می‌شود با وجود طول ثابت، کد کروموزوم در الگوریتم توسعه ژنی برای درختان توسعه با اندازه‌ها و اشکال مختلف است.

۳-۲-۳- ژن‌های الگوریتم توسعه ژنی

ژن‌ها در الگوریتم توسعه ژنی از یک سر و یک دنباله تشکیل شده‌اند. سر دارای نمادهایی است که نشان دهنده توابع و ترمینال‌هاست ولی دنباله تنها حاوی ترمینال‌هاست. برای هر مساله، طول سر (h) انتخاب

شده، در حالی که طول دنباله (t) یک تابع از طول سر و تعداد آرگومان‌های تابع با آرگومان بیشتر (n) است و توسط معادله زیر محاسبه می‌شود:

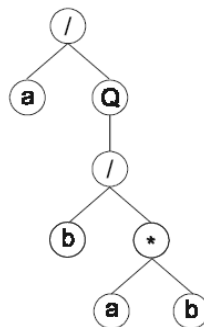
$$t = h(n-1) + 1 \quad (۱-۳)$$

چنانچه یک ژن با مجموعه توابع $F = \{Q, *, /, -, +\}$ و مجموعه ترمینال‌های $T = \{a, b\}$ در نظر گرفته شده و $n=2$ و $h=15$ فرض شود، $t=16$ بدست می‌آید. بدین ترتیب طول ژن (g) با $g=h+t=15+16=31$ برابر خواهد شد. ژنی با مشخصات مذکور در زیر نشان داده شده است (دنباله به صورت ضخیم‌تر نشان داده شده است):

0123456789012345678901234567890
/aQ/b*ab/Qa*b*-**ababaababbabbbba**

شکل ۳-۲: ژن با طول ژن ۳۱ و طول سر ۱۵ و طول دنباله ۱۶ [۵۰]

که درخت توسعه آن به شکل زیر است:



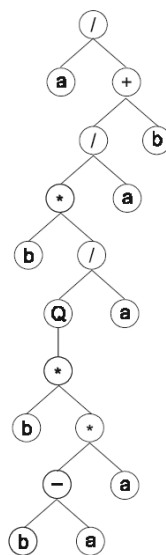
شکل ۳-۳: درخت توسعه ژن. [۵۰]Error! Reference source not found.

در اینجا، همان گونه که ملاحظه می شود^۱ ORF در موقعیت ۷ به پایان می رسد، در حالیکه ژن در موقعیت ۳۰ به پایان می رسد. حال فرض می شود یک جهش در موقعیت ۲ رخ داده است و "Q" به "+" تبدیل شده است. ژن به دست آمده به شرح زیر است:

0123456789012345678901234567890
/a+/b*ab/Qa*b*-**ababaababbabbba**

شکل ۳-۴: ژن جهش یافته ژن. Error! Reference source not found. در موقعیت ۲ [۵۰]

و درخت توسعه آن به صورت زیر خواهد بود:

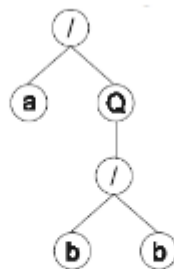


شکل ۳-۵: درخت توسعه ژن جهش یافته. Error! Reference source not found. [۵۰]

همانطور که مشاهده می شود در این ژن، ORF با یک تغییر موقعیت به سمت راست در موقعیت ۱۷ به پایان می رسد، در حالیکه ژن در همان موقعیت ۳۰ به پایان می رسد. همچنین این تغییر موقعیت ممکن

^۱Open Reading Frames (ORFs)

است به سمت چپ نیز باشد. به عنوان نمونه، در ژن زیر که یک جهش نسبت به ژن اولیه در موقعیت ۵ داشته و در آن "*" به "b" تبدیل شده است، ملاحظه می‌شود که ORF با یک تغییر موقعیت به سمت چپ در موقعیت ۵ به پایان می‌رسد.



0123456789012345678901234567890
/aQ/bbab/Qa*b*-ababaababbabbbba

شکل ۳-۶: ژن و درخت توسعه ژن جهش یافته ژن. Error! Reference source not found. در م

وقعیت ۵ [۵۰]

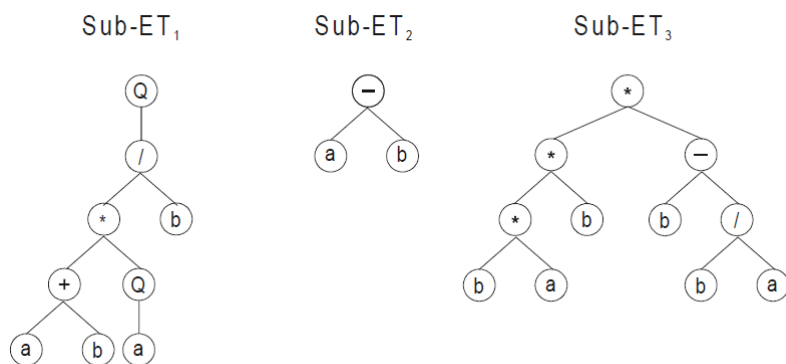
بنابراین با وجود طول ثابت، هر ژن پتانسیل ایجاد درخت‌های توسعه با اندازه و شکل‌های مختلف، از ساده‌ترین آن‌ها که یک گره می‌تواند باشد و تنها از یک ترمینال تشکیل شده، تا بزرگترین آن‌ها را دارد. تنها چیزی که باید مورد توجه قرار گیرد، جلوگیری از برهم خوردن سازمان ساختاری ژن‌هاست که همیشه مرزهای میان سر و دنباله حفظ شود و به نمادهای تابعی اجازه ورود به دنباله داده نشود.

۳-۲-۴- کروموزوم‌های چند ژنی

کروموزوم‌های الگوریتم توسعه ژنی معمولاً از بیش از یک ژن با طول برابر تشکیل شده‌اند. هر کدام از ژن‌های مربوط به یک زیر درخت توسعه، با برقراری ارتباط میان یکدیگر یک درخت توسعه چند واحدی پیچیده را

تشکیل می‌دهند. به عنوان نمونه کروموزوم زیر با طول ۴۵ از سه ژن تشکیل یافته است که هر سه ORF ژن‌های آن از موقعیت صفر شروع می‌شوند، اما نقطه پایان هر یک از آن‌ها تنها به ساختار درخت توسعه هر یک از آن‌ها بستگی دارد.

012345678901234012345678901234012345678901234
Q/*b+Q**ababaabaa**-abQ/*+b**ababbab****-*b**b**/b**abaaaab**



شکل ۳-۷: کروموزوم با سه ژن و زیر درخت توسعه [۵۰]

بدین ترتیب کروموزوم‌های الگوریتم توسعه‌ی ژنی شامل چند ORF است و هر ORF از نظر ساختار و عملکرد بصورت منحصر بفرد برنامه‌نویسی شده است. بسته به نوع مساله ممکن است این درخت‌های توسعه به طور جداگانه با توجه به برازندگی‌شان انتخاب شوند.

۳-۲-۵- تعاملات پس از ترجمه^۱ و توابع ارتباطی^۲

در الگوریتم توسعه ژنی، از ساده‌ترین تا پیچیده‌ترین عبارات از اطلاعات ژنتیکی با ترجمه شروع می‌شود، یعنی انتقال اطلاعات از یک ژن به یک درخت توسعه. قبلاً نتایج ترجمه در شکل‌گیری زیر درخت‌های توسعه با اندازه‌ها و اشکال مختلف دیده شد، اما در اکثر موارد، بیان کاملی از اطلاعات ژنتیکی نیاز به تعامل این زیر درختان توسعه با یکدیگر دارد. یکی از ساده‌ترین تعاملات، ارتباط میان زیر درختان توسعه توسط یک تابع خاص است.

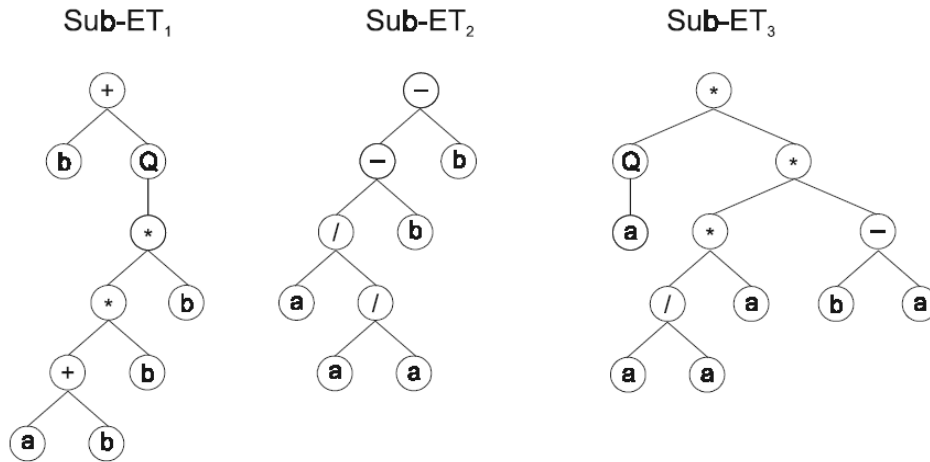
هنگامیکه زیر درختان توسعه شامل عبارات جبری یا عبارات بولی^۳ هستند، هر تابع جبری یا بولی با بیش از یک آرگومان می‌تواند برای ارتباط میان این زیر درختان مورد استفاده قرار گیرد. توابعی که بیشتر برای ارتباط مورد استفاده قرار می‌گیرند، جمع و ضرب برای زیر درختان توسعه جبری، و OR یا IF برای زیر درختان توسعه بولی می‌باشند. شکل زیر ارتباط میان سه زیر درخت توسعه بوسیله جمع را نشان می‌دهد.

012345678901234012345678901234012345678901234
+bQ**b+b**bababbbb**--b/ba/**aaababab***Q*a*/**abaaaaab**

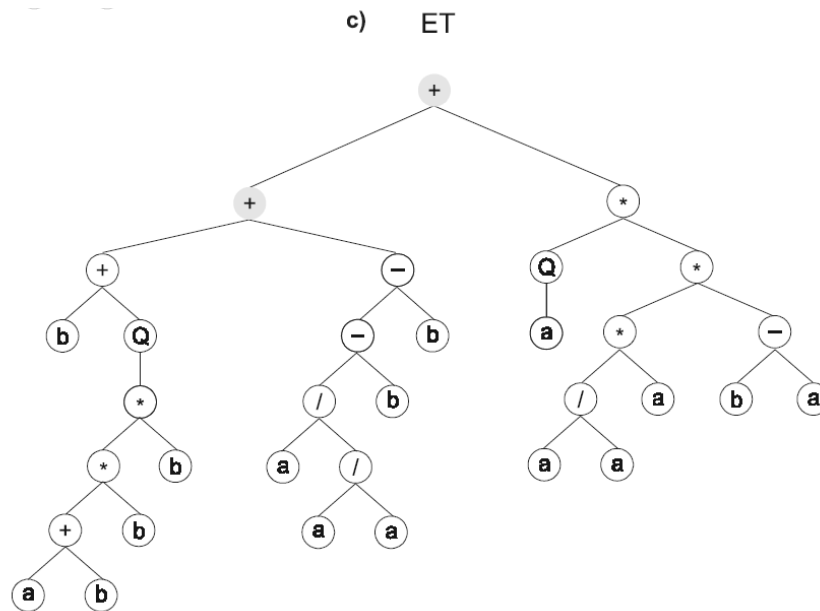
^۱Posttranslational interactions

^۲Linking functions

^۳Boolean expressions



شکل ۳-۸: کروموزوم جبری با سه ژن و زیر درخت توسعه [۵۰]



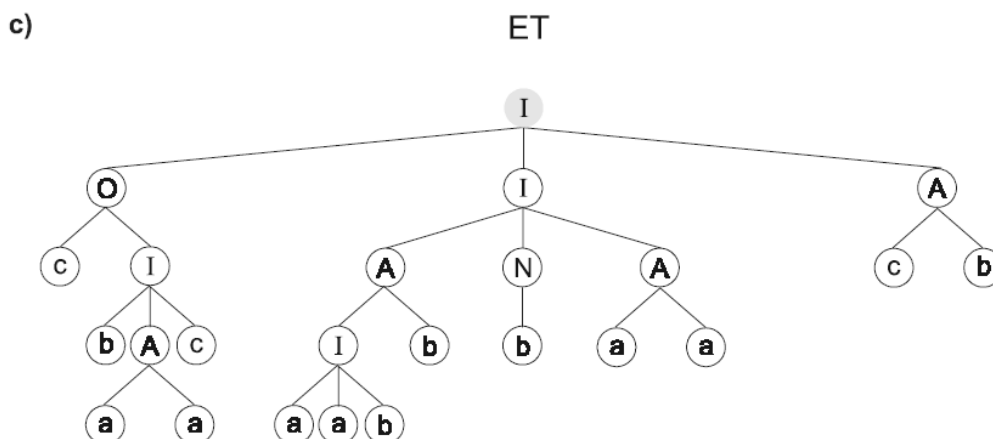
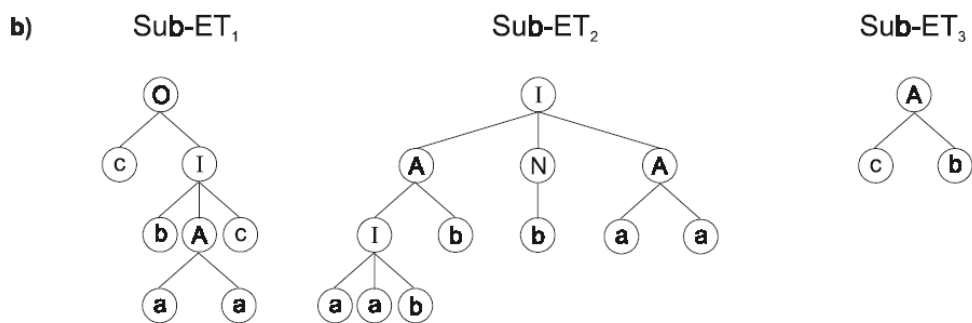
شکل ۳-۹: کروموزوم جبری با سه ژن و زیر درخت توسعه با تابع ارتباطی جبری [۵۰]

با این حال، برای ارائه راه حل کامل‌تر برای مشکلات پیچیده، استفاده از کروموزوم‌های چند ژنی موثرتر است. یعنی کروموزوم‌ها مجاز به ساخت قسمت‌های کوچک از قسمت پیچیده هستند که دارای ساختار سلسله مراتبی می‌باشند و در آن هر ژن کد، مربوط به یک بلوک ساختمان کوچک است [۵۱]. این بلوک‌های

ساختمانی کوچک از یکدیگر جدا شده، و در نتیجه به طور مستقل می‌توانند تکامل یابند. علاوه بر این، این سیستم‌های چند ژنی بسیار کارآمدتر از سیستم‌های تک ژنی هستند. در واقع، الگوریتم توسعه ژنی یک سیستم سلسله مراتبی موثر است که قادر به کشف بلوک‌های ساده و استفاده از آن‌ها در شکل‌دهی ساختارهای پیچیده‌تر می‌باشد.

شکل زیر تعامل میان سه زیر درخت توسعه بولی، بوسیله تابع $IF(x, y, z)$ را نشان می‌دهد، این تابع اگر $x=1$ ، آنگاه Y و در غیر این صورت Z را بازگشت می‌دهد.

a) 012345678901234501234567890123450123456789012345
OcIbAcaabcbccaaaIANAIbbaaaaabaaabAcbcIcaaaacaccaa



شکل ۳-۱۰: کروموزوم بولی با سه ژن و زیر درخت توسعه با تابع ارتباطی بولی [۵۰]

که در آن O, A, N, I به ترتیب توابع بولی NOT، AND، OR و IF می‌باشند که از میان آن‌ها N فقط یک آرگومان و بقیه سه آرگومان می‌گیرند.

بنابراین برای هر مساله نوع تابع ارتباط، تعداد ژن‌ها و طول هر ژن را می‌توان با یک پیش‌فرض تعیین کرد. اما همیشه می‌توان با استفاده از یک کروموزوم تک ژنی، شروع و سپس با افزایش طول سر ادامه داد و اگر آن ژن بسیار بزرگ شد، می‌توان تعداد ژن‌ها را در کروموزوم افزایش داد. همچنین بدیهی است که یک تابع نیز باید به عنوان ارتباط ژن‌ها انتخاب شود.

۳-۲-۶- عملگرهای ژنتیکی

عملگرهای ژنتیکی هسته اصلی تمامی الگوریتم‌های ژنتیکی بوده و انتخاب و تکرار وجه مشترک تمام سیستم‌های تکاملی می‌باشند. اگرچه این عملگرها بعنوان هسته اصلی می‌باشند اما به خودی خود از نظر تکاملی کاری انجام نمی‌دهند و فقط می‌توانند باعث رانش ژنتیکی و ایجاد جمعیت و تنوع کمتر شده تا همه افراد دقیقاً یکسان شوند.

معیار سنجش همه سیستم‌های تکاملی اصلاح، یا به طور خاص تر، عملگرهای ژنتیکی است که منجر به تنوع می‌شوند. به این صورت که الگوریتم‌های مختلف تغییرات متفاوتی ایجاد می‌کنند.

در الگوریتم ژنتیک معمولاً از عملگرهای جهش و نو ترکیبی، برنامه‌نویسی ژنتیکی به شکل انحصاری از نو ترکیبی خاص برنامه‌نویسی ژنتیکی و الگوریتم توسعه ژنی از جهش، جابجایی و نو ترکیبی استفاده می‌شود.

۳-۲-۶-۱- انتخاب و تکرار^۱

همه سیستم‌های مصنوعی با توجه به برازندگی‌شان از یک طرح برای انتخاب افراد استفاده می‌کنند. برخی از طرح‌ها کاملاً قطعی است، درحالی‌که بقیه غیرقابل پیش‌بینی‌اند. برای الگوریتم توسعه ژنی یک طرح غیر قابل پیش‌بینی استفاده شده است.

برای نمونه با توجه به اینکه در شکل ۳-۲ برای درک بهتر، تنها از عملگر انتخاب و تکرار برای تولید نسل استفاده شده است، مشاهده می‌شود که کروموزوم ۳ از نسل صفر که دارای بهترین برازندگی ست، در نسل بعد نیز وجود داشته و به کروموزوم ۴ از نسل ۱ تبدیل شده است. دومین برازندگی از نسل صفر کروموزوم ۱ است که در نسل بعد دو بار در کروموزوم‌های ۱ و ۹ تکرار شده است. کروموزوم صفر، که دارای برازندگی

^۱Selection and replication

متوسط بود، بدون باقی گذاردن فرزندان از بین رفت و کروموزوم ۶ که دارای برزندگی خوبی نبود، بدون هیچ تولیدی از بین رفت. اما کروموزوم ۹ با وجود برزندگی کم دوبار در نسل بعدی تولید شده و کروموزوم-های ۵ و ۶ از نسل ۱ را پدید آورده‌اند.

نتیجه این فرایند تکاملی در نسل ۸، جایی که همه افراد از نسل یک نفر هستند (کروموزوم ۱ از نسل صفر)، کاملاً قابل مشاهده می‌باشد که نشانگر این واقعیت می‌باشد که تکرار و انتخاب تنها و تنها قادر به ایجاد رانش ژنتیکی است.

```

Generation N: 0
01234567890120123456789012
*+-/a*aaaaaaa//+*aaaaaaa- [0] = 10.64033
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [1] = 16.2117
*a+-----//aaaaaaa- [2] = 13.81953
+a*/-aaaaaaa**+*aaaaaaa- [3] = 18.32701
*+a/-aaaaaaa/aa+a/aaaaaaa- [4] = 11.13926
+*/a/aaaaaaa---aa-aaaaaaa- [5] = 13.88255
*-*-aaaaaaa/-a//aaaaaaa- [6] = 7.777691
/++a-*aaaaaaa/+a*+-aaaaaaa- [7] = 13.14786
//+*aaaaaaa*+/-aaaaaaa- [8] = 7.713599
-**-/aaaaaaa*//aa/aaaaaaa- [9] = 8.73985

```

```

Generation N: 1
01234567890120123456789012
*a+-----//aaaaaaa- [0] = 13.81953
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [1] = 16.2117
*+a/-aaaaaaa/aa+a/aaaaaaa- [2] = 11.13926
+*/a/aaaaaaa---aa-aaaaaaa- [3] = 13.88255
+a*/-aaaaaaa**+*aaaaaaa- [4] = 18.32701
-**-/aaaaaaa*//aa/aaaaaaa- [5] = 8.73985
-**-/aaaaaaa*//aa/aaaaaaa- [6] = 8.73985
//+*aaaaaaa*+/-aaaaaaa- [7] = 7.713599
/++a-*aaaaaaa/+a*+-aaaaaaa- [8] = 13.14786
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [9] = 16.2117

```

```

Generation N: 8
01234567890120123456789012
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [0] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [1] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [2] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [3] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [4] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [5] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [6] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [7] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [8] = 16.2117
/-/a//aaaaaaa+*a/+aaaaaaa- [9] = 16.2117

```

شکل ۳-۱۱: نسل‌های ۰ و ۱ و ۸ با انتخاب و تکرار

۳-۲-۶-۲-جهش^۱

جهش در هر جایی از کروموزوم می‌تواند رخ دهد. با این حال، سازمان‌های ساختاری کلی کروموزوم‌ها باید دست نخورده باقی بماند. در قسمت سر هر نماد را می‌توان به تابع و یا ترمینال دیگری تغییر داد، اما در دنباله، ترمینال فقط می‌تواند به ترمینال تغییر یابد. بنابراین سازمان‌های ساختاری کروموزوم حفظ شده است و همه افراد جدید تولید شده توسط جهش، دارای برنامه درست ساختاری هستند.

```

012345678900123456789001234567890
Q+bb*bbaba-**-abbbaaQ*a*Qbbbaab

```

```

012345678900123456789001234567890
Q+bb/bbbabaQ**-abbbaaQ*+*Qbbbaab

```

شکل ۳-۱۲: جهش در یک کروموزوم [۵۰]

همانطور که در کروموزوم ۳ ژنی شکل ۳-۳ و جهش‌یافته آن مشاهده می‌شود نمادهایی که در ژن اولیه بصورت پررنگ نشان داده شده‌اند در ژن ثانویه جهش یافته‌اند. برای نمونه نماد "*" در موقعیت ۴ از ژن ۱ به نماد "/" در ژن ۲ جهش یافته است. چنانچه یک تابع به یک ترمینال و یا یک تابع با یک آرگومان به

^۱Mutation

تابع با دو آرگومان جهش یابد و یا بالعکس، درخت توسعه به شدت تغییر خواهد کرد. به طور کلی، در الگوریتم توسعه ژنی هیچ محدودیتی در نوع جهش و یا حتی در تعداد جهش در یک کروموزوم وجود ندارد.

۳-۲-۲-۳- جابجایی و قرار دادن عناصر به دنبال هم^۱

المان‌های قابل جابجایی الگوریتم توسعه ژنی قطعاتی از ژنوم هستند که می‌توانند به محل دیگری در کروموزوم پرش کنند. بایستی توجه شود که کروموزوم‌هایی که تازه ایجاد می‌شوند از نظر نحوی صحیح باشند تا سازمان ساختاری کروموزوم حفظ شود. در الگوریتم توسعه ژنی سه نوع از عناصر قابل جابجا شدن وجود دارد:

۱) قطعات کوتاه با حداقل یک تابع و یا ترمینال در موقعیت ابتدایی که می‌تواند به قسمت سر ژن‌ها بجز ریشه جابجا شود.^۲

```
0123456789012345601234567890123456
-aba+Q-baabaabaabQ*+*+ - /aababbaaaa
```

```
0123456789012345601234567890123456
-aba+Q-baabaabaabQ*+a+Q*+ababbaaaa
```

شکل ۳-۱۳: جابه‌جایی نوع ۱ در یک کروموزوم [۵۰]

۲) قطعات کوتاه با حداقل یک تابع و یا ترمینال در موقعیت ابتدایی که می‌تواند به قسمت ریشه ژن‌ها جابجا شود.^۳

^۱Transposition and insertion sequence elements

^۲IS elements

^۳RIS elements

0123456789012345601234567890123456
*-bQ/++/babbabbba//Q*baa+bbbabbbbbb

0123456789012345601234567890123456
Q/+*-bQ/babbabbba//Q*baa+bbbabbbbbb

شکل ۳-۱۴: جابه‌جایی نوع ۲ در یک کروموزوم [۵۰]

۳) کل ژن که می‌تواند به ابتدای کروموزوم‌ها جا به جا شود.

012345678901201234567890120123456789012
/+Qa*bbaaaba*a*/Qbbbbabb/Q-aabbaaabb

012345678901201234567890120123456789012
/Q-aabbaaabb/+Qa*bbaaaba*a*/Qbbbbabb

شکل ۳-۱۵: جابه‌جایی نوع ۳ در یک کروموزوم [۵۰]

۳-۲-۲-۴-نوترکیبی

در الگوریتم توسعه ژنی سه نوع نوترکیبی از جمله نوترکیبی یک نقطه‌ای، نوترکیبی دونقطه‌ای و نوترکیبی ژنی وجود دارد. در تمام انواع نوترکیبی، دو کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب شده و با تبادل مواد بین هم به ایجاد دو کروموزوم جدید می‌پردازند. معمولاً کروموزوم‌های جدید با یکدیگر و والدین خود متفاوت هستند.

نوترکیبی یک نقطه‌ای: در نوترکیبی یک نقطه‌ای کروموزوم‌ها با هم جفت شده و در نقطه‌ای یکسان شکافته می‌شوند و پس از آن مواد پایین دست نقطه نوترکیبی بین دو کروموزوم تعویض می‌گردند. در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از نوترکیبی یک نقطه‌ای مشاهده می‌شود که دو کروموزوم در بین دو موقعیت ۵ و ۶ شکافته شده و دو کروموزوم جدید حاصل گردیده است.

0123456789012345601234567890123456
 +*-b-Qa*aabbbbbaaa-Q-//b/*aabbabbab
 ++//b//b-bbbbbbbbbb*-ab/b+bbbaabbbaa

0123456789012345601234567890123456
 +*-b-Q/-bbbbbbbbb*-ab/b+bbbaabbbaa
 ++//b/a*aabbbbbaaa-Q-//b/*aabbabbab

شکل ۳-۱۶: نو ترکیبی یک نقطه‌ای در یک کروموزوم [۵۰]

نو ترکیبی دو نقطه‌ای: در نو ترکیبی دو نقطه‌ای کروموزوم‌ها با هم جفت شده و در دو نقطه که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، قطع می‌شوند. سپس مواد بین دو نقطه نو ترکیبی با هم جابجا می‌شوند و تشکیل دو کروموزوم جدید می‌دهند.

0123456789012345601234567890123456
 *-+Q/Q*QaaabbbbabQQab*++-aabbabaab
 Q/-b-+/abaabbbbaab/*-aQa*babbabbabb

0123456789012345601234567890123456
 -+Q/+abaabbbbaab/-aQa*-aabbabaab
 Q/-b-Q*QaaabbbbabQQab*++babbabbabb

شکل ۳-۱۷: نو ترکیبی دو نقطه‌ای در یک کروموزوم [۵۰]

نو ترکیبی ژنی: در نو ترکیبی ژنی کل ژن بین کروموزوم‌های پدر و مادر رد و بدل شده، تشکیل دو کروموزوم جدید حاوی ژن‌هایی از هر دو والدین را می‌دهند. ژن‌های رد و بدل شده به طور تصادفی انتخاب می‌شوند و همان موقعیت را در کروموزوم‌های جدید خواهند داشت که در کروموزوم‌های والدین داشتند.

012345678901201234567890120123456789012
 /+/ab-aabbbbbb-aa**+aaabaaa-+-babbbaaab
 +baQaaaabaaba*-+a-aabbabbb/ab/+bbbabaaa

012345678901201234567890120123456789012
+/ab-aabbbb*--+a-aabbabb--babbbaab
+baQaaaabaaba-aa**+aaabaaa/ab/+bbbabaaa

شکل ۳-۱۸: نو ترکیبی ژنی در یک کروموزوم [۵۰]

۳-۳- روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی (GMDH)

الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی به فرد اجازه می‌دهد تا سیستم‌های پیچیده را بدون داشتن دانش خاص از سیستم یا حجم عظیم داده مدلسازی کند. این الگوریتم برای شناسایی رفتار سیستم‌های غیرخطی استفاده می‌شود. بین همه روش‌های هوشمند محاسباتی، روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی به عنوان یک سیستم خود سازماندهی شده و با ظرفیت حل مسائل غیرخطی بسیار پیچیده شناخته می‌شود [۵۳، ۵۴].

۳-۳-۱- الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی در بیان کلی

این الگوریتم اولین بار توسط ایواننکو^۱ در سال ۱۹۷۱ میلادی ارائه شده است [۵۵] و شامل تعدادی متغیر ورودی و یک خروجی می‌باشد که با نگهداری متغیرهای ورودی در یک شبکه انعطاف‌پذیر، بین متغیرهای ورودی و خروجی ارتباط برقرار کرده و امکان برآورد اولیه از خروجی به واسطه معادلات رگرسیونی شامل زیرمجموعه‌های کوچک از متغیرهای ورودی فراهم می‌شود. هر یک از این زیر مجموعه‌های کوچک شامل ۲-۳ متغیر مستقل هستند [۵۶، ۵۷]. هدف اصلی این روش ساخت یک شبکه بر پایه یک تابع درجه دو انتقالی می‌باشد. تعداد لایه‌ها و نورون‌های پنهان، متغیرهای ورودی موثر و مدل بهینه سازه به طور اتوماتیک

^۱Ivakhnenko

در این الگوریتم تعیین می‌شوند [۵۸].

چنانچه یک مدل یک ارگانیسم پیچیده بیولوژیکی تصویر شود که تقریباً به همان روشی ساخته شده که تکامل سازنده‌ی خود ارگانیسم است، می‌توان ثابت کرد با شروع چند فرم اولیه یا معادله اولیه نسل جدیدی از فرزندان پیچیده‌تر ساخته شده که می‌توان با کمک اصل بقای مناسب‌ترین گزینه به بررسی حیات و یا ممات معادلات جدید پرداخت. حال چنانچه معادلات جدید حاصله با هم ترکیب شوند نسل جدیدی از معادلات پیچیده‌تر به دست خواهند آمد. با ادامه این روند بسیاری از نسل‌ها، فرزندی از مدل‌های ریاضی رشد خواهد یافت که رفتاری با شباهت بالاتر به سیستم واقعی دارد که در نتیجه‌ی آن یک مدل با پیچیدگی مطلوب به دست خواهد آمد.

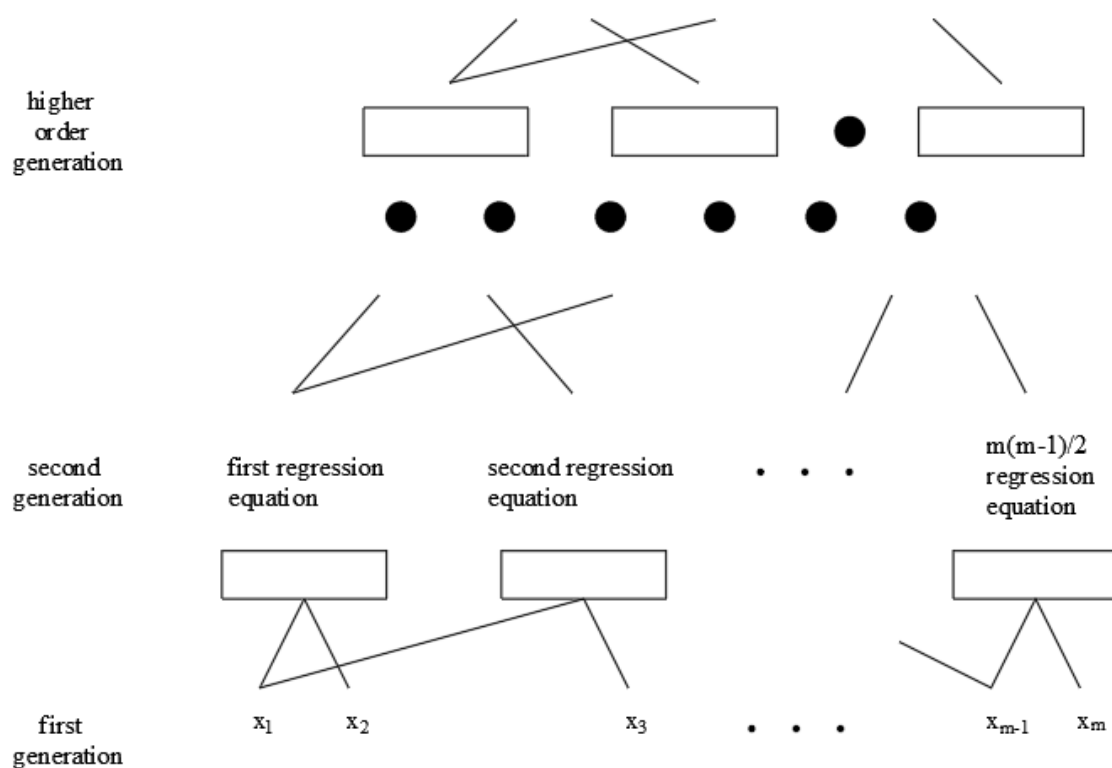
در واقع این مدل یک مدل کاملاً عینی است که تعصبات محققان در آن نقشی نداشته و فقط و فقط به داده‌ها نگاه می‌کند و نه چیز دیگری.

با مفروض در نظر گرفتن متغیرهای x_1, x_2 و ... به عنوان متغیرهای ورودی و ترکیب آن‌ها با هم می‌توان نسل بعدی را به دست آورد. در این مرحله با محاسبه معادلات رگرسیون این هدف دنبال می‌شود.

$$G(x_i, x_j) = a_0 + a_1x_i + a_2x_j + a_3x_i^2 + a_4x_j^2 + a_5x_ix_j \quad (2-3)$$

در حالت کلی هدف الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی یافتن ضرایب ثابت و نامعلوم a_i می‌باشند که به واسطه روش‌های رگرسیونی، بر پایه حصول حداقل مربعات خطا برای هر جفت از متغیرهای ورودی x_i و x_j به دست خواهند آمد [۵۹، ۶۰].

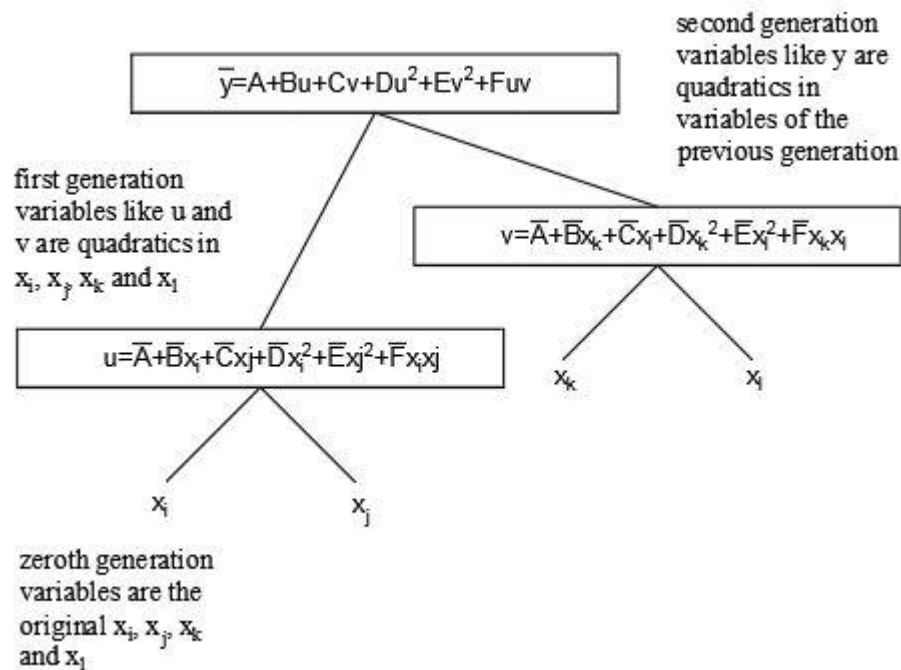
در واقع با استفاده از این معادله، $\frac{m(m-1)}{2}$ متغیر مرتبه بالاتر به جای ورودی‌های x_1, x_2 و ... برای پیش-بینی خروجی حاصل می‌شود. پس از یافتن این معادلات رگرسیونی در مورد اینکه کدام یک از این معادلات ذخیره و کدام یک حذف شوند تصمیم‌گیری شده و در نتیجه مجموعه‌ای از مدل‌های رگرسیونی درجه دوم حاصل می‌شود که به بهترین وجه خروجی را پیش‌بینی می‌کنند. قابل ذکر است که هر پیش‌بینی به دو متغیر مستقل بستگی دارد.



شکل ۳-۱۹: محاسبه متغیرهای با درجه بالاتر از نمونه ساده آنها [۵۶]

در مرحله بعد از هر یک از معادلات درجه دوم که محاسبه شده‌اند استفاده و مشاهدات مستقل جدید ایجاد شده که جایگزین مشاهدات اصلی خواهند شد. از ترکیب این معادلات مستقل جدید، معادلات رگرسیونی

درجه دوم حاصل می‌شوند که یک مجموعه جدید از معادلات رگرسیونی با درجه $\frac{m_1(m_1-1)}{2}$ برای محاسبه خروجی (y) به دست خواهد داد. اساساً آنچه به دست خواهد آمد مجموعه‌ای از چند جمله‌ای‌های درجه چهار و چهار متغیره است، که تصویر کلی طریقه کار این الگوریتم را مجسم می‌سازد. در این مرحله بهترین تخمین انتخاب شده و متغیرهای مستقل جدیدی از معادلات برگزیده برای جایگزینی قدیمی ایجاد می‌شوند و سپس همه جفت‌های این متغیرهای جدید با هم ترکیب می‌شوند. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که معادلات رگرسیونی از قدرت پیش‌بینی ضعیف‌تری نسبت به معادلات قبلی برخوردار شوند. پس از توقف بهترین‌ها در چند نسل چندجمله‌ای انتخاب می‌شوند.



شکل ۳-۲۰: برنامه پایه توزیع متغیرها [۵۶]

در نهایت y به صورت تخمینی از یک درجه دوم دو متغیره که خود درجه دوم دو متغیره دیگری است، که خود نیز درجه دوم دو متغیره دیگری است، ... و خود درجه دوم متغیرهای اصلی است، حاصل خواهد شد.

در واقع در صورتی که تعویض‌های جبری لازم انجام شوند یک چند جمله‌ای بسیار پیچیده به فرم زیر حاصل خواهد شد:

$$y = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (3-3)$$

که به چندجمله‌ای ایواننکو معروف است [۵۵].

۳-۳-۲-طریقه عملکرد الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی

کار این الگوریتم با جمع‌آوری داده‌های رگرسیونی آغاز می‌شود که این مشاهدات مطابق شکل ۳-۱۲ به دو دسته شامل داده‌های آموزشی و داده‌های آزمایشی تقسیم می‌شوند.

Y		X			
		x_1	x_2	x_m	
training observations	y_1	x_{11}	x_{12}	$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$	x_{1m}
	y_2	x_{21}	x_{22}		x_{2m}
	$\cdot$	$\cdot$			
	$\cdot$	$\cdot$			
	$\cdot$	$\cdot$			
	y_{nt}	$x_{nt,1}$	$x_{nt,2}$		$x_{nt,m}$
checking observations	$\cdot$	$\cdot$			
	$\cdot$	$\cdot$			
	y_n	x_{n1}	x_{n2}		x_{nm}

شکل ۳-۲۱: ورودی به الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی [۵۶]

مرحله اول (ساخت متغیرهای جدید $(z_1, z_2, \dots, z_{\frac{m(m-1)}{2}})$): این مرحله بسیار ساده بوده، به این شکل که تمام

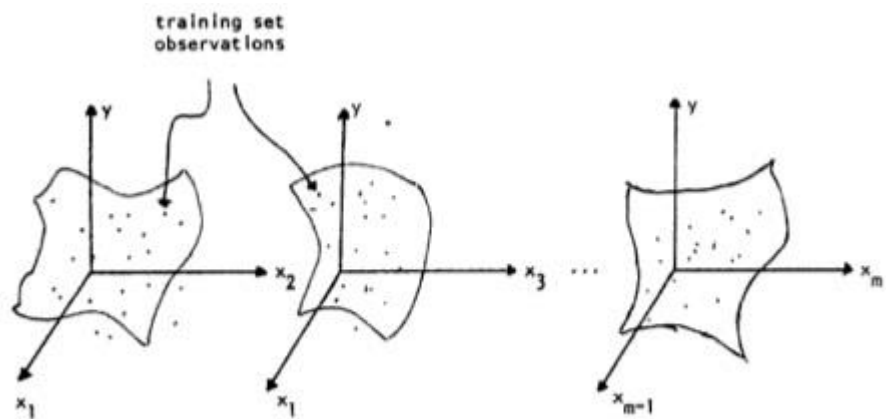
متغیرهای مستقل (ستون‌های X) دریافت شده و چندجمله‌ای رگرسیون ساخته می‌شود.

$$y = A + Bu + Cv + Du^2 + Ev^2 + Fuv \quad (۴-۳)$$

در واقع هر یک از $\frac{m_1(m_1-1)}{2}$ چندجمله‌ای‌های رگرسیونی از مشاهدات $\{(y_i, x_{ip}, x_{iq}) : i = 1, \dots, nt\}$ به

ازای $p, q = 1, \dots, m$ محاسبه می‌شوند که این $\frac{m_1(m_1-1)}{2}$ سطوح رگرسیونی در شکل ۳-۱۳ نشان داده

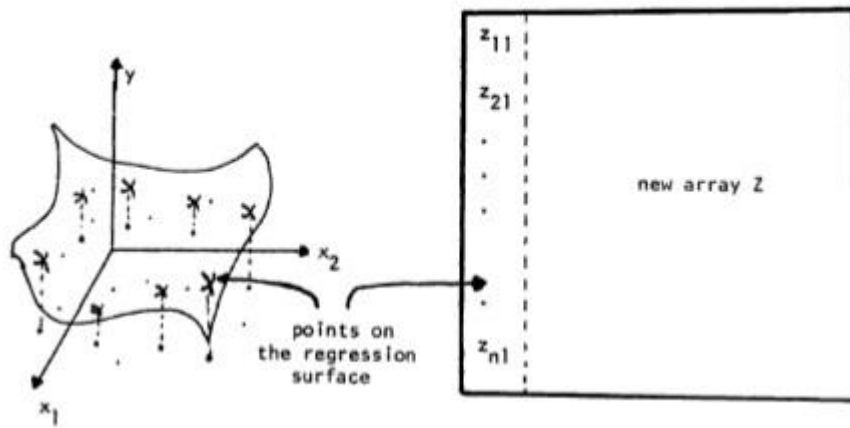
شده‌اند.



شکل ۳-۲۲: ساختمان متغیرهای جدید [۵۶]

هر یک از سطوح رگرسیونی چندجمله‌ای در همه n داده نقطه‌ای ارزیابی می‌شود. برای مثال در اولین سطح نشان داده شده n داده نقطه‌ای $(x_{11}, x_{12}), (x_{21}, x_{22}), \dots, (x_{n1}, x_{n2})$ ارزیابی شده و این n مشاهده در ستون اول آرایه جدید Z مطابق شکل ۳-۱۴ ذخیره می‌شوند.

$$y = A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_1^2 + Ex_2^2 + Fx_1x_2 \quad (۵-۳)$$



شکل ۳-۲۳: ساختار آرایه جدید Z [۵۶]

سپس تمامی ستون‌های آرایه جدید Z بدین ترتیب محاسبه می‌شوند. می‌توان این متغیرهای جدید را به عنوان متغیرهای بهبودیافته جدید تفسیر کرد که قدرت پیش‌بینی بهتری نسبت به نسل اصلی $x_1, x_2, \dots, x_m$ دارند. در اینجا هدف این است که فقط بهترین متغیرهای جدید حفظ شوند و این همان جایی است که مشاهدات در مجموعه مورد بررسی وارد عمل می‌شوند.

مرحله دوم (غربالگری کمترین پارامترهای موثر): در این مرحله ستون‌های X (متغیرهای قدیمی) با ستون‌های Z (متغیرهای جدید) جایگزین شده و متغیر وابسته Y در مجموعه بررسی به بهترین وجه تخمین زده می‌شوند. سپس برای هر ستون Zام از میانگین مربع ریشه (r_j) محاسبه می‌شود.

$$r_j^2 = \frac{\sum_{i=nt+1}^n (y_i - z_{ij})^2}{\sum_{i=nt+1}^n y_i^2} \quad j = 1, 2, \dots, \frac{m(m-1)}{2} \quad (۳-۶)$$

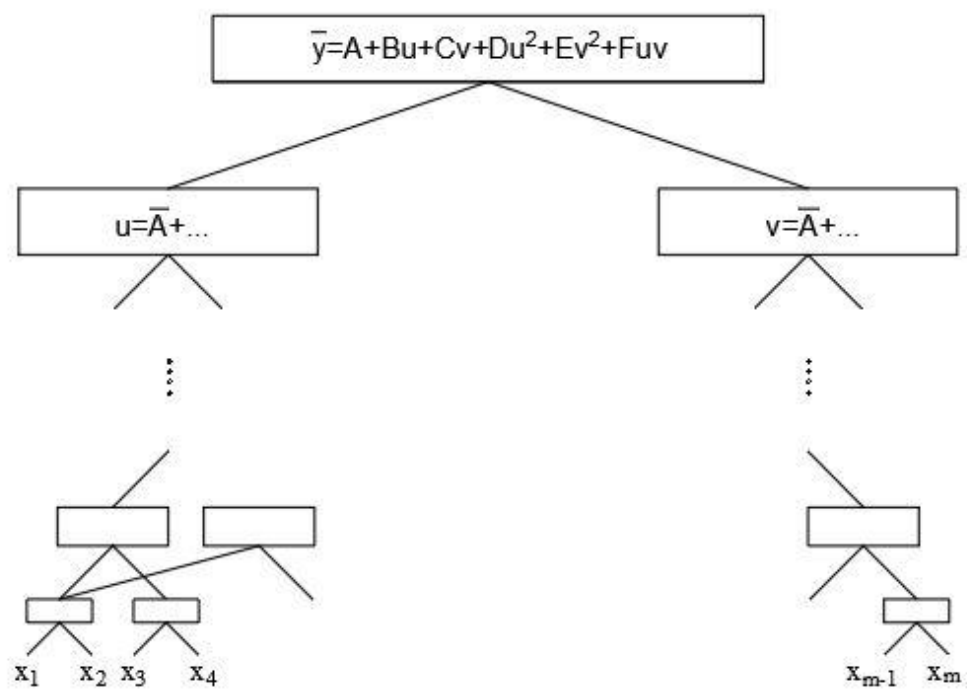
پس از آن ستون‌های Z بر حسب r_j به صورت افزایشی مرتب شده و ستون‌هایی که رابطه $r_j < R$ را اقلان می‌کنند جایگزین ستون‌های اصلی X می‌شوند. نکته قابل ملاحظه در اینجا این است که تعداد متغیرهای جدید ذخیره شده (m_1) ممکن است از تعداد متغیرهای اولیه و اصلی (m) کمتر یا بیشتر باشد.

مرحله سوم (آزمون بهینه سازی): در این مرحله به جستجوی کوچکترین مقدار r_j حاصل از مرحله دوم پرداخته شده و به عنوان R_{min} نامگذاری می‌شود. مقدار R_{min} حاصل از هر نسل بر روی نمودار رسم شده و چنانچه مقدار R_{min} حاصل از یک نسل کمتر از مقدار حاصل از نسل قبل باشد دوباره به مرحله اول بازگشته و به صورت مجدد به تکرار مراحل پرداخته می‌شود. اما چنانچه مقدار از مقدار به دست آمده در نسل قبل بزرگتر باشد فرض می‌شود که به مقدار کمینه خود رسیده و فرایند متوقف شده و از نتایج حاصل از نسل قبل استفاده می‌شود.

ستون اول آرایه z که شامل مقادیر $\bar{y}_i$ چندجمله‌ای ایواننکو می‌باشد به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned}\bar{y}_1 &= a + \sum_{i=1}^m b_i x_{1i} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{1i} x_{1j} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_{1i} x_{1j} x_{1k} + \dots \\ \bar{y}_2 &= a + \sum_{i=1}^m b_i x_{2i} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{2i} x_{2j} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_{2i} x_{2j} x_{2k} + \dots \\ &\vdots \\ \bar{y}_n &= a + \sum_{i=1}^m b_i x_{ni} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ni} x_{nj} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_{ni} x_{nj} x_{nk} + \dots\end{aligned}\tag{۷-۳}$$

برای یافتن ضرایب a, b_i, c_{ij} و d_{ijk} در چندجمله‌ای ایواننکو باید تمام سطوح رگرسیونی درجه دوم را ذخیره کرد، که در هر تکرار محاسبه می‌شوند. سپس مطابق شکل ۳-۱۵ به طور سیستماتیک این درخت از درجه دوم، تا زمانی که به یک چندجمله‌ای مرتبه بالا در متغیرهای اصلی $x_1, x_2, \dots, x_m$ برسد، ارزیابی می‌شود.



شکل ۳-۲۴: درخت چندجمله‌ای [۵۶]

فصل ۴: ارائه مدل های کابیندگی جدید

۴-۱- مقدمه

برای ارائه یک رابطه کاهندگی در گام اول نیاز به تهیه کاتالوگی متشکل از زلزله‌های به وقوع پیوسته، به تعداد کافی و بادقت بالا می‌باشد، که هر چه میزان دقت داده‌های در دسترس بیشتر باشد به طبع دقت رابطه کاهندگی حاصله نیز بالاتر خواهد بود. در مطالعه حاضر با توجه به جهانی بودن رابطه نهایی ارائه شده، از رکوردهای ثبت شده در سراسر زمین استفاده شده است که به صورت کاملاً اتفاقی و با پراکندگی مناسب انتخاب گردیدند. این رکوردها از سایت پییر^۱ بهره‌گیری از امکان فیلتر اطلاعات مورد نظر رکوردها مانند شماره رکورد زلزله، نام زلزله، نام ایستگاه ثبت‌کننده زلزله، تاریخ وقوع زلزله، حدود بزرگای زلزله، حدود فاصله از گسل، حدود شعاع گسیختگی، سرعت موج برشی و ... که به تناسب نیاز می‌توان از یک یا چند مورد از آن‌ها استفاده کرد، برداشت شده‌اند. در این مطالعه از میان تمام فیلترهای موجود تنها از فیلترهای حدود بزرگای و فاصله از گسل استفاده شده و به دنبال آن ۱۲۱۸ رکورد دریافت شده است که شامل زلزله‌های به وقوع پیوسته از سال ۱۹۳۸ به بعد می‌باشند. در این مطالعه پارامترهای بزرگای، فاصله و سرعت موج برشی به عنوان متغیر و بیشینه شتاب افقی به عنوان تابع هدف برای دو الگوریتم مورد نظر (الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی) تعریف و در آن وارد شده و مورد پردازش قرار گرفته‌اند. در نهایت به بیان نتایج حاصل و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته شده است.

۴-۲- عوامل موثر بر جنبش نیرومند زمین

همانطور که در بخش مروری بر تاریخچه نیز اشاره شد در ابتدای ظهور روابط کاهندگی تنها تاثیر پارامترهایی چون بزرگای و فاصله بر جنبش زمین در نظر گرفته می‌شد ولی به مرور زمان پارامترهای بیشتری

^۱PEER: Public Employees for Environmental Responsibility (<https://ngawest2.berkeley.edu/>)

همچون نوع خاک و نوع گسلش در این روابط ورود پیدا کردند. در این پژوهش تاثیر پارامترهای بزرگا، فاصله و سرعت موج برشی بر بیشینه شتاب افقی زمین که به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده، به واسطه استفاده از رابطه کاهندگی، مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه، هر یک از این پارامترها به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرند.

لازم به ذکر است که تاثیر پارامتر نوع گسلش به سبب عدم کفایت رکوردهای متعلق به تمام انواع گسلش به لحاظ تعداد نادیده گرفته شده است.

۴-۲-۱- بزرگا زلزله (M)

بزرگا زلزله نشاندهنده میزان انرژی آزاد شده توسط آن می باشد و با آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین بیشترین تاثیر را در مقادیر جنبش نیرومند زمین خواهد داشت و می توان آن را مهمترین و تاثیرگذارترین پارامتر در تعیین روابط کاهندگی دانست. مشخص است، هر چه زلزله با بزرگای بالاتری اتفاق بیفتد، پارامترهای جنبش نیرومند زمین در یک فاصله مشخص از منبع زلزله، مقادیر بیشتری خواهند داشت، که نشان می دهد بزرگا تاثیر مستقیم بر مقدار بیشینه شتاب افقی زمین دارد.

بزرگا با مقیاس های مختلفی بیان می شود که ناشی از تنوع امواج لرزه ای ثبت شده و موسسات و دستگاه های ثبت کننده این زلزله ها می باشد. انواع بزرگا عبارتند از: بزرگای محلی (M_L)، بزرگای موج سطحی (M_s)، بزرگای موج حجمی (m_b) و بزرگای گشتاوری (M_w). بزرگای محلی (M_L) بر پایه دامنه ثبت شده توسط لرزه نگار وود اندرسون، بزرگای موج سطحی (M_s) بر پایه دامنه امواج رایی و بزرگای موج حجمی (m_b) بر پایه دامنه امواج P، که همگی از خصوصیات حرکات زمین هستند، اندازه گیری می شوند. طبق پدیده اشباع شدگی، گرچه انرژی آزاد شده حین زلزله افزایش می یابد، اما لزوماً خصوصیات لرزه ای با همان سرعت افزایش

نمی‌یابند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این سه مقیاس قادر به انعکاس صحیح اندازه زلزله‌های بزرگ نمی‌باشند [۲]. به همین خاطر در این پژوهش از بزرگای گشتاوری (M_w) که از خصوصیات حرکت زمین مستقل است و می‌تواند اندازه زلزله‌های بزرگ را به درستی بیان کند، استفاده شده است. به علاوه از آنجا که زلزله‌های با بزرگای کمتر از ۴ خطری برای سازه‌های مهندسی ساخت محسوب نمی‌شود، بنابراین برای تهیه کاتالوگ زلزله در این پژوهش از زلزله‌های با بزرگای گشتاوری (M_w) ۴ تا ۷/۵ استفاده شده است.

۴-۲-۲- فاصله (R)

فاصله در واقع نشان‌دهنده مسیری است که امواج لرزه‌ای از منبع زمین‌لرزه تا سایت موردنظر طی می‌کنند و دومین پارامتر موثر در روابط کاهندگی به شمار می‌آید. مشخص است که هر چه فاصله سایت تا کانون زمین‌لرزه بیشتر باشد، پارامترهای جنبش نیرومند زمین مقادیر کمتری خواهند داشت، که نشان می‌دهد فاصله تاثیر معکوس بر مقدار بیشینه شتاب افقی زمین دارد.

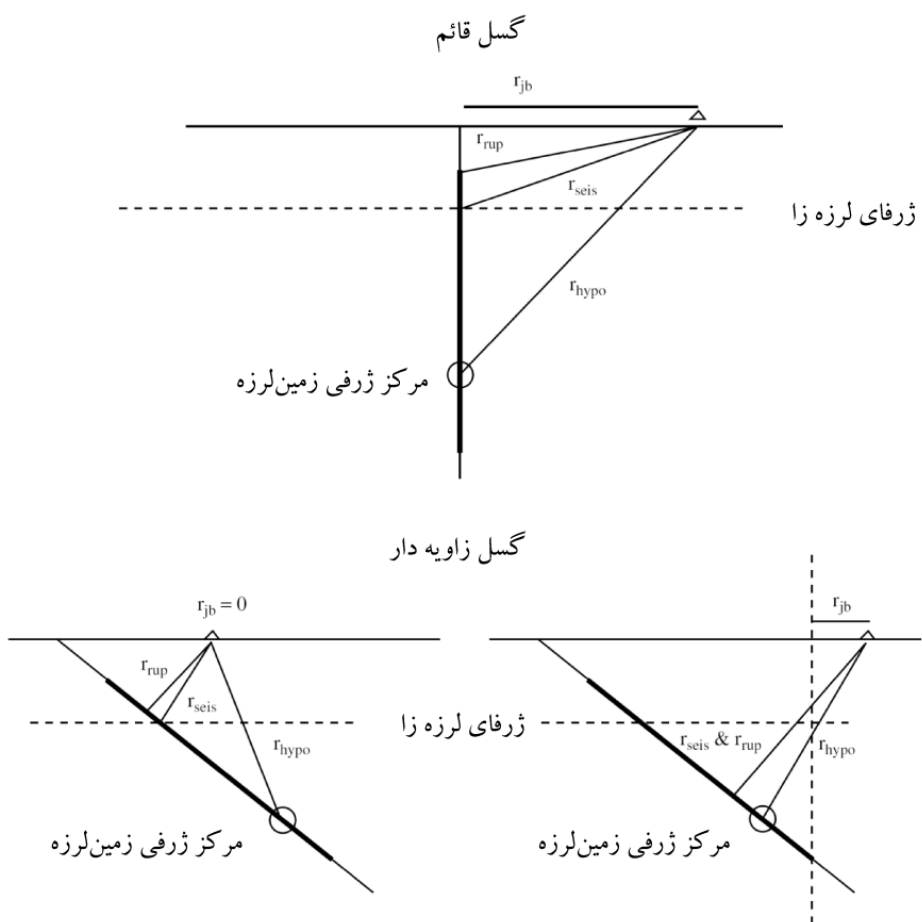
انواع فواصل که در لرزه‌شناسی تعریف می‌شوند عبارتند از [۶۱]:

Γ_{jb} : نزدیکترین فاصله افقی به تصویرقائم گسیختگی

Γ_{rup} : نزدیکترین فاصله به سطح گسیختگی

Γ_{seis} : نزدیکترین فاصله به سطح گسیختگی لرزه‌زا

Γ_{hypo} : فاصله از کانون زمین‌لرزه



شکل ۴-۱: انواع فواصل تعریف شده [۶۱]

در این مطالعه با نظر به اینکه مسیر طی شده توسط امواج از منبع زلزله تا سایت موردنظر موثرترین پارامتر بر جنبش زمین است از فاصله کانونی (r_{hypo}) با محدوده ۱۵ تا ۱۵۰ کیلومتر استفاده شده است.

۴-۲-۳- سرعت موج برشی (V_s)

گرچه قسمت عمده‌ای از مسیر پیموده شده توسط امواج در بستر سنگی می‌باشد ولی غالباً این امواج در بخش پایانی مسیر خود لایه‌ای از خاک را طی می‌کنند که می‌تواند نقش عمده و قابل ملاحظه‌ای در تغییر

فرکانس ارتعاشات به زمین رسیده داشته باشد و سبب استهلاک بعضی از فرکانس‌ها و به دنبال آن تشدید فرکانس‌های دیگر شده و میزان لرزش زمین را تغییر دهد، که لزوم در نظر گرفتن نوع زمین و شرایط تکتونیکی در ارائه روابط کاهندگی را بیان می‌کند [۲]. خصوصیات بستر می‌تواند به دوشکل کمی و کیفی در محاسبات وارد شود. در صورتی که تاثیر این پارامتر به صورت کیفی در نظر گرفته شود، بر اساس بازه‌بندی‌هایی که به واسطه موج برشی صورت می‌گیرد نوع زمین به چند دسته تقسیم‌بندی شده و به صورت ضرایبی با مقادیر ثابت در محاسبات وارد می‌شود. حال اگر تاثیر آن به صورت کمی مد نظر باشد از پارامتر سرعت موج برشی استفاده خواهد شد. در پژوهش حاضر برای بالا بردن دقت محاسبات و با توجه به در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز، تاثیر پارامتر نوع زمین به صورت کمی و با استفاده از سرعت موج برشی بر رابطه کاهندگی اعمال شده است.

۴-۳- پارامتر جنبش نیرومند زمین

همانطور که پیش از این نیز بیان شد، معمولاً از روابط کاهندگی که با استفاده از تحلیل رگرسیون داده‌های جنبش نیرومند زمین توسعه داده شده است، به طور عمده برای برآورد حداکثر شتاب زمین استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز بیشینه شتاب افقی زمین به عنوان پارامتر جنبش نیرومند زمین و تابع هدف در نظر گرفته شده است.

قابل ذکر است که هر رکورد برداشت شده سه مولفه‌ای بوده و شامل دو مولفه افقی و یک مولفه قائم می‌باشد. واضح است که در مطالعات مربوط به مولفه قائم با توجه به تک مقداره بودن آن مشکلی وجود ندارد ولی در مطالعات مربوط به مولفه افقی با توجه به متفاوت بودن مقادیر در دو جهت متعامد ابهامی در خصوص نحوه

انتخاب مقدار آن به وجود خواهد آمد. حالت‌های مختلفی برای تعیین مولفه موثر افقی تا به امروز ارائه و استفاده شده‌اند که به شرح زیر می‌باشد:

- مولفه افقی بزرگتر
- انتخاب تصادفی یکی از دو مولفه افقی
- میانگین عددی دو مولفه رکورد افقی
- میانگین هندسی دو مولفه افقی
- جذر مجموع مربعات دو مولفه افقی

که در این پژوهش از آخرین حالت که بحرانی‌ترین حالت ممکن می‌باشد، استفاده شده است. در واقع تابع هدف به واسطه دو مولفه افقی متعامد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$PGA = \sqrt{(PGA_1^2 + PGA_2^2)} \quad (1-4)$$

۴-۴-تهیه کاتالوگ نهایی

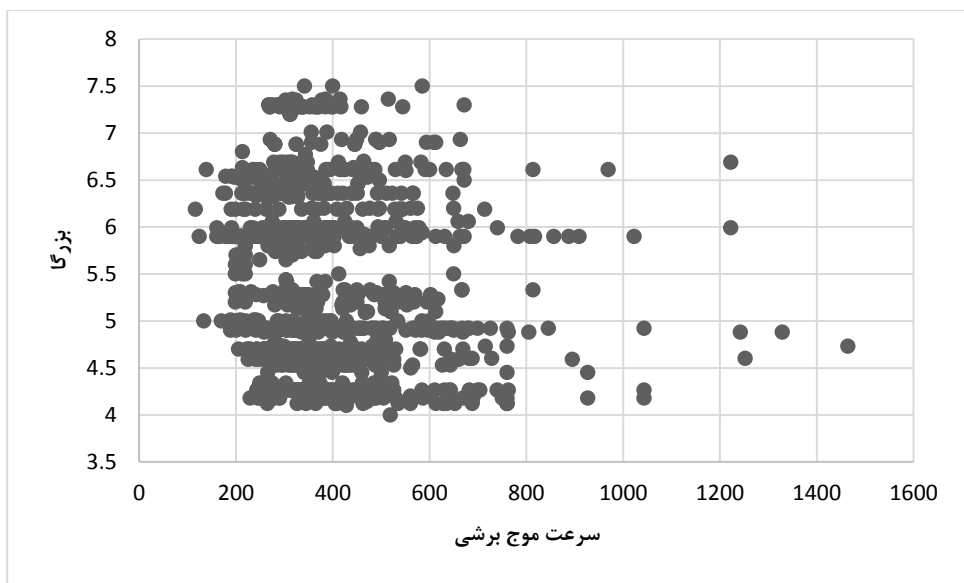
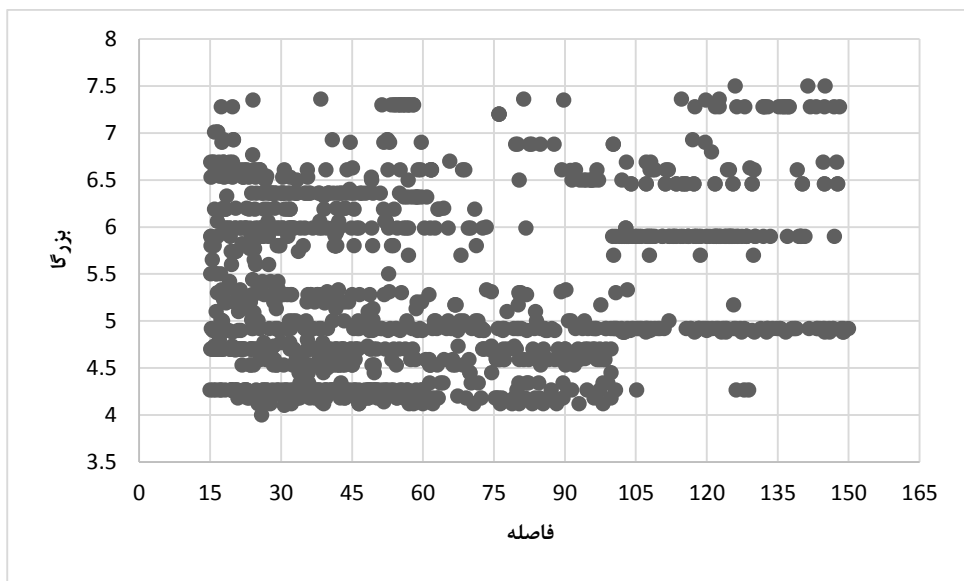
بعد از جمع‌آوری داده‌ها و تهیه کاتالوگ اولیه متشکل از پارامترهای بزرگا، فاصله و سرعت موج برشی مربوط به هر یک از ۱۲۱۸ رکورد زلزله، تمام رکوردها با استفاده از نرم‌افزار سائزموسیگنال^۱ و با در نظر گرفتن محدوده فرکانس تصحیح مناسب ۰/۲-۳۰ مورد پردازش قرار گرفته [۶۲] و سپس هر یک از دو مولفه بیشینه شتاب زلزله‌های ثبت شده در هر ایستگاه برداشت شده است. در نهایت پس از محاسبه مقدار جذر

^۱ Seismosignal

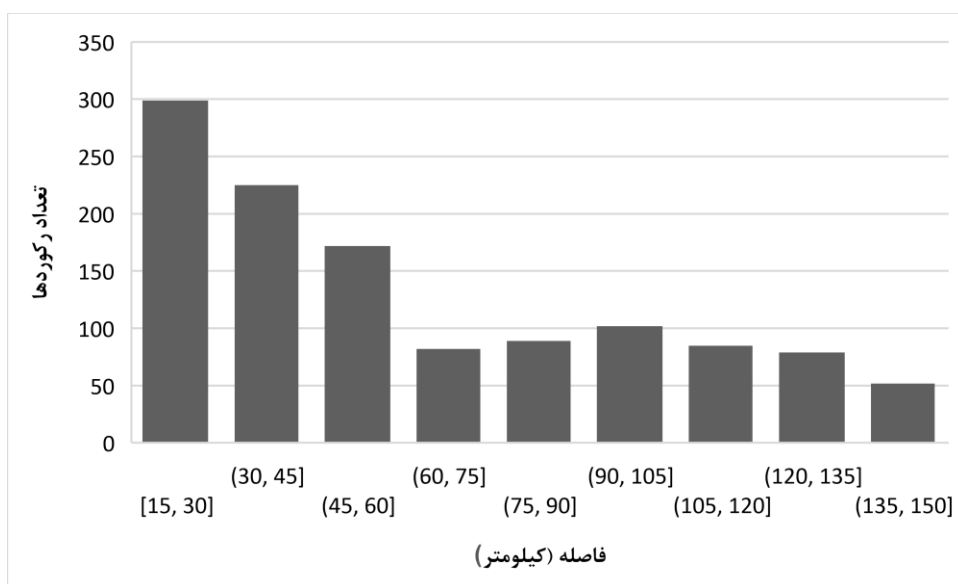
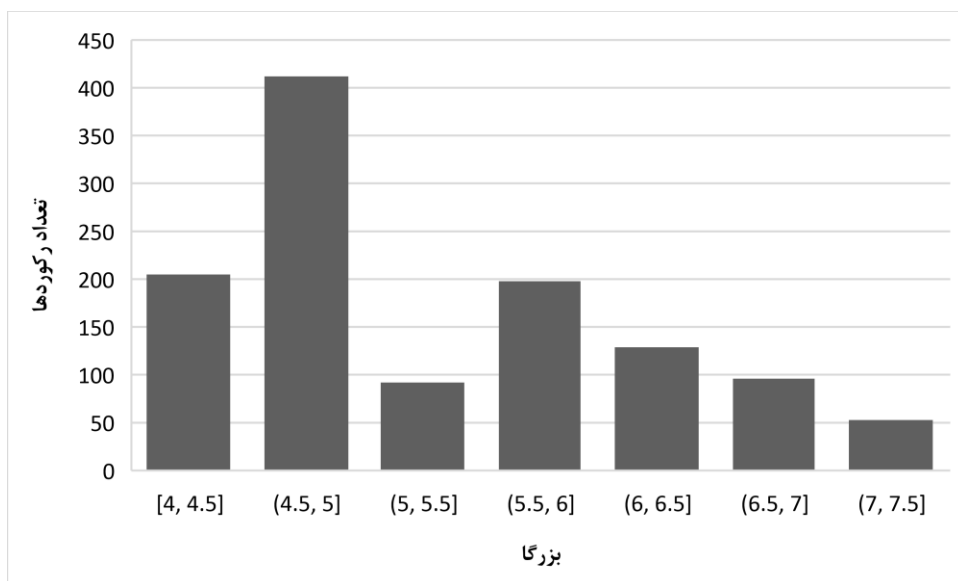
مجموع مربعات هر زوج مولفه مقدار بیشینه شتاب افقی که در اینجا تابع هدف می‌باشد به دست خواهد آمد.

پس از این مرحله نیز با توجه به امکان خطا در ثبت و برداشت رکوردها، به اصلاح رکوردهای موجود از طریق مرتب‌سازی بزرگا به صورت افزایشی و سپس رسم نمودار بزرگا بر حسب بیشینه شتاب افقی پرداخته می‌شود. به این صورت که نقاطی از نمودار، که پراکندگی نسبتاً زیادی نسبت به کل نمودار دارند و در واقع نشاندهنده بیشینه شتاب افقی غیر صحیح می‌باشند، از کاتالوگ زلزله حذف می‌شوند.

بعد از این مرحله ۱۱۸۵ رکورد به عنوان رکوردهای نهایی باقی مانده‌اند که در رابطه کاهندگی به دست آمده دخیل می‌باشند و نمودارهای پراکندگی بزرگا بر حسب فاصله و سرعت موج برشی و تعداد رکوردها بر حسب بزرگا و فاصله به ترتیب در شکل‌های ۴-۲ و ۴-۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۲-۴: نمودار پراکندگی بزرگا بر حسب فاصله و سرعت موج برشی



شکل ۳-۴: نمودار تعداد رکوردها بر حسب بزرگا و فاصله

۴-۵- پیشنهاد روابط کاهندگی

همانطور که پیش از این نیز اشاره شد در این مطالعه متغیرهای بزرگای گشتاوری، فاصله کانونی و سرعت موج برشی به عنوان ورودی‌های رابطه مورد نظر و بیشینه شتاب افقی زمین به عنوان تابع هدف برگزیده شده و در ادامه به تحقیق مناسب‌ترین رابطه کاهندگی به هر یک از روش‌های موردنظر می‌پردازیم.

۴-۵-۱- رابطه کاهندگی حاصل از روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی

(GEP)

روش کار این الگوریتم بدین شکل است که ۸۰٪ رکوردها، رکورد آموزشی و ۲۰٪ باقی رکوردها رکورد آزمایشی در نظر گرفته می‌شوند که نحوه انتخاب این رکوردها به صورتی ست که رکوردهای آزمایشی در محدوده رکوردهای آموزشی قرار داشته باشند و امکان مقایسه را فراهم کنند. عملگرهای تعریف شده و تنظیمات لحاظ شده در این الگوریتم نیز به صورت جدول ۴-۱ و ۴-۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۴-۱: عملگرهای تعریف شده در الگوریتم توسعه زنی

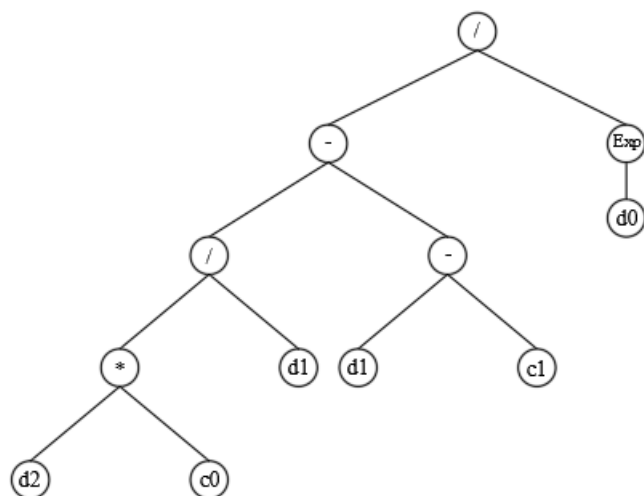
Name	Representation	Weight
Addition	+	4
Subtraction	-	4
Multiplication	*	4
division	/	1
Square root	Sqrt	1
Exponential	Exp	1
Natural logarithm	Ln	1
x to the power of 2	X2	1
x to the power of 3	X3	1
Cube root	3Rt	1

جدول ۴-۲: تنظیمات لحاظ شده در الگوریتم توسعه ژنی

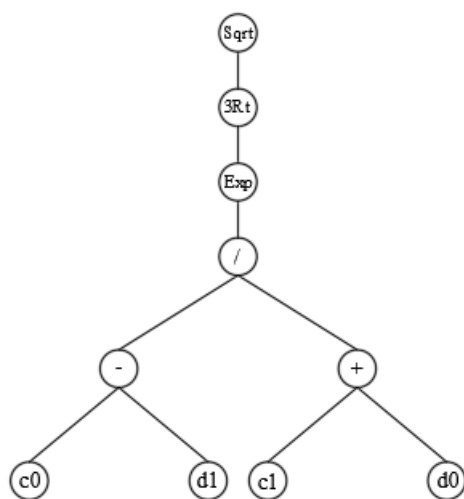
80%	رکوردهای آموزشی	
20%	رکوردهای آزمایشی	
M _w ،R ،V _s	متغیرها	
30	تعداد کروموزوم	تنظیمات کلی
7	اندازه هد	
3	تعداد ژن	
Addition(+)	تابع اتصال (لینک)	
RMSE	تابع برازندگی	
0.044	جهش	اپراتورهای ژنی
0.1	وارونگی	
0.1	IS Transposition	
0.1	RIS Transposition	
0.3	نو ترکیبی یک نقطه ای	
0.3	نو ترکیبی دو نقطه ای	
0.1	نو ترکیبی ژنی	
0.1	Gene Transposition	
6	ثابت های عددی	

در نهایت پس از سعی و خطا و به دست آوردن چندین پاسخ با پیش فرض های متفاوت برای الگوریتم، بهترین پاسخ که دارای بالاترین دقت و کمترین خطاست به عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفته شده است که به صورت درختان توسعه شکل ۴-۴ ارائه شده‌اند. تابع اتصال درختان توسعه عملگر جمع بوده و متغیرهای آن به صورت زیر می‌باشد.

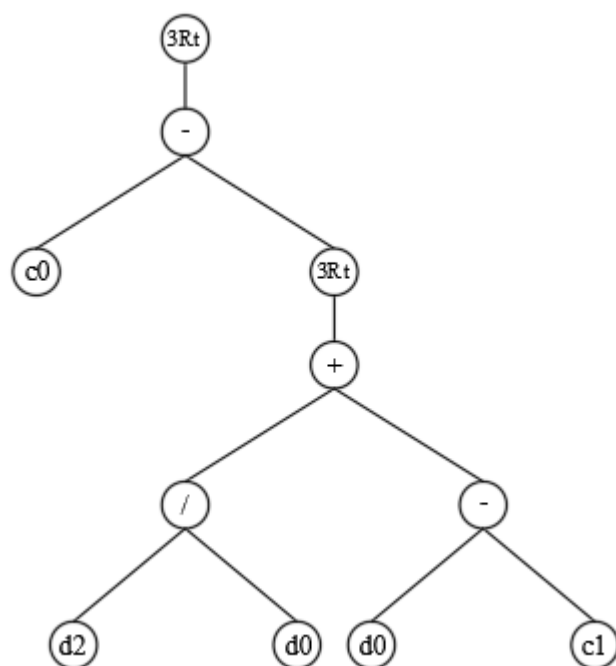
$$d_0 = M \quad d_1 = R \quad d_2 = V$$



$$c_0 = -1.553 \ ; \ c_1 = -9.095$$



$$c_0 = 5.61 \ ; \ c_1 = -1.37$$



$$c_0 = 9.999 ; c_1 = -8.967$$

شکل ۴-۴: درختان توسعه رابطه کاهندگی بیشینه شتاب افقی زمین

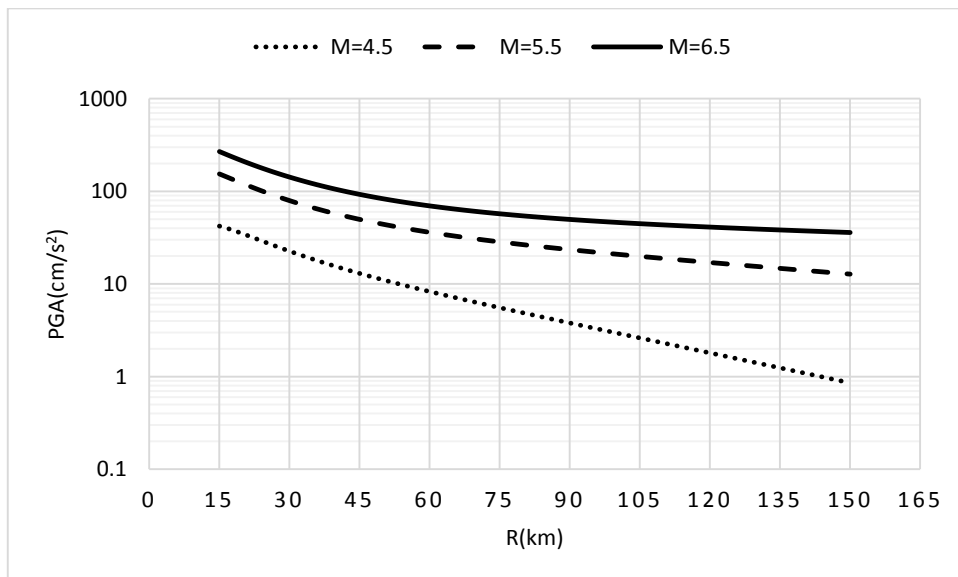
با نوشتن معادله هر یک از درختان توسعه و اتصال آنها با استفاده از عملگر جمع، رابطه کاهندگی جهانی بیشینه شتاب افقی زمین به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\log(PGA) = \frac{(-1.553V - R^2 - 9.095R)}{R * \text{Exp}(M)} + \sqrt[6]{\text{Exp}\left(\frac{5.61 - R}{-1.37 + M}\right)} + \sqrt[3]{9.999 - \sqrt[3]{\frac{V}{M}} + M + 8.967} \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه M بزرگا گشتاوری، R فاصله کانونی بر حسب کیلومتر (km)، V سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه (m/s) و PGA بیشینه شتاب افقی بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه (cm/s^2) می‌باشد.

در ادامه برای درک بهتر نتایج حاصله، به رسم نمودارهای بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا و فاصله کانونی پرداخته می‌شود.

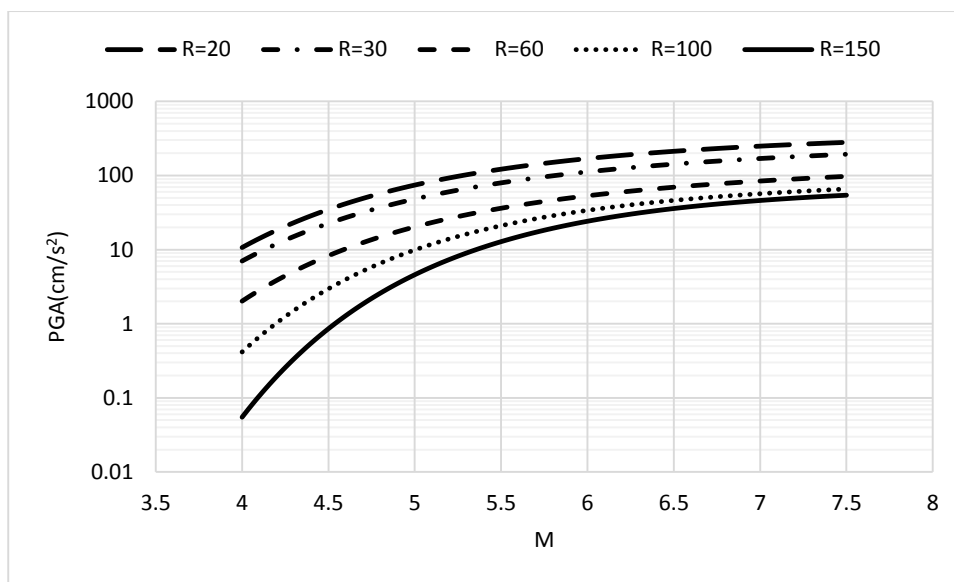
شکل ۴-۵ منحنی تغییرات بیشینه شتاب افقی بر حسب فاصله کانونی (۱۵ تا ۱۵۰ کیلومتری) به ازای سه بزرگای ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ را نشان می‌دهد. در این نمودار سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با دور شدن از کانون زلزله، بیشینه شتاب افقی به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۵: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

شکل ۴-۶ نیز منحنی تغییرات بیشینه شتاب افقی بر حسب بزرگا (۴/۵ تا ۷) به ازای فواصل کانونی ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتری را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه در

نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش بزرگا، بیشینه شتاب افقی به صورت غیر خطی افزایش می یابد.



شکل ۴-۶: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فواصل کانونی ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

۴-۵-۲- رابطه کاهندگی حاصل از روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی (GMDH)

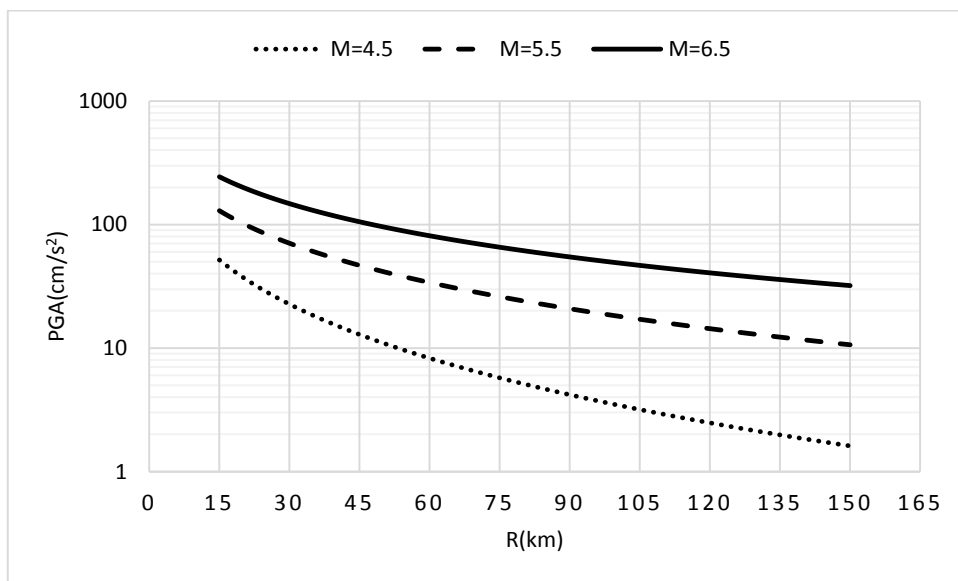
در این الگوریتم ۸۰٪ رکوردها، رکورد آموزشی و ۲۰٪ باقی رکودها رکورد آزمایشی در نظر گرفته می شوند.

رابطه کاهندگی نهایی حاصل از روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} \log(PGA) = & -1788.07 + (3192.56\sqrt[3]{M}) + (-7.7484\sqrt[3]{R}) + (-1664.47\sqrt[3]{M^2}) \\ & + (-6.97 \times 10^{-5} * V\sqrt[3]{V}) + (5.715\sqrt[3]{M}\sqrt[3]{R}) + (170.807M\sqrt[3]{M}) \\ & + (-10.447M^2) + (3.096 \times 10^{-6} * RV) + (-0.505M\sqrt[3]{R}) \end{aligned} \quad (۳-۴)$$

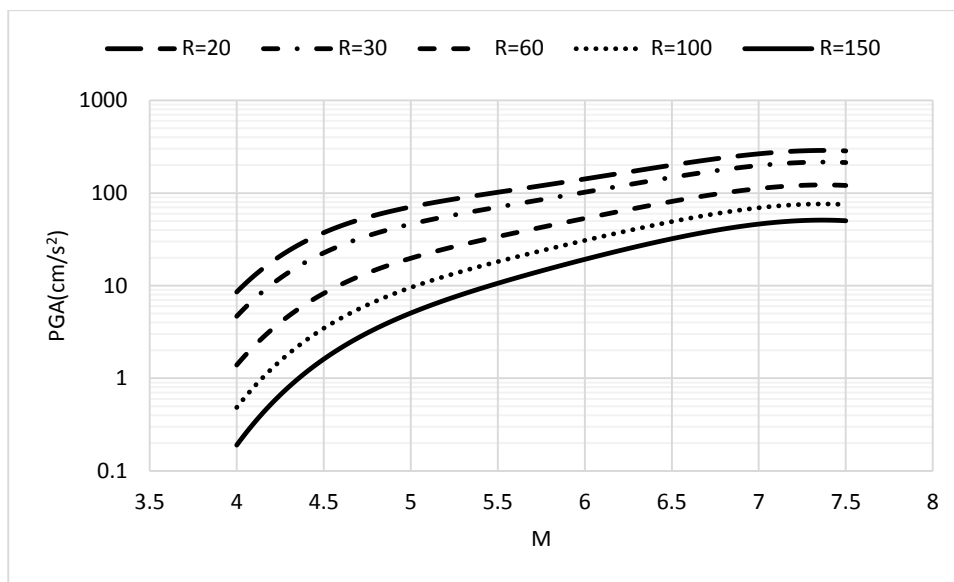
که در این رابطه نیز M بزرگا گشتاوری، R فاصله کانونی بر حسب کیلومتر (km)، V سرعت موج برشی بر حسب متر بر ثانیه (m/s) و PGA بیشینه شتاب افقی بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه (cm/s^2) می باشد. در ادامه برای درک بهتر نتایج حاصله، به رسم نمودارهای بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا و فاصله می پردازیم.

شکل ۴-۷ و ۴-۸ منحنی تغییرات بیشینه شتاب افقی بر حسب فاصله (۱۵ تا ۱۵۰ کیلومتری) به ازای سه بزرگای ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ را نشان می دهد. در این نمودار سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می شود با دور شدن از کانون زلزله، بیشینه شتاب افقی به صورت غیر خطی کاهش می یابد.



شکل ۴-۷: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله های با بزرگی ۴/۵، ۵/۵ و ۶/۵ با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

شکل زیر نیز منحنی تغییرات بیشینه شتاب افقی بر حسب بزرگا (۴/۵ تا ۷) به ازای پنج فاصله کانونی ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتری را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش بزرگا، بیشینه شتاب افقی به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۸: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فواصل کانونی ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

۴-۶- مقایسه رابطه کاهندگی حاصل از دو روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی (GEP) و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی (GMDH)

مشاهده شد که در انتخاب روابط کاهندگی حاصل از هر روش روابطی با بالاترین دقت و کمترین خطا برگزیده شدند که البته میزان این دقت به واسطه پارامترهایی که در ادامه به تعریف آن‌ها پرداخته شده، مشخص می‌شوند.

یکی از این پارامترها، ریشه میانگین مربعات خطا^۱ می‌باشد که به وسیله رابطه زیر مورد ارزیابی و محاسبه قرار گیرد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (PGA_{actual_i} - PGA_{model_i})^2} \quad (4-4)$$

در رابطه فوق PGA_{actual} مقادیر بیشینه شتاب افقی هدف و PGA_{model} مقادیر بیشینه شتاب افقی حاصل شده از رابطه کاهندگی نهایی ارائه شده در پژوهش می‌باشند. واضح است زمانی که مقادیر پیش‌بینی شده و هدف با هم برابر شوند، مقدار خطا برابر با صفر خواهد شد و هر چه این عدد افزایش یابد، نشان‌دهنده خطای بیشتر و انطباق کمتر تابع هدف و مقدار پیش‌بینی شده است.

حال با استفاده از مقدار RMSE، مقدار تابع برازندگی^۲ از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

^۱Root Mean Square Error (RMSE)

^۲Fitness function (f)

$$f = \frac{1000}{1 + RMSE} \quad (5-4)$$

همانطور که از رابطه فوق برمی آید دامنه تغییرات تابع برازندگی ۰-۱۰۰۰ می باشد. مقدار ماکزیمم آن که ۱۰۰۰ است به ازای خطای صفر و انطباق کامل رکوردهای پیش بینی شده و هدف اتفاق خواهد افتاد که ایده آل ترین حالت ممکن می شود و هر چه مقدار تابع برازندگی کاهش یابد، تطابق حاصل کمتر خواهد شد.

همچنین مقدار ضریب تبیین^۱ نیز از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (PGA_{actual_i} - \overline{PGA_{actual}}) (PGA_{model_i} - \overline{PGA_{model}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (PGA_{actual_i} - \overline{PGA_{actual}})^2 \sum_{i=1}^n (PGA_{model_i} - \overline{PGA_{model}})^2}} \right)^2 \quad (6-4)$$

دامنه تغییرات این پارامتر ۰-۱ بوده و هر چه این عدد به یک نزدیکتر باشد نشان از انطباق بیشتر مقادیر پیش بینی شده و هدف و به طور کلی دقت بالاتر رابطه حاصله است.

انحراف معیار باقیمانده ها پارامتر دیگری ست که در این مطالعه برای مقایسه نتایج به دست آمده مورد استفاده قرار می گیرد که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\left| PGA_{actual_i} - PGA_{model_i} \right| - \left| \overline{PGA_{actual}} - \overline{PGA_{model}} \right| \right)^2}{n-1}} \quad (7-4)$$

^۱ Coefficient of Determination (R^2)

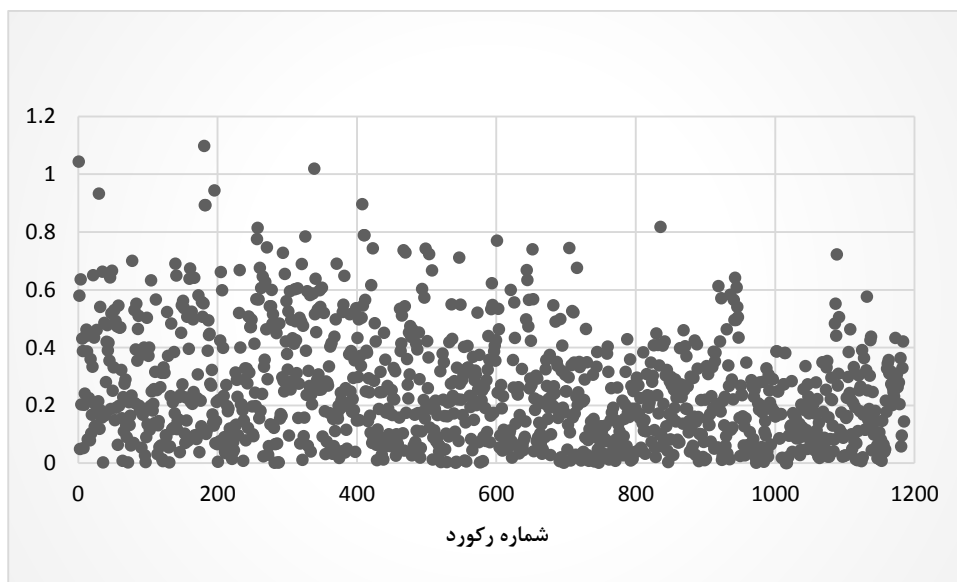
پارامترهای فوق‌الذکر برای هر یک از روابط حاصل از روش الگوریتم توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی در این پژوهش در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴: مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، تابع برازندگی، ضریب تبیین و انحراف معیار باقیمانده‌ها برای رکوردهای آموزشی و آزمایشی در دو روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی

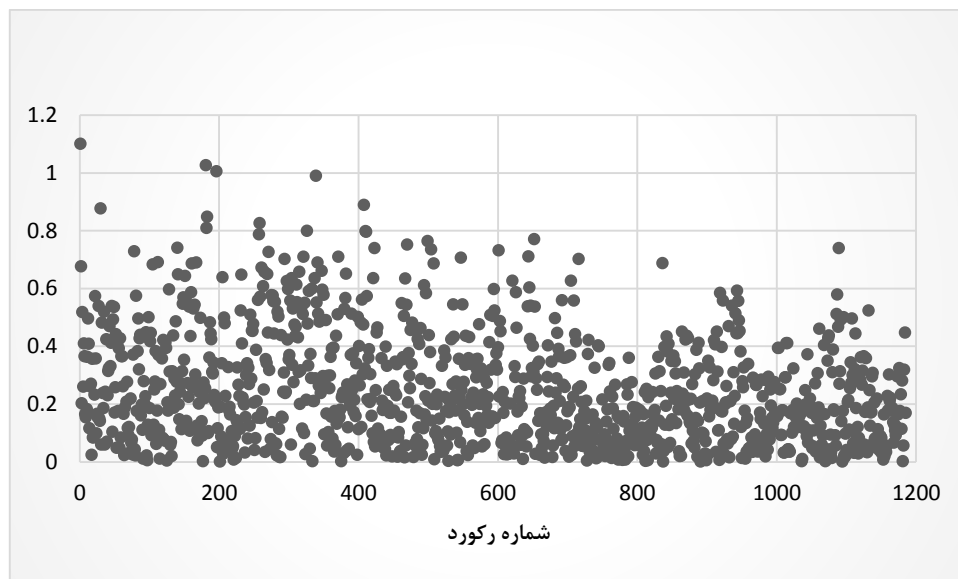
Standard Deviation of Residuals (SD)	Coefficient of Determination (R^2)	Fitness function (f)	Root Mean Square Error (RMSE)	Method	
0.308	0.77	765.23	0.305	Training Results	GEP
0.306	0.773	766.867	0.308	Testing Results	
0.302	0.777	768.049	0.302	Training Results	GMDH
0.298	0.787	769.83	0.299	Testing Results	

همانطور که مشاهده می‌شود رابطه کاهندگی حاصل از روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی با اختلاف اندکی دقت بالاتری نسبت به رابطه کاهندگی حاصل از روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی دارد که با توجه به اینکه تا به امروز روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی همواره به عنوان پرکاربردترین و مفیدترین روش هوشمند برای ارزیابی روابط کاهندگی شناخته شده است می‌توان روش الگوریتم مدیریت داده‌ها را به عنوان روشی جدید برای حصول روابط کاهندگی معرفی کرد.

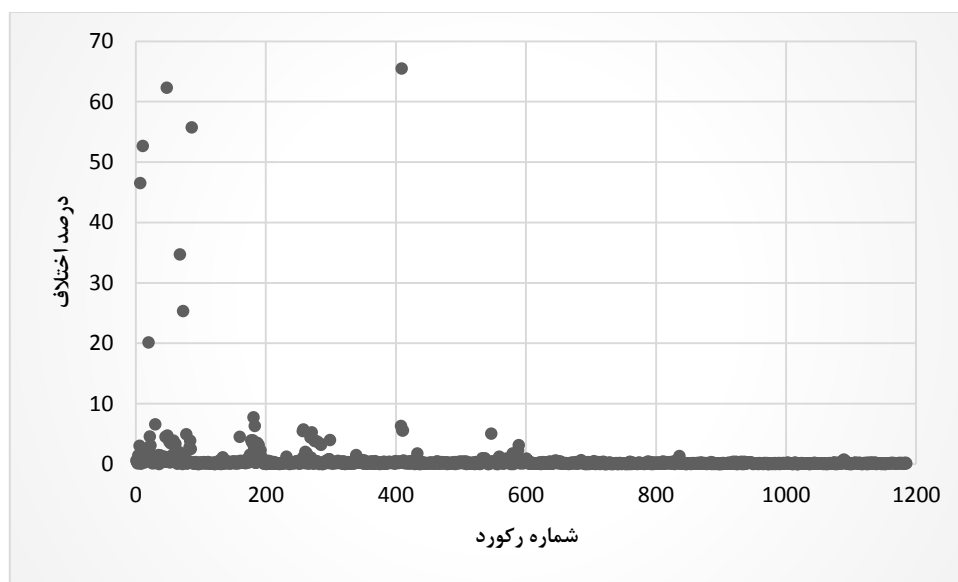
نمودار های ارائه شده در شکل های ۹-۴ و ۱۰-۴ به ترتیب نشان دهنده پراکندگی اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی هدف و به دست آمده از روابط کاهندگی به روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده ها به روش گروهی برای هر رکورد و نمودارهای ارائه شده در شکل های ۴-۱۱ و ۴-۱۲ به ترتیب نشان دهنده پراکندگی درصد اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی هدف و به دست آمده از روابط کاهندگی به روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده ها به روش گروهی برای هر رکورد می باشند.



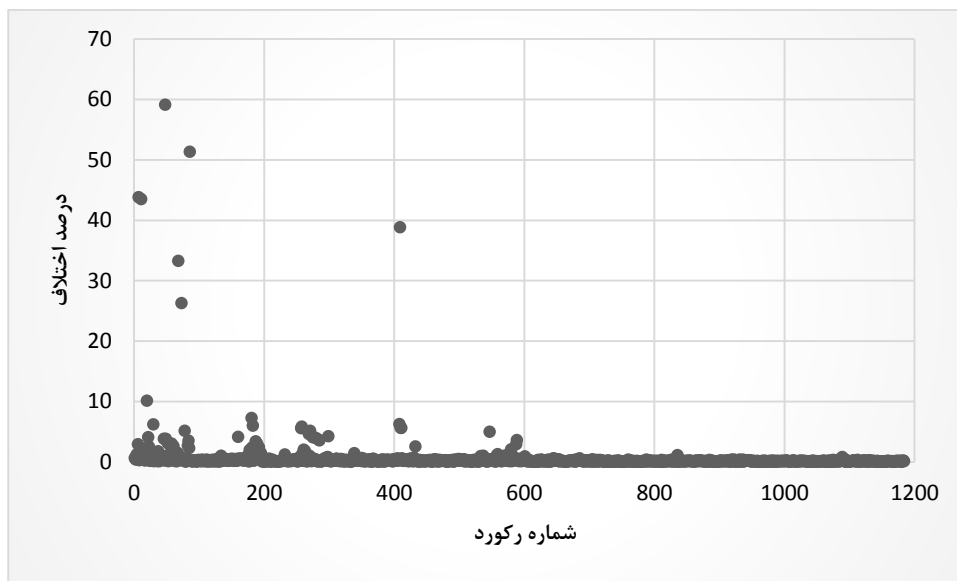
شکل ۹-۴: اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GEP و هدف برای هر رکورد



شکل ۴-۱: اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GMDH و هدف برای هر رکورد



شکل ۴-۱۱: درصد اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GEP و هدف برای هر رکورد زلزله



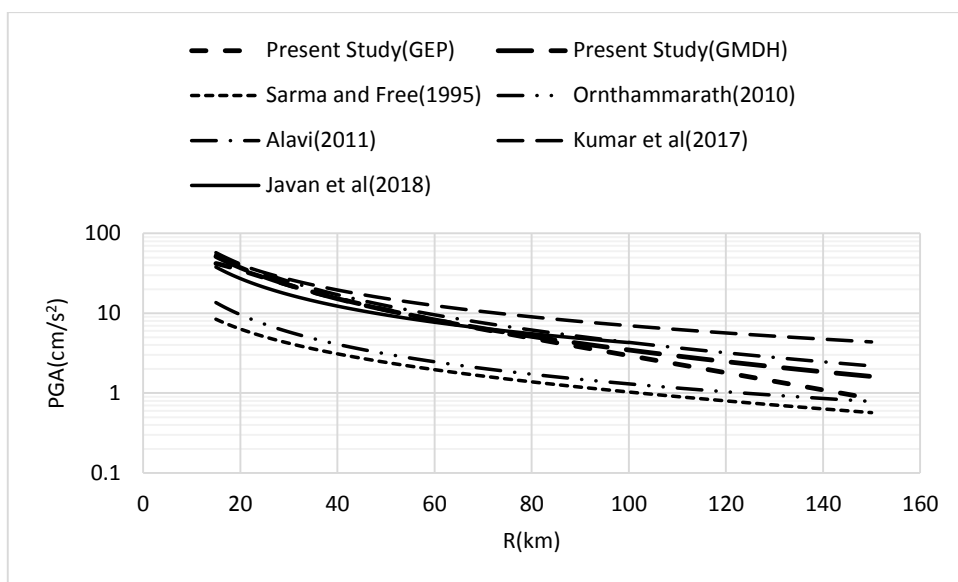
شکل ۴-۱۲: درصد اختلاف میان مقادیر بیشینه شتاب افقی به دست آمده از رابطه کاهندگی به روش GMDH و هدف برای هر رکورد زلزله

۴-۷- مقایسه رابطه کاهندگی حاصل شده با برخی پژوهش‌های

اخیر

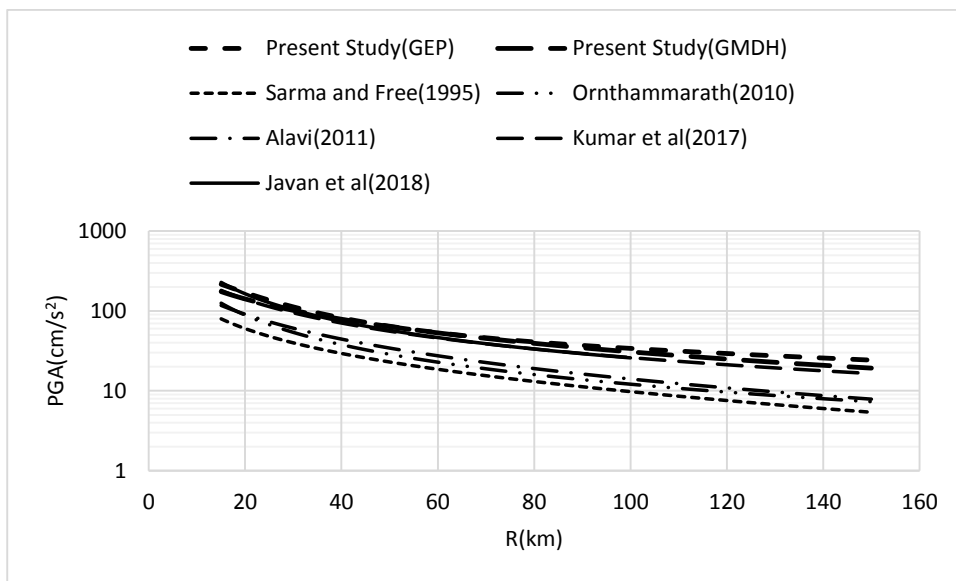
در این بخش برای سنجش دقت روابط حاصله و اثبات صحت آن‌ها به مقایسه روابط ارائه شده در این پژوهش و برخی روابط ارائه شده در گذشته پرداخته می‌شود. برای این مقایسه از روابط ارائه شده توسط سارما و فری (۱۹۹۵) [۲۶]، اورنساماراس و همکاران (۲۰۱۰) [۳۸]، علوی (۲۰۱۱) [۶۳]، کامار و همکاران (۲۰۱۷) [۴۷]، جوان و همکاران (۲۰۱۸) [۴۹] که در بخش تاریخچه نیز به آنها اشاره شد، استفاده شده است.

منحنی تغییرات بیشینه شتاب افقی بر حسب فاصله کانونی ۱۵-۱۵۰ کیلومتر برای زلزله با بزرگی ۴/۵، ۶ و ۷/۵ و سرعت موج برشی ۴۰۰ m/s، برای نتایج حاصل از مطالعه حاضر و پژوهش پژوهشگران فوق در شکل‌های ۴-۱۳، ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج این پژوهش و پژوهش‌های قبل از آن وجود دارد.



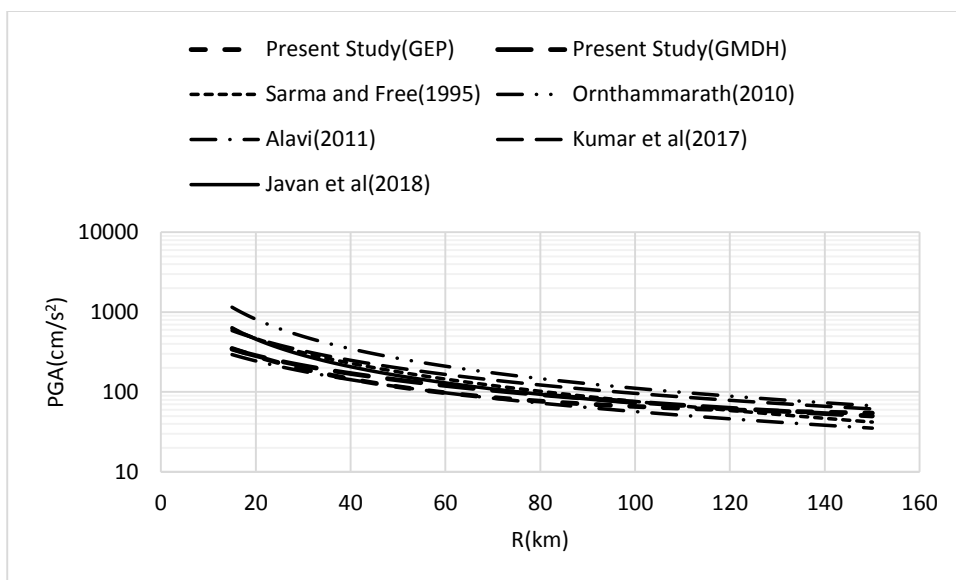
شکل ۴-۱۳: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۴/۵ با سرعت

موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه



شکل ۴-۱۴: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۶ با سرعت موج

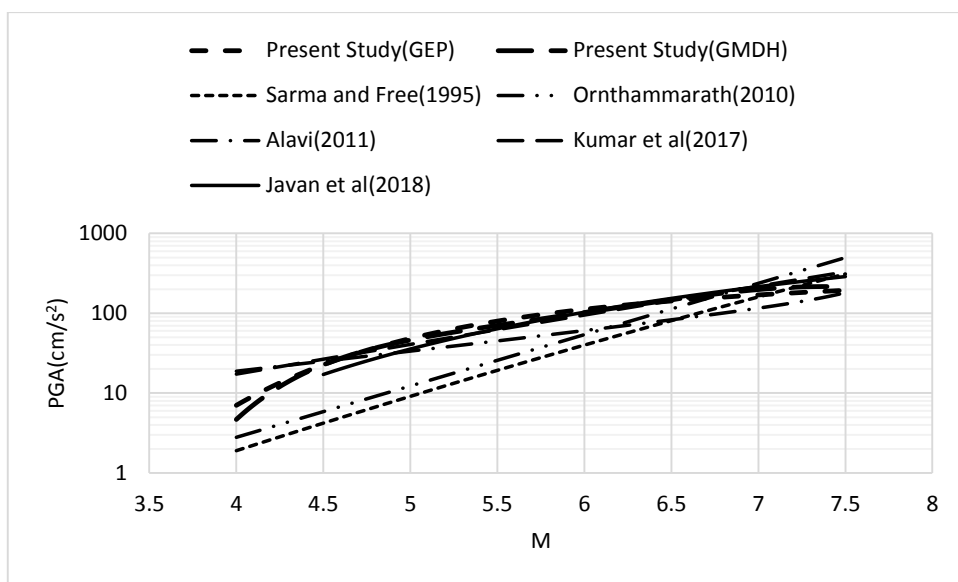
برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه



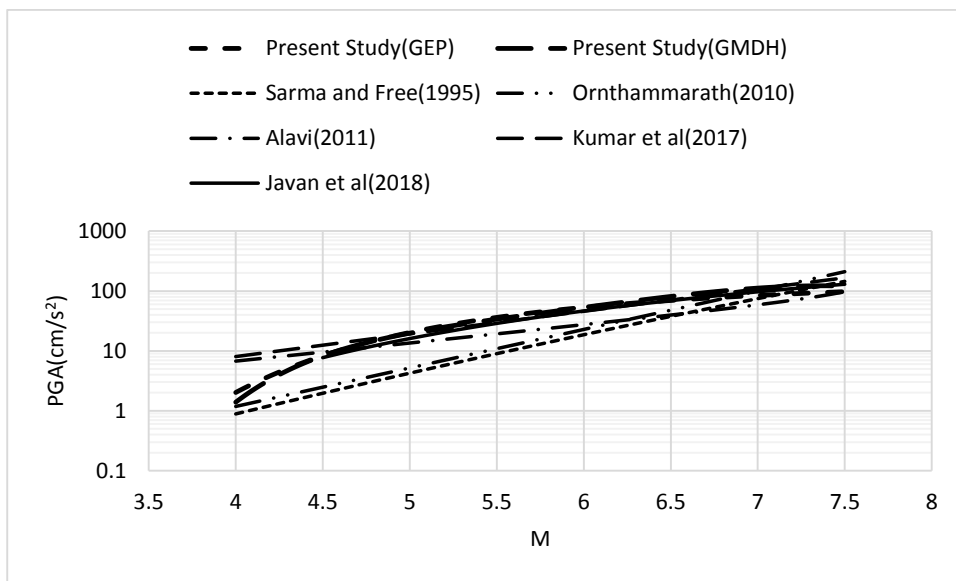
شکل ۴-۱۵: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب فاصله کانونی برای زلزله‌های با بزرگی ۷/۵ با سرعت موج

موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

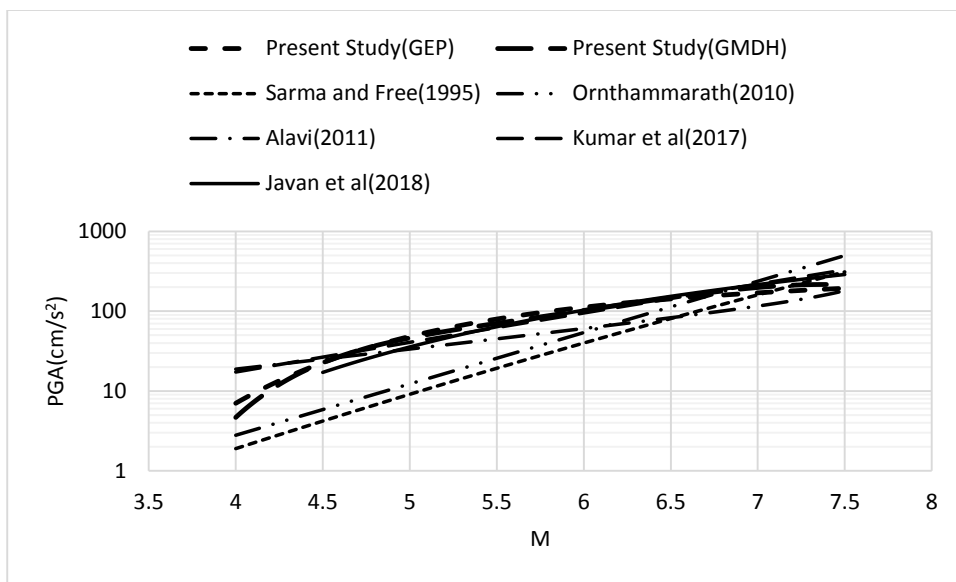
منحنی تغییرات بیشینه شتاب افقی بر حسب بزرگای ۴-۷/۵ و برای فاصله کانونی ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ کیلومتر و سرعت موج برشی ۴۰۰ m/s، متعلق به نتایج حاصل از مطالعه حاضر و پژوهش پژوهشگران مذکور به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۶، ۴-۱۷ و ۴-۱۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج این پژوهش و پژوهش‌های قبل از آن وجود دارد.



شکل ۴-۱۶: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگای در فاصله کانونی ۳۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه



شکل ۴-۱۷: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فاصله کانونی ۶۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه



شکل ۴-۱۸: نمودار بیشینه شتاب افقی زمین بر حسب بزرگا در فاصله کانونی ۱۰۰ کیلومتر با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

همچنین به منظور مقایسه عددی دقت پژوهش حال حاضر و پژوهش‌های اخیر، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، تابع برازندگی، ضریب تبیین و انحراف معیار باقیمانده‌ها برای روابط ارائه شده توسط هر یک از پژوهشگران مذکور در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴: مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، تابع برازندگی، ضریب تبیین و انحراف معیار باقیمانده‌ها برای دو روش الگوریتم هوشمند توسعه زنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و پژوهش‌های اخیر

Standard deviation of residuals (SD)	Coefficient of determination (R^2)	Fitness function (f)	Root mean square error (RMSE)	Method
0.335	0.705	606.4	0.649	Sarma and Free(1995)
0.313	0.704	644.47	0.552	Ornthammarath(2010)
0.230	0.658	713.33	0.402	Alavi(2011)
0.239	0.707	732.378	0.365	Kumar et al(2017)
0.205	0.736	749.659	0.334	Javan et al(2018)
0.307	0.771	765.55	0.306	Present Study(GEP)
0.303	0.779	768.4	0.301	Present Study(GMDH)

همانطور که مشاهده می‌شود علیرغم وسعت بسیار بزرگتر کاتالوگ به کار رفته در پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌های پیشین، مقدار ریشه میانگین حداقل مربعات خطا در دو روش استفاده شده در این پژوهش نسبت به پژوهش‌های گذشته حداقل و مقادیر تابع برازندگی و ضریب تبیین نسبت به پژوهش‌های پیشین حداکثر می‌باشند که نشان از دقت بالای پژوهش حال حاضر نسبت به پژوهش‌های پیشین دارد.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

به طور کلی، روابط کاهندگی نقشی مهم و تعیین کننده در مطالعات تحلیل خطر زلزله دارند و از این جهت حائز اهمیت هستند. گرچه مطالعه در مورد روابط کاهندگی به بیش از نیم قرن قبل برمی گردد و تاکنون روابط بسیار زیادی توسط پژوهشگران مختلف و برای نواحی مختلف ارائه شده است، اما با توجه به وقوع زلزله های جدید در هر سال، استفاده از دستگاه های شتاب نگاشت دقیق تر، همچنین نصب شتابنگاشت در مناطق جدید و گسترش شبکه شتابنگاشتی و در نتیجه آن کامل تر و دقیق تر شدن کاتالوگ زلزله، می توان انتظار داشت که همواره روابط دقیق تری نسبت به گذشته ارائه شود.

۵-۲- نتیجه گیری

در این پژوهش، در نهایت پس از حذف رکوردهای دارای خطا، از ۱۱۸۵ رکورد زلزله برای ارائه رابطه کاهندگی بیشینه شتاب افقی زمین استفاده شد. رکوردهای مورد استفاده دارای بزرگای گشتاوری ۴ تا ۷/۵ و فاصله کانونی ۱۵ تا ۱۵۰ کیلومتر می باشند. از پارامترهای بزرگای گشتاوری، فاصله کانونی و سرعت موج برشی، به عنوان متغیر و از جذر مجموع مربعات بیشینه شتاب افقی در دو جهت افقی متعامد، به عنوان تابع هدف استفاده شد. سپس روابط کاهندگی جدیدی به واسطه دو روش الگوریتم هوشمند توسعه ژنی (GEP) و الگوریتم مدیریت داده ها به روش گروهی (GMDH) استخراج شده و پس از مقایسه نتایج حاصل از دو روش مذکور، همپوشانی بالا نتایج مشاهده گردید. همچنین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در دو روش الگوریتم توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده ها به روش گروهی به ترتیب ۰/۳۰۶ و ۰/۳۰۱، تابع برازندگی ۷۶۵/۵۵ و ۷۶۸/۴ و ضریب تبیین ۰/۷۷۱ و ۰/۷۷۹ به دست آمدند. به واسطه مقایسه پارامترهای مذکور،

دقت رابطه حاصل از روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی نسبت به روش الگوریتم توسعه ژنی قابل قبول ارزیابی شده و در نتیجه می‌توان این روش را به عنوان روشی جدید معرفی کرد.

در نهایت به واسطه مقایسه رابطه کاهندگی به دست آمده با نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین، صحت و دقت این روابط مورد تایید قرار گرفت.

به طور کلی، اولاً وسیع بودن جامعه آماری و اضافه شدن رکوردهای ثبت شده در سال‌های اخیر به کاتالوگ زلزله که منجر به ارائه رابطه کاهندگی دقیقتری شده، دوما بهره‌گیری از دو روش هوشمند الگوریتم توسعه ژنی و الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و مقایسه نتایج حاصل از این دو روش، از نقاط قوت این پژوهش به حساب می‌آیند.

۵-۳- نوآوری

نوآوری این پژوهش در معرفی روش جدید الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و سنجش میزان اعتبار این روش به واسطه مقایسه آن با روش الگوریتم توسعه ژنی می‌باشد.

۵-۴- پیشنهادات

به عنوان پیشنهادی برای تحقیقات آتی می‌توان بیشینه سرعت زمین، طیف پاسخ الاستیک و طیف پاسخ غیرالاستیک را به عنوان تابع هدف در نظر گرفته و به تحقیق روابط کاهندگی مناسب برای ارزیابی هر یک از آن‌ها پرداخت.

همچنین به واسطه بهره‌گیری از کاتالوگی وسیع‌تر که دارای تنوع نوع گسلش بالاتری باشد می‌توان نوع گسلش را نیز به عنوان متغیر چهارم موثر در رابطه کاهندگی موردنظر وارد کرده و تاثیر آن را در رابطه حاصله مورد ارزیابی قرار داد.

به علاوه با بهره‌گیری از روش الگوریتم مدیریت داده‌ها به روش گروهی و تغییر تعداد و نوع متغیرهای ورودی موثر در نظر گرفته شده، امکان تحقیق موثرترین گروه متغیرهای ورودی و به دنبال آن دقیق‌ترین رابطه فراهم خواهد شد. قابل ذکر است که با استفاده از پژوهش مذکور می‌توان به تحقیق درجه اهمیت و تاثیرگذاری متغیرها در رابطه نهایی نیز پرداخت.

پوست

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.00	25.87	519.00	1.794	0.750	0.693	4.18	50.83	277.66	0.142	0.808	0.693
4.10	30.69	428.00	1.500	0.920	0.823	4.18	50.95	405.00	0.443	0.694	0.823
4.12	25.17	760.00	0.549	0.598	0.751	4.18	51.27	424.54	0.341	0.672	0.751
4.12	27.70	364.45	0.443	1.080	0.961	4.18	54.42	366.77	0.142	0.672	0.961
4.12	32.16	760.00	0.341	0.544	0.601	4.18	54.60	333.00	0.549	0.698	0.601
4.12	39.02	652.29	0.142	0.573	0.551	4.18	55.97	383.09	0.142	0.634	0.551
4.12	46.47	760.00	-0.008	0.379	0.357	4.18	56.91	760.00	0.142	0.334	0.357
4.12	46.53	404.73	0.744	0.692	0.579	4.18	57.69	373.46	0.142	0.616	0.579
4.12	57.10	627.87	0.142	0.344	0.296	4.18	57.80	927.00	0.142	0.205	0.296
4.12	58.00	560.63	0.142	0.383	0.325	4.18	58.66	268.81	0.142	0.688	0.325
4.12	59.95	462.66	-0.008	0.430	0.354	4.18	62.17	257.00	0.443	0.642	0.354
4.12	62.11	688.28	0.691	0.229	0.195	4.18	63.02	278.64	0.142	0.611	0.195
4.12	70.71	613.05	0.549	0.161	0.141	4.18	63.20	273.32	0.142	0.612	0.141
4.12	76.39	422.00	0.293	0.210	0.177	4.18	69.14	344.72	0.142	0.465	0.177
4.12	78.87	344.76	0.443	0.228	0.183	4.18	72.31	529.99	0.443	0.287	0.183
4.12	80.35	326.07	0.443	0.219	0.174	4.18	75.30	378.00	0.341	0.350	0.174
4.12	83.14	264.86	0.142	0.221	0.166	4.18	75.62	342.64	0.142	0.370	0.166
4.12	85.40	407.62	0.443	0.083	0.087	4.18	76.00	229.32	0.341	0.451	0.087
4.12	88.26	407.10	0.142	0.039	0.058	4.18	76.71	258.10	0.142	0.417	0.058
4.12	93.01	635.15	-0.008	-0.176	-0.093	4.18	79.28	393.26	-0.008	0.281	-0.093
4.12	98.08	535.12	0.142	-0.192	-0.089	4.18	81.01	371.33	0.142	0.271	-0.089
4.14	38.54	462.66	0.142	0.793	0.716	4.18	81.59	414.77	0.142	0.232	0.716
4.14	51.70	470.57	0.142	0.577	0.499	4.18	83.73	289.87	0.142	0.288	0.499
4.14	61.38	688.28	0.142	0.269	0.241	4.18	84.68	481.14	0.142	0.145	0.241
4.18	20.85	383.69	1.049	1.251	1.214	4.18	86.59	351.22	-0.008	0.203	1.214
4.18	22.94	420.48	1.289	1.160	1.136	4.18	89.63	586.00	0.142	0.010	1.136
4.18	23.23	355.87	1.707	1.246	1.167	4.18	96.16	485.00	0.142	-0.022	1.167
4.18	25.52	423.11	0.920	1.110	1.070	4.18	99.79	244.74	0.142	0.081	1.070
4.18	26.67	383.09	0.926	1.140	1.067	4.20	23.14	279.56	1.611	1.377	1.067
4.18	27.91	416.52	0.142	1.075	1.019	4.20	30.65	600.00	0.142	0.842	1.019
4.18	31.07	428.08	0.884	1.004	0.944	4.20	31.20	477.00	0.898	0.969	0.944
4.18	31.79	434.29	0.443	0.984	0.925	4.20	32.33	686.73	0.798	0.729	0.925
4.18	33.36	750.25	0.443	0.626	0.680	4.20	39.20	486.00	1.359	0.829	0.680
4.18	33.63	668.72	0.549	0.706	0.734	4.20	46.68	560.63	0.443	0.651	0.734
4.18	33.94	290.17	0.443	1.105	0.962	4.20	47.28	690.97	0.142	0.536	0.962
4.18	36.10	461.00	0.884	0.881	0.825	4.20	49.27	463.82	0.142	0.694	0.825
4.18	37.13	1043.00	0.142	0.312	0.384	4.20	60.64	504.27	0.142	0.497	0.384
4.18	39.50	460.09	0.341	0.826	0.764	4.20	67.38	429.01	-0.008	0.456	0.764
4.18	42.51	377.62	0.691	0.856	0.760	4.27	15.03	384.44	1.939	1.429	0.760
4.18	43.38	505.00	0.443	0.724	0.673	4.27	15.68	368.88	1.647	1.449	0.673
4.18	43.54	351.22	0.443	0.863	0.757	4.27	16.28	331.73	1.688	1.505	0.757
4.18	45.91	249.00	0.443	0.921	0.767	4.27	17.18	283.34	1.379	1.571	0.767
4.18	45.94	419.23	1.151	0.761	0.682	4.27	17.30	420.00	1.394	1.340	0.682
4.18	47.38	396.33	0.341	0.758	0.672	4.27	18.17	275.12	1.185	1.561	0.672
4.18	47.75	489.62	1.026	0.671	0.614	4.27	19.39	345.88	1.590	1.422	0.614
4.18	48.41	347.00	0.142	0.785	0.681	4.27	19.48	332.35	1.621	1.441	0.681
4.18	48.46	402.06	0.549	0.736	0.652	4.27	19.48	332.51	1.842	1.441	0.652
4.18	50.32	639.74	-0.008	0.511	0.484	4.27	19.57	331.92	1.413	1.440	0.484

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.27	20.14	392.70	1.335	1.338	1.339	4.27	45.64	432.47	1.078	0.850	0.806
4.27	20.42	699.00	0.992	0.901	1.119	4.27	46.45	337.71	0.956	0.919	0.844
4.27	20.63	399.45	1.822	1.319	1.322	4.27	47.77	328.60	1.142	0.906	0.829
4.27	20.71	336.60	1.543	1.409	1.358	4.27	48.34	279.46	1.391	0.940	0.843
4.27	22.14	352.55	1.728	1.357	1.310	4.27	48.36	526.24	1.280	0.733	0.712
4.27	22.32	355.02	1.750	1.349	1.304	4.27	48.66	316.83	1.174	0.902	0.821
4.27	22.55	383.27	1.191	1.306	1.282	4.27	48.85	314.48	1.462	0.901	0.819
4.27	22.69	306.76	1.211	1.408	1.323	4.27	48.90	495.59	1.287	0.750	0.722
4.27	22.71	351.45	1.979	1.346	1.296	4.27	49.51	444.01	0.884	0.782	0.743
4.27	24.75	268.65	1.164	1.412	1.292	4.27	49.76	399.80	0.884	0.815	0.763
4.27	26.15	342.50	1.469	1.286	1.219	4.27	49.91	426.21	1.018	0.791	0.747
4.27	26.21	334.99	1.500	1.294	1.222	4.27	50.29	322.53	1.018	0.871	0.794
4.27	26.86	261.07	1.629	1.373	1.246	4.27	50.42	486.00	1.242	0.736	0.706
4.27	27.03	329.84	1.144	1.284	1.206	4.27	51.39	488.00	0.798	0.720	0.691
4.27	28.20	243.17	1.049	1.364	1.225	4.27	52.09	441.33	1.142	0.747	0.708
4.27	29.15	261.45	1.887	1.321	1.195	4.27	52.39	393.26	0.142	0.781	0.729
4.27	29.48	274.73	1.551	1.297	1.182	4.27	53.29	584.00	1.295	0.622	0.609
4.27	30.37	333.31	1.242	1.211	1.132	4.27	53.79	413.39	0.956	0.744	0.699
4.27	31.05	266.90	1.142	1.273	1.153	4.27	55.17	642.83	1.078	0.555	0.548
4.27	31.16	261.91	1.422	1.276	1.153	4.27	55.58	335.43	0.985	0.780	0.714
4.27	32.02	243.55	1.223	1.279	1.144	4.27	56.70	396.01	1.213	0.716	0.669
4.27	32.65	309.61	1.455	1.192	1.098	4.27	56.76	362.39	0.987	0.741	0.685
4.27	34.19	468.18	1.060	0.999	0.978	4.27	58.57	378.45	1.343	0.702	0.654
4.27	34.62	281.94	1.495	1.183	1.074	4.27	59.66	460.09	0.723	0.626	0.598
4.27	35.31	315.63	1.121	1.134	1.044	4.27	59.75	1043.00	0.142	0.234	0.216
4.27	35.83	336.07	1.096	1.103	1.024	4.27	79.90	292.23	0.549	0.466	0.444
4.27	36.91	329.24	1.422	1.090	1.007	4.27	87.09	356.00	0.549	0.324	0.347
4.27	36.99	332.35	1.398	1.086	1.004	4.27	90.60	505.00	0.492	0.185	0.251
4.27	37.43	355.87	0.987	1.054	0.984	4.27	91.44	704.10	0.642	0.061	0.144
4.27	37.96	275.50	1.221	1.125	1.016	4.27	94.66	423.11	0.142	0.180	0.250
4.27	38.16	325.13	1.164	1.072	0.987	4.27	97.38	260.00	0.142	0.247	0.283
4.27	39.24	349.43	1.552	1.029	0.956	4.27	100.69	739.55	0.142	-0.075	0.052
4.27	39.58	383.09	0.619	0.991	0.931	4.27	105.21	465.00	0.142	0.015	0.144
4.27	39.61	267.35	1.049	1.103	0.991	4.27	126.23	763.00	0.142	-0.415	-0.132
4.27	40.59	366.77	0.992	0.989	0.923	4.27	127.94	611.00	0.142	-0.365	-0.078
4.27	40.60	340.00	0.956	1.014	0.937	4.27	128.86	682.03	0.142	-0.411	-0.112
4.27	40.61	330.03	1.255	1.024	0.942	4.34	34.03	303.00	0.142	1.240	1.168
4.27	41.38	420.96	0.443	0.927	0.880	4.34	35.81	275.00	0.341	1.234	1.150
4.27	41.45	360.00	1.099	0.981	0.912	4.34	42.69	360.05	0.142	1.035	0.990
4.27	41.63	340.81	1.207	0.996	0.920	4.34	61.43	522.00	0.549	0.649	0.648
4.27	42.45	273.57	1.168	1.045	0.939	4.34	63.73	461.00	0.549	0.661	0.654
4.27	42.86	283.14	1.414	1.029	0.928	4.34	64.26	351.22	0.341	0.730	0.702
4.27	43.14	275.87	1.203	1.031	0.927	4.34	70.17	373.46	0.142	0.637	0.624
4.27	43.70	414.03	1.587	0.896	0.847	4.34	71.67	420.48	0.142	0.586	0.586
4.27	43.80	630.66	1.361	0.712	0.713	4.34	80.30	249.00	0.142	0.590	0.566
4.27	43.88	325.97	1.090	0.972	0.891	4.34	81.94	485.00	0.142	0.417	0.453
4.27	44.57	639.74	0.549	0.694	0.695	4.34	82.28	489.00	0.142	0.410	0.447
4.27	45.48	299.65	1.121	0.969	0.878	4.34	84.47	355.87	0.142	0.465	0.485

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.34	89.62	505.00	0.142	0.311	0.373	4.53	61.61	381.71	1.018	0.940	0.938
4.34	98.09	373.07	0.142	0.282	0.355	4.53	63.00	399.84	1.239	0.912	0.914
4.34	99.07	370.36	0.142	0.272	0.347	4.53	66.36	423.00	1.134	0.859	0.866
4.45	33.81	760.00	-0.008	0.936	0.997	4.53	66.88	353.54	1.018	0.896	0.893
4.45	34.62	500.00	1.213	1.144	1.163	4.53	68.46	353.63	1.385	0.878	0.877
4.45	35.74	341.00	1.121	1.266	1.237	4.53	84.87	386.88	0.992	0.678	0.705
4.45	38.94	356.00	0.987	1.199	1.175	4.53	90.19	292.12	1.148	0.676	0.694
4.45	49.73	375.00	0.956	1.022	1.005	4.53	91.98	281.74	1.134	0.663	0.681
4.45	69.90	927.00	0.443	0.448	0.443	4.59	25.53	332.00	1.078	1.575	1.555
4.45	69.95	265.59	0.619	0.837	0.810	4.59	26.82	407.10	1.280	1.476	1.485
4.45	74.50	399.00	0.619	0.695	0.706	4.59	28.57	643.91	1.335	1.235	1.294
4.45	99.74	460.09	0.798	0.374	0.457	4.59	34.11	348.00	1.304	1.397	1.385
4.50	39.84	561.04	1.727	1.065	1.088	4.59	34.34	303.00	1.018	1.432	1.405
4.53	21.77	436.14	1.557	1.492	1.530	4.59	38.09	275.00	1.148	1.391	1.357
4.53	23.49	626.44	1.861	1.263	1.362	4.59	40.26	241.21	1.186	1.383	1.339
4.53	23.49	564.93	0.926	1.326	1.405	4.59	45.64	360.05	0.642	1.209	1.203
4.53	24.21	387.12	1.733	1.500	1.505	4.59	53.41	660.00	0.142	0.918	0.929
4.53	28.42	351.31	1.365	1.454	1.439	4.59	57.39	522.00	0.142	0.957	0.968
4.53	29.05	396.01	1.439	1.399	1.400	4.59	58.43	416.52	0.443	1.010	1.014
4.53	29.14	362.39	1.464	1.430	1.418	4.59	60.58	410.46	1.144	0.989	0.993
4.53	30.53	642.83	0.884	1.155	1.212	4.59	61.36	351.22	0.341	1.017	1.013
4.53	32.48	346.82	1.185	1.382	1.365	4.59	64.44	461.00	1.096	0.915	0.926
4.53	33.70	441.33	1.099	1.279	1.289	4.59	66.30	373.46	0.341	0.947	0.949
4.53	35.37	322.53	1.164	1.353	1.327	4.59	69.75	420.48	0.642	0.882	0.892
4.53	35.77	426.21	1.310	1.258	1.263	4.59	75.55	895.00	1.223	0.577	0.566
4.53	36.05	358.36	1.191	1.310	1.297	4.59	75.85	378.00	0.818	0.842	0.852
4.53	37.14	314.48	1.256	1.329	1.302	4.59	76.07	489.62	0.443	0.777	0.798
4.53	37.74	279.46	1.256	1.349	1.310	4.59	76.35	425.34	1.168	0.810	0.826
4.53	37.93	328.60	1.289	1.304	1.282	4.59	77.08	485.00	0.142	0.769	0.791
4.53	38.16	316.83	1.273	1.310	1.284	4.59	77.23	249.00	0.443	0.906	0.890
4.53	38.75	348.87	1.347	1.274	1.258	4.59	80.34	225.00	0.142	0.889	0.868
4.53	39.67	296.97	1.257	1.302	1.270	4.59	81.31	471.92	0.443	0.734	0.760
4.53	39.84	488.00	1.018	1.148	1.161	4.59	82.39	355.87	0.757	0.787	0.802
4.53	39.86	358.92	1.561	1.248	1.235	4.59	86.55	347.00	0.691	0.749	0.769
4.53	41.09	432.47	1.305	1.172	1.175	4.59	87.88	440.00	0.142	0.685	0.719
4.53	41.77	325.97	0.956	1.245	1.223	4.59	88.91	260.00	0.642	0.777	0.779
4.53	42.29	425.02	1.390	1.160	1.162	4.59	90.30	394.66	0.142	0.685	0.718
4.53	42.34	526.24	0.987	1.084	1.101	4.59	90.69	505.00	1.223	0.623	0.668
4.53	42.97	396.41	1.692	1.172	1.168	4.59	91.05	427.41	1.142	0.660	0.699
4.53	43.48	328.92	0.549	1.216	1.196	4.59	93.16	393.00	0.142	0.657	0.696
4.53	44.97	370.36	1.562	1.163	1.153	4.59	96.81	644.00	0.619	0.497	0.555
4.53	45.11	338.19	1.390	1.185	1.168	4.59	97.17	525.79	0.549	0.550	0.609
4.53	49.22	414.03	1.275	1.072	1.072	4.59	97.51	373.07	0.691	0.625	0.669
4.53	49.52	340.65	1.304	1.121	1.106	4.59	98.02	383.09	0.142	0.614	0.661
4.53	49.71	308.33	1.151	1.142	1.119	4.59	98.34	419.23	0.142	0.592	0.645
4.53	54.34	367.84	1.185	1.038	1.031	4.59	98.49	370.36	0.549	0.616	0.662
4.53	61.41	336.33	1.261	0.972	0.962	4.60	25.75	428.00	1.485	1.483	1.501
4.53	61.58	328.09	1.304	0.976	0.963	4.60	25.75	428.00	1.485	1.483	1.501

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.60	33.28	728.50	1.599	1.116	1.160	4.70	23.64	266.90	2.339	1.752	1.704
4.60	41.97	383.98	1.406	1.252	1.250	4.70	23.66	315.63	1.965	1.703	1.677
4.60	42.84	316.19	1.121	1.290	1.273	4.70	23.74	306.67	0.691	1.710	1.680
4.60	45.58	1252.00	0.818	0.654	0.576	4.70	24.03	290.46	2.235	1.720	1.683
4.60	75.50	396.00	0.549	0.845	0.857	4.70	24.49	258.10	2.380	1.742	1.691
4.60	83.75	681.24	1.343	0.615	0.642	4.70	24.81	243.55	2.203	1.749	1.691
4.60	94.26	687.89	0.798	0.513	0.561	4.70	26.20	315.84	1.361	1.649	1.625
4.69	20.35	348.00	1.485	1.734	1.727	4.70	26.46	261.07	1.164	1.696	1.649
4.69	35.41	275.00	0.850	1.505	1.475	4.70	26.55	261.45	1.387	1.693	1.647
4.69	74.31	347.00	0.549	0.970	0.971	4.70	26.71	337.97	1.365	1.618	1.603
4.69	98.46	423.11	0.142	0.703	0.740	4.70	26.79	226.29	2.321	1.722	1.660
4.70	15.12	351.59	2.220	1.842	1.867	4.70	27.02	243.17	2.242	1.701	1.647
4.70	15.38	261.91	2.280	1.956	1.911	4.70	27.92	268.65	1.913	1.658	1.617
4.70	15.46	367.76	1.289	1.815	1.847	4.70	31.92	287.16	0.956	1.563	1.534
4.70	15.49	273.66	1.842	1.938	1.901	4.70	32.17	399.45	1.373	1.466	1.468
4.70	15.89	270.56	2.527	1.932	1.892	4.70	32.75	438.10	1.151	1.426	1.435
4.70	16.05	460.09	1.436	1.690	1.771	4.70	35.78	271.60	0.987	1.507	1.478
4.70	16.17	381.89	1.288	1.785	1.818	4.70	36.22	331.73	1.273	1.452	1.440
4.70	16.39	344.72	2.110	1.827	1.835	4.70	36.42	283.34	1.518	1.487	1.462
4.70	16.63	271.90	2.345	1.913	1.870	4.70	36.87	319.92	1.734	1.451	1.436
4.70	16.67	361.76	1.383	1.800	1.817	4.70	37.10	275.12	1.557	1.482	1.455
4.70	16.71	257.33	2.343	1.930	1.876	4.70	37.40	285.93	1.191	1.469	1.445
4.70	17.27	357.97	1.191	1.793	1.803	4.70	37.83	265.59	1.746	1.478	1.448
4.70	17.30	452.15	1.191	1.681	1.743	4.70	38.50	266.31	1.801	1.466	1.438
4.70	17.33	333.56	2.246	1.821	1.816	4.70	38.52	306.60	1.261	1.435	1.417
4.70	17.56	340.81	1.496	1.807	1.806	4.70	40.11	326.47	0.992	1.395	1.384
4.70	17.89	261.91	2.500	1.895	1.842	4.70	40.42	272.18	1.486	1.431	1.406
4.70	17.93	275.50	2.033	1.877	1.834	4.70	41.44	282.50	0.992	1.408	1.386
4.70	19.09	281.94	2.117	1.842	1.801	4.70	41.67	396.21	1.289	1.322	1.324
4.70	19.12	413.39	1.191	1.694	1.722	4.70	41.88	276.81	1.558	1.405	1.383
4.70	19.29	273.32	1.915	1.847	1.801	4.70	42.71	376.96	1.261	1.321	1.320
4.70	19.34	401.26	1.213	1.703	1.724	4.70	42.88	371.65	0.884	1.322	1.320
4.70	19.65	319.92	2.476	1.786	1.766	4.70	43.18	283.73	1.492	1.381	1.361
4.70	19.68	580.03	1.497	1.508	1.596	4.70	43.24	315.52	1.855	1.357	1.344
4.70	19.86	229.32	2.359	1.884	1.810	4.70	44.67	284.52	2.049	1.359	1.340
4.70	20.14	529.99	1.647	1.553	1.621	4.70	44.81	288.62	1.185	1.354	1.336
4.70	20.41	257.33	1.996	1.838	1.782	4.70	45.80	383.39	1.121	1.274	1.275
4.70	20.67	334.37	2.532	1.748	1.733	4.70	45.87	283.54	1.144	1.343	1.324
4.70	20.78	205.53	2.277	1.888	1.799	4.70	46.30	283.73	1.319	1.337	1.318
4.70	21.02	668.72	1.168	1.404	1.501	4.70	48.91	222.00	1.534	1.346	1.311
4.70	21.19	377.93	2.286	1.691	1.695	4.70	48.93	301.93	1.045	1.289	1.275
4.70	21.46	336.07	1.669	1.729	1.714	4.70	49.61	262.05	1.525	1.308	1.285
4.70	21.63	261.16	2.125	1.805	1.752	4.70	50.26	305.54	1.227	1.269	1.257
4.70	21.89	322.00	2.002	1.734	1.712	4.70	52.00	339.60	1.748	1.225	1.219
4.70	21.97	332.33	2.304	1.722	1.705	4.70	53.83	277.83	1.792	1.243	1.225
4.70	22.18	477.92	1.612	1.572	1.610	4.70	54.96	361.56	1.824	1.175	1.173
4.70	22.32	309.61	1.500	1.738	1.710	4.70	56.24	389.87	1.106	1.143	1.144
4.70	23.47	393.26	1.426	1.631	1.636	4.70	57.81	505.00	0.798	1.057	1.066

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.70	72.61	331.92	1.121	1.005	1.002	4.88	148.78	763.00	0.142	0.387	0.500
4.70	72.76	392.70	1.018	0.969	0.974	4.88	148.92	505.00	0.798	0.482	0.586
4.70	73.07	335.43	1.207	0.998	0.996	4.90	15.63	612.78	1.589	1.675	1.768
4.70	77.04	354.82	1.144	0.948	0.951	4.90	17.15	649.67	1.655	1.625	1.703
4.70	77.80	379.46	1.304	0.927	0.934	4.90	18.46	288.67	1.712	1.958	1.910
4.70	79.24	350.06	1.445	0.930	0.933	4.90	18.91	327.80	1.921	1.909	1.878
4.70	79.72	329.84	1.185	0.936	0.937	4.90	20.93	272.80	1.465	1.917	1.863
4.70	83.26	389.95	1.257	0.870	0.882	4.90	21.48	282.14	1.824	1.895	1.846
4.70	85.48	332.35	1.058	0.880	0.886	4.90	29.63	315.31	1.341	1.699	1.672
4.70	88.61	323.40	1.078	0.856	0.864	4.90	36.03	321.91	1.760	1.585	1.567
4.70	90.05	355.87	1.121	0.825	0.840	4.90	48.67	286.60	1.492	1.433	1.416
4.70	90.11	630.66	0.873	0.690	0.715	4.90	48.98	277.09	1.168	1.435	1.417
4.70	92.82	340.65	1.164	0.808	0.823	4.90	49.36	268.86	1.248	1.436	1.416
4.70	94.29	325.97	0.841	0.802	0.817	4.90	52.62	570.88	1.125	1.225	1.218
4.70	94.89	581.80	1.207	0.670	0.706	4.90	55.17	437.07	1.099	1.271	1.268
4.70	95.94	495.59	0.850	0.702	0.738	4.90	58.82	188.87	1.322	1.381	1.340
4.70	96.34	427.88	1.164	0.731	0.763	4.90	59.84	267.71	1.385	1.320	1.299
4.70	97.37	432.47	1.018	0.719	0.754	4.90	67.36	367.57	1.444	1.191	1.182
4.70	98.67	296.97	1.275	0.778	0.793	4.90	71.98	362.64	1.319	1.152	1.142
4.70	99.75	358.92	0.884	0.735	0.764	4.90	72.75	305.25	1.399	1.177	1.159
4.73	15.88	715.00	1.045	1.416	1.606	4.90	72.91	305.25	1.504	1.175	1.158
4.73	19.66	294.56	1.495	1.832	1.797	4.90	76.91	550.92	1.239	1.019	1.010
4.73	28.46	299.37	1.134	1.637	1.609	4.90	81.98	664.49	1.248	0.929	0.911
4.73	48.31	760.00	0.142	1.038	1.031	4.90	85.99	200.28	1.099	1.125	1.081
4.73	67.44	1464.00	-0.008	0.537	0.315	4.90	86.33	318.31	0.956	1.056	1.040
4.73	74.48	482.00	0.142	0.931	0.940	4.90	87.84	350.90	1.119	1.028	1.017
4.73	79.31	396.00	0.142	0.931	0.938	4.90	101.96	220.20	0.920	0.987	0.953
4.77	26.39	436.79	1.018	1.583	1.592	4.90	103.85	288.29	0.884	0.936	0.921
4.77	29.96	280.26	1.400	1.649	1.616	4.90	108.01	362.40	1.026	0.868	0.870
4.77	31.81	283.00	1.222	1.611	1.582	4.90	117.79	240.92	1.390	0.856	0.840
4.77	38.79	350.80	1.826	1.443	1.437	4.90	119.97	584.17	1.072	0.685	0.718
4.80	16.96	492.00	1.569	1.714	1.776	4.90	129.58	597.34	1.026	0.611	0.664
4.80	35.54	509.00	1.107	1.401	1.410	4.92	15.26	382.44	2.448	1.938	1.944
4.88	19.72	335.43	1.628	1.873	1.846	4.92	16.46	682.03	1.718	1.615	1.703
4.88	102.20	399.00	1.040	0.876	0.881	4.92	16.48	760.00	2.276	1.539	1.641
4.88	102.40	619.00	0.884	0.778	0.787	4.92	23.86	407.61	1.789	1.746	1.733
4.88	102.51	258.10	1.560	0.944	0.924	4.92	24.04	480.22	2.227	1.684	1.684
4.88	102.70	370.00	0.956	0.886	0.888	4.92	25.48	360.32	2.482	1.753	1.731
4.88	107.14	349.43	1.605	0.862	0.865	4.92	27.54	311.18	1.926	1.752	1.721
4.88	117.43	611.00	0.757	0.671	0.705	4.92	28.79	845.41	1.713	1.353	1.337
4.88	123.13	434.29	0.987	0.703	0.740	4.92	29.30	323.54	1.981	1.709	1.683
4.88	124.07	422.33	1.185	0.701	0.738	4.92	31.16	292.32	1.923	1.699	1.669
4.88	127.39	1242.00	0.798	0.377	0.334	4.92	32.02	632.54	1.902	1.450	1.446
4.88	130.07	805.00	0.443	0.507	0.558	4.92	34.97	263.00	1.962	1.655	1.623
4.88	132.67	668.72	0.549	0.538	0.605	4.92	35.69	407.49	2.017	1.543	1.535
4.88	136.69	347.00	0.757	0.641	0.689	4.92	36.86	292.12	2.040	1.604	1.581
4.88	144.93	1329.00	0.142	0.228	0.237	4.92	38.05	357.64	1.513	1.541	1.530
4.88	145.99	505.97	0.691	0.504	0.600	4.92	38.49	564.11	1.867	1.405	1.400

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.92	39.79	298.71	1.599	1.555	1.536	4.92	102.02	441.33	0.898	0.895	0.896
4.92	45.39	367.84	1.373	1.434	1.428	4.92	103.24	329.84	1.099	0.938	0.927
4.92	46.19	351.68	1.602	1.434	1.426	4.92	104.17	393.00	0.691	0.901	0.900
4.92	46.51	388.63	1.481	1.408	1.403	4.92	104.44	392.70	0.992	0.899	0.898
4.92	48.98	328.09	1.829	1.415	1.404	4.92	105.08	465.00	0.443	0.862	0.867
4.92	50.09	361.22	1.494	1.382	1.375	4.92	105.45	699.00	0.549	0.763	0.760
4.92	51.14	306.76	1.797	1.403	1.389	4.92	105.88	489.00	1.121	0.846	0.852
4.92	51.34	376.91	1.185	1.359	1.353	4.92	106.21	442.02	1.413	0.864	0.869
4.92	53.09	333.70	1.817	1.365	1.355	4.92	107.10	405.79	0.443	0.873	0.876
4.92	54.28	456.83	0.992	1.282	1.278	4.92	107.16	420.00	1.099	0.867	0.871
4.92	54.30	425.02	1.319	1.300	1.295	4.92	107.46	342.50	1.072	0.900	0.895
4.92	57.71	416.15	1.322	1.270	1.264	4.92	107.50	335.43	0.619	0.903	0.897
4.92	59.39	396.41	1.373	1.264	1.257	4.92	108.16	318.11	0.798	0.907	0.898
4.92	62.02	381.71	1.850	1.246	1.238	4.92	109.06	679.00	0.744	0.746	0.750
4.92	62.96	315.21	1.096	1.274	1.260	4.92	109.74	351.22	0.884	0.879	0.878
4.92	64.98	503.00	1.376	1.157	1.149	4.92	110.14	242.00	1.261	0.931	0.906
4.92	65.99	353.54	1.797	1.225	1.214	4.92	110.98	335.43	1.099	0.878	0.875
4.92	70.32	379.32	1.018	1.172	1.162	4.92	115.69	383.09	0.898	0.821	0.831
4.92	72.04	646.00	1.773	1.031	1.009	4.92	116.56	302.09	0.142	0.853	0.849
4.92	72.49	518.00	1.287	1.086	1.076	4.92	116.65	222.00	0.619	0.894	0.867
4.92	75.90	338.19	1.569	1.146	1.131	4.92	118.16	333.00	1.375	0.827	0.831
4.92	76.90	567.81	1.287	1.027	1.014	4.92	118.30	452.86	0.992	0.772	0.792
4.92	76.93	581.00	1.387	1.021	1.007	4.92	118.37	366.77	1.096	0.809	0.820
4.92	77.24	377.65	1.838	1.115	1.104	4.92	118.44	340.00	0.987	0.821	0.827
4.92	79.22	308.33	1.257	1.135	1.115	4.92	119.04	202.85	1.191	0.887	0.855
4.92	79.90	387.12	1.278	1.089	1.078	4.92	119.49	196.25	1.289	0.887	0.853
4.92	80.25	378.43	1.289	1.090	1.079	4.92	119.96	210.51	0.884	0.876	0.848
4.92	80.82	648.81	1.628	0.961	0.941	4.92	120.22	292.00	0.691	0.831	0.829
4.92	83.60	667.13	0.920	0.933	0.911	4.92	121.14	617.51	0.691	0.685	0.714
4.92	84.87	414.83	1.125	1.036	1.027	4.92	122.05	639.74	0.341	0.670	0.700
4.92	85.44	488.00	0.884	0.997	0.990	4.92	122.45	440.67	0.341	0.747	0.773
4.92	85.52	581.80	1.142	0.955	0.943	4.92	123.35	365.00	0.443	0.774	0.791
4.92	85.76	626.44	1.151	0.934	0.919	4.92	123.74	388.68	0.443	0.761	0.782
4.92	87.26	406.70	1.096	1.021	1.012	4.92	124.13	330.03	1.018	0.785	0.796
4.92	92.23	358.92	0.920	1.006	0.995	4.92	124.25	276.25	1.004	0.810	0.808
4.92	93.72	316.83	0.850	1.016	0.999	4.92	125.77	196.00	0.757	0.841	0.813
4.92	94.89	362.39	0.920	0.984	0.974	4.92	126.12	318.11	0.549	0.776	0.787
4.92	95.98	396.01	0.920	0.960	0.954	4.92	127.13	261.91	0.841	0.796	0.794
4.92	96.32	279.46	0.956	1.015	0.992	4.92	127.95	222.00	0.443	0.811	0.796
4.92	96.61	333.31	1.304	0.986	0.972	4.92	131.45	210.25	0.642	0.792	0.777
4.92	96.68	212.00	1.045	1.049	1.008	4.92	132.72	231.23	1.058	0.771	0.766
4.92	98.69	426.21	0.884	0.926	0.924	4.92	132.83	244.74	0.443	0.764	0.763
4.92	98.71	389.95	1.322	0.943	0.937	4.92	132.94	500.00	0.341	0.648	0.698
4.92	99.75	642.83	1.045	0.826	0.820	4.92	133.92	481.14	0.850	0.648	0.699
4.92	100.39	334.99	1.305	0.956	0.945	4.92	134.86	427.41	1.185	0.664	0.710
4.92	100.43	322.53	1.125	0.962	0.949	4.92	135.32	505.00	0.884	0.629	0.684
4.92	100.84	354.82	0.992	0.943	0.935	4.92	135.64	351.22	0.619	0.692	0.726
4.92	101.00	625.00	0.926	0.824	0.822	4.92	137.98	422.33	1.018	0.644	0.695

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
4.92	138.41	414.77	0.642	0.644	0.695	5.10	48.43	612.78	1.634	1.373	1.341
4.92	138.68	374.50	0.926	0.660	0.704	5.10	77.80	520.19	1.727	1.170	1.141
4.92	138.96	265.59	0.492	0.709	0.725	5.10	83.80	520.19	1.562	1.129	1.098
4.92	141.63	1043.00	0.142	0.393	0.433	5.13	21.99	420.81	2.017	1.881	1.844
4.92	143.27	375.00	0.619	0.627	0.680	5.13	29.03	508.08	1.757	1.696	1.666
4.92	143.38	342.64	0.549	0.640	0.686	5.13	41.59	326.19	1.373	1.621	1.599
4.92	143.85	460.09	0.850	0.586	0.656	5.13	49.42	349.60	1.276	1.513	1.496
4.92	144.60	586.00	0.341	0.532	0.615	5.13	58.56	365.22	1.151	1.414	1.395
4.92	144.87	611.00	0.443	0.520	0.605	5.17	66.72	418.98	1.373	1.340	1.316
4.92	145.91	398.94	0.884	0.597	0.661	5.17	66.85	422.25	1.504	1.338	1.313
4.92	146.71	257.03	0.549	0.657	0.684	5.17	67.02	553.32	1.333	1.278	1.243
4.92	146.72	726.00	0.142	0.465	0.556	5.17	80.13	280.26	1.257	1.308	1.267
4.92	148.38	393.26	0.142	0.582	0.650	5.17	97.58	436.79	0.798	1.124	1.086
4.92	148.86	282.25	0.987	0.629	0.669	5.17	125.65	306.37	1.078	1.016	0.966
4.92	149.02	424.54	0.492	0.564	0.640	5.19	18.39	329.00	2.099	2.055	1.993
5.00	17.65	428.00	1.728	1.892	1.885	5.19	39.21	336.07	1.755	1.675	1.649
5.00	24.77	371.02	1.267	1.800	1.772	5.20	20.08	508.08	1.795	1.885	1.847
5.00	24.78	388.65	1.164	1.786	1.762	5.20	23.50	450.28	1.719	1.864	1.821
5.00	25.14	395.54	1.227	1.774	1.751	5.20	28.48	368.72	2.325	1.827	1.787
5.00	31.79	352.79	1.512	1.686	1.664	5.20	28.73	567.78	2.368	1.700	1.657
5.00	32.44	213.44	1.390	1.776	1.724	5.20	35.49	336.20	1.099	1.733	1.702
5.00	33.13	285.33	1.304	1.711	1.679	5.20	37.11	198.77	1.322	1.796	1.747
5.00	35.29	246.61	1.347	1.702	1.665	5.20	40.72	326.19	1.099	1.665	1.640
5.00	40.89	246.61	1.191	1.617	1.587	5.20	42.69	219.31	1.961	1.703	1.666
5.00	43.33	204.69	0.841	1.611	1.573	5.20	43.38	535.24	1.813	1.520	1.489
5.00	46.34	597.34	1.099	1.343	1.325	5.20	44.28	421.00	1.144	1.568	1.546
5.00	47.65	169.72	1.045	1.579	1.532	5.20	58.78	594.83	1.613	1.342	1.302
5.00	48.95	533.89	0.884	1.348	1.335	5.20	59.70	518.98	2.109	1.368	1.338
5.00	56.58	382.77	1.403	1.349	1.338	5.23	17.81	617.43	1.289	1.857	1.826
5.00	62.45	584.17	1.099	1.195	1.173	5.27	20.99	316.46	1.998	2.039	1.971
5.00	62.67	240.92	1.099	1.370	1.340	5.27	22.21	316.02	2.237	2.014	1.948
5.00	65.36	303.06	1.121	1.310	1.289	5.27	23.98	297.07	2.175	1.991	1.927
5.00	67.83	344.76	1.222	1.266	1.249	5.27	39.95	257.21	2.048	1.746	1.711
5.00	68.57	288.29	1.058	1.290	1.266	5.28	21.36	336.20	2.098	2.021	1.956
5.00	71.15	220.20	1.191	1.306	1.268	5.28	21.67	550.11	2.160	1.867	1.813
5.00	71.63	365.26	1.289	1.223	1.206	5.28	23.94	297.07	1.907	1.995	1.931
5.00	84.01	318.31	1.099	1.150	1.125	5.28	26.42	452.15	1.629	1.846	1.797
5.00	90.74	200.28	1.058	1.163	1.110	5.28	29.69	332.28	1.723	1.863	1.817
5.00	91.33	396.43	0.992	1.059	1.040	5.28	30.46	241.41	1.806	1.908	1.853
5.00	94.18	133.11	1.072	1.179	1.099	5.28	31.27	340.00	1.766	1.831	1.789
5.00	111.98	353.43	0.987	0.935	0.920	5.28	32.06	379.43	1.660	1.795	1.756
5.01	17.32	188.78	2.233	2.140	2.033	5.28	32.27	365.22	1.833	1.800	1.761
5.01	23.76	237.33	1.833	1.936	1.869	5.28	35.68	349.54	1.709	1.757	1.723
5.01	24.26	208.71	1.837	1.949	1.873	5.28	36.25	602.10	1.403	1.614	1.561
5.01	49.40	242.05	2.113	1.514	1.487	5.28	36.30	301.00	1.569	1.776	1.740
5.09	24.23	467.03	1.708	1.785	1.758	5.28	37.68	450.28	1.763	1.673	1.640
5.10	16.31	468.44	1.953	1.933	1.924	5.28	37.70	316.02	1.422	1.747	1.715
5.10	21.03	471.53	1.489	1.845	1.819	5.28	38.48	569.84	1.959	1.601	1.556

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
5.28	45.05	349.60	1.367	1.634	1.609	5.74	19.46	335.50	2.180	2.210	2.125
5.28	46.60	326.19	1.475	1.628	1.604	5.74	20.44	367.43	2.181	2.171	2.089
5.28	48.72	551.56	1.273	1.495	1.457	5.74	20.44	362.98	2.145	2.174	2.091
5.28	51.83	485.67	1.304	1.495	1.465	5.74	33.69	281.61	1.768	1.981	1.943
5.28	61.29	296.62	1.125	1.500	1.472	5.77	23.38	303.47	2.195	2.156	2.085
5.28	80.45	509.10	1.239	1.267	1.223	5.77	24.25	370.94	1.884	2.103	2.033
5.28	81.90	501.75	1.161	1.261	1.217	5.77	24.37	456.83	1.768	2.056	1.978
5.30	16.57	551.30	1.727	1.963	1.921	5.80	15.19	377.51	2.204	2.293	2.200
5.30	25.11	198.77	1.850	2.049	1.966	5.80	15.84	384.47	1.809	2.274	2.182
5.30	28.67	490.65	1.248	1.793	1.745	5.80	23.92	403.37	2.450	2.100	2.028
5.30	55.48	445.66	1.223	1.489	1.461	5.80	29.19	517.06	1.928	1.956	1.882
5.30	80.26	520.19	1.517	1.275	1.229	5.80	29.58	321.36	1.962	2.042	1.995
5.30	80.67	483.02	0.798	1.288	1.244	5.80	29.71	460.31	1.965	1.973	1.911
5.30	100.81	525.95	0.966	1.156	1.102	5.80	34.66	367.57	1.824	1.942	1.905
5.31	39.73	231.23	2.131	1.781	1.741	5.80	41.24	314.33	1.901	1.880	1.861
5.31	52.91	276.25	1.938	1.601	1.574	5.80	41.50	327.61	2.015	1.871	1.851
5.31	74.44	208.71	1.617	1.460	1.407	5.80	41.51	309.41	1.780	1.879	1.860
5.31	89.24	205.78	1.184	1.367	1.296	5.80	41.53	309.41	1.970	1.879	1.860
5.33	17.40	813.48	1.786	1.779	1.711	5.80	41.54	275.82	2.201	1.895	1.876
5.33	18.39	667.13	2.365	1.866	1.806	5.80	41.62	268.37	1.745	1.898	1.879
5.33	21.33	477.22	1.964	1.944	1.884	5.80	41.79	267.67	1.889	1.896	1.878
5.33	29.18	301.95	1.592	1.910	1.859	5.80	45.47	475.10	1.746	1.764	1.731
5.33	29.49	421.44	1.426	1.833	1.786	5.80	49.33	266.41	1.928	1.815	1.803
5.33	42.14	667.13	1.727	1.536	1.469	5.80	53.35	650.05	1.960	1.627	1.557
5.33	73.46	316.46	1.422	1.423	1.385	5.80	53.73	219.31	2.182	1.797	1.783
5.33	90.25	425.34	1.096	1.272	1.222	5.80	71.28	219.31	1.717	1.669	1.641
5.33	103.23	450.28	1.497	1.191	1.136	5.82	21.79	359.23	2.168	2.170	2.094
5.42	19.09	384.47	1.839	2.086	2.013	5.90	15.16	212.00	2.299	2.424	2.322
5.42	26.07	367.57	1.711	1.959	1.900	5.90	15.28	208.71	2.347	2.424	2.321
5.42	27.76	517.06	1.798	1.844	1.781	5.90	16.54	348.69	2.432	2.306	2.217
5.42	29.31	304.68	2.073	1.939	1.885	5.90	19.26	362.38	2.112	2.240	2.158
5.44	23.99	303.47	2.344	2.047	1.976	5.90	23.77	314.33	2.064	2.175	2.112
5.50	15.11	213.44	1.590	2.334	2.217	5.90	24.68	327.61	2.186	2.151	2.091
5.50	16.26	649.67	1.885	1.992	1.909	5.90	25.31	309.41	2.073	2.148	2.092
5.50	16.33	412.37	2.162	2.153	2.074	5.90	25.50	309.41	2.171	2.145	2.089
5.50	17.20	198.77	1.953	2.293	2.177	5.90	25.70	275.82	2.243	2.159	2.105
5.50	52.73	219.31	2.235	1.709	1.677	5.90	26.31	268.37	2.281	2.151	2.100
5.60	19.55	198.77	2.103	2.261	2.157	5.90	27.30	267.67	2.154	2.134	2.086
5.60	24.58	213.44	1.620	2.141	2.061	5.90	31.43	401.34	1.622	2.001	1.958
5.60	27.36	219.31	2.431	2.083	2.015	5.90	100.12	538.69	1.045	1.448	1.387
5.65	15.48	248.98	2.163	2.335	2.229	5.90	100.80	612.47	1.107	1.423	1.350
5.65	24.30	303.47	2.134	2.105	2.035	5.90	101.59	279.41	1.522	1.535	1.476
5.70	56.94	219.31	1.969	1.739	1.716	5.90	101.94	271.10	1.464	1.537	1.477
5.70	68.02	311.75	2.290	1.615	1.589	5.90	102.16	180.33	1.724	1.576	1.498
5.70	100.31	210.51	1.293	1.494	1.412	5.90	102.54	190.57	1.310	1.570	1.494
5.70	107.90	200.03	1.223	1.467	1.371	5.90	102.65	269.28	1.360	1.535	1.474
5.70	118.67	316.64	1.026	1.376	1.287	5.90	103.07	299.28	1.481	1.522	1.463
5.70	129.89	205.78	1.049	1.382	1.256	5.90	103.07	199.48	1.755	1.564	1.489

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
5.90	103.34	236.84	1.500	1.546	1.479	5.90	124.87	195.38	1.257	1.492	1.378
5.90	103.38	209.36	1.408	1.558	1.485	5.90	125.09	207.39	1.289	1.486	1.375
5.90	103.39	210.17	1.566	1.558	1.485	5.90	125.26	250.00	1.276	1.467	1.367
5.90	104.25	200.98	1.641	1.559	1.482	5.90	125.41	403.17	1.199	1.409	1.328
5.90	104.88	239.33	1.478	1.540	1.470	5.90	125.80	194.14	1.257	1.490	1.374
5.90	105.24	782.59	1.096	1.358	1.246	5.90	126.39	227.97	1.125	1.473	1.366
5.90	105.72	564.07	1.287	1.421	1.351	5.90	126.63	324.38	1.508	1.434	1.344
5.90	106.17	196.88	1.513	1.554	1.473	5.90	127.43	221.31	1.191	1.473	1.362
5.90	107.19	190.00	1.443	1.553	1.469	5.90	128.36	179.84	1.185	1.488	1.364
5.90	107.49	124.27	1.522	1.584	1.478	5.90	128.43	260.75	1.045	1.453	1.350
5.90	107.71	259.21	1.456	1.521	1.450	5.90	128.43	375.85	1.295	1.410	1.323
5.90	108.05	199.59	1.621	1.546	1.462	5.90	130.24	856.38	1.207	1.260	1.132
5.90	108.21	228.84	1.316	1.532	1.455	5.90	130.31	573.04	1.318	1.340	1.253
5.90	108.56	266.77	1.489	1.515	1.444	5.90	132.00	531.85	0.898	1.347	1.261
5.90	109.02	193.00	1.452	1.545	1.458	5.90	133.48	363.56	1.164	1.399	1.306
5.90	110.62	223.71	1.373	1.526	1.444	5.90	137.04	662.78	0.884	1.294	1.197
5.90	110.65	438.13	1.648	1.445	1.380	5.90	139.47	816.90	1.072	1.244	1.127
5.90	112.01	228.92	1.203	1.519	1.435	5.90	139.84	631.27	0.956	1.295	1.200
5.90	112.11	263.82	1.445	1.504	1.427	5.90	139.90	1022.77	1.090	1.190	1.029
5.90	112.88	500.15	0.987	1.417	1.347	5.90	140.03	215.36	0.619	1.437	1.307
5.90	112.88	388.16	1.280	1.455	1.387	5.90	140.79	671.52	1.184	1.280	1.183
5.90	113.32	538.69	1.444	1.403	1.330	5.90	146.96	465.86	1.267	1.325	1.230
5.90	113.58	538.69	1.242	1.402	1.329	5.91	41.37	249.28	1.532	1.939	1.929
5.90	114.44	246.88	1.144	1.504	1.419	5.92	23.75	465.51	1.900	2.106	2.028
5.90	114.98	887.68	1.288	1.297	1.158	5.94	18.85	585.12	2.223	2.145	2.029
5.90	116.07	308.88	1.207	1.473	1.396	5.94	41.75	370.94	2.309	1.888	1.875
5.90	116.08	373.33	1.261	1.449	1.377	5.99	18.32	266.90	2.637	2.334	2.256
5.90	116.10	480.58	1.397	1.413	1.341	5.99	18.39	322.75	2.173	2.301	2.223
5.90	117.28	219.78	1.256	1.506	1.411	5.99	19.11	437.50	2.548	2.226	2.140
5.90	117.69	287.94	1.207	1.476	1.394	5.99	19.12	437.50	2.267	2.225	2.140
5.90	117.77	194.98	1.343	1.515	1.413	5.99	20.35	308.71	2.263	2.267	2.197
5.90	118.29	807.68	1.121	1.309	1.190	5.99	20.37	320.57	2.430	2.260	2.190
5.90	118.80	194.28	1.472	1.512	1.408	5.99	21.41	316.02	2.524	2.241	2.176
5.90	119.96	160.67	1.227	1.524	1.407	5.99	21.51	297.07	2.331	2.249	2.185
5.90	120.59	217.83	1.454	1.496	1.395	5.99	22.40	267.35	2.546	2.247	2.187
5.90	121.41	259.43	1.207	1.476	1.383	5.99	22.50	550.11	2.378	2.108	2.011
5.90	121.71	433.88	1.239	1.410	1.334	5.99	22.57	235.00	2.418	2.261	2.201
5.90	121.95	218.50	1.335	1.491	1.388	5.99	23.40	1222.52	1.797	1.825	1.450
5.90	122.02	202.95	1.273	1.498	1.391	5.99	24.61	302.73	2.439	2.186	2.134
5.90	122.09	440.21	1.354	1.407	1.330	5.99	25.11	384.44	1.946	2.137	2.080
5.90	122.52	167.18	1.558	1.513	1.394	5.99	25.81	269.29	1.891	2.180	2.134
5.90	122.79	226.38	1.347	1.485	1.383	5.99	25.91	545.66	2.195	2.051	1.966
5.90	122.96	909.09	0.884	1.268	1.125	5.99	25.95	277.98	1.947	2.173	2.128
5.90	123.80	205.11	1.379	1.491	1.382	5.99	26.14	277.98	2.089	2.170	2.125
5.90	123.96	229.21	1.629	1.480	1.377	5.99	26.30	160.58	2.160	2.231	2.179
5.90	124.18	212.39	1.454	1.487	1.379	5.99	26.31	311.86	1.906	2.150	2.105
5.90	124.60	188.98	1.385	1.496	1.381	5.99	26.71	393.67	2.031	2.104	2.052
5.90	124.73	573.04	1.049	1.357	1.272	5.99	26.91	400.44	2.496	2.098	2.045

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
5.99	27.94	255.00	1.876	2.150	2.112	6.06	52.26	274.98	1.903	1.853	1.869
5.99	28.00	321.91	1.887	2.116	2.076	6.19	15.96	527.92	2.644	2.292	2.194
5.99	28.37	326.47	2.377	2.107	2.069	6.19	17.64	408.93	1.931	2.314	2.243
5.99	29.09	355.81	2.219	2.082	2.043	6.19	18.30	537.16	2.038	2.242	2.146
5.99	29.42	345.72	1.621	2.081	2.044	6.19	18.30	537.16	2.037	2.242	2.146
5.99	29.85	305.14	1.840	2.093	2.061	6.19	23.23	462.24	2.127	2.182	2.120
5.99	30.33	320.93	2.483	2.078	2.046	6.19	24.48	239.69	1.647	2.260	2.231
5.99	30.40	282.00	1.906	2.095	2.066	6.19	26.42	215.54	2.040	2.237	2.216
5.99	31.59	508.08	2.348	1.978	1.920	6.19	27.15	335.50	1.746	2.167	2.144
5.99	31.80	323.76	2.241	2.054	2.027	6.19	30.76	198.77	1.993	2.172	2.167
5.99	32.11	740.05	1.615	1.882	1.753	6.19	31.34	367.57	1.516	2.086	2.074
5.99	32.13	318.16	2.158	2.051	2.026	6.19	31.88	543.63	2.021	2.010	1.959
5.99	32.36	569.84	2.088	1.942	1.870	6.19	31.88	543.63	1.986	2.010	1.959
5.99	32.56	297.71	2.094	2.054	2.031	6.19	39.08	288.62	2.230	2.014	2.031
5.99	32.80	385.87	1.712	2.011	1.980	6.19	45.47	713.59	1.923	1.792	1.718
5.99	34.10	230.00	1.939	2.064	2.046	6.19	51.68	219.80	1.683	1.912	1.945
5.99	35.04	367.54	2.037	1.987	1.965	6.19	53.89	116.35	1.883	1.943	1.962
5.99	36.69	270.54	1.948	2.008	1.997	6.19	63.16	262.05	1.900	1.807	1.838
5.99	38.04	280.86	2.280	1.985	1.977	6.19	63.34	493.50	1.257	1.721	1.727
5.99	38.70	191.06	1.860	2.020	2.011	6.19	70.93	190.14	1.823	1.790	1.809
5.99	39.70	508.83	1.445	1.870	1.833	6.20	17.79	649.67	1.867	2.205	2.076
5.99	40.96	390.18	1.873	1.902	1.890	6.20	20.38	382.00	2.006	2.273	2.217
5.99	42.16	315.52	1.776	1.920	1.917	6.20	22.68	574.88	2.134	2.147	2.055
5.99	44.88	325.60	2.297	1.885	1.886	6.20	28.69	476.62	1.503	2.085	2.043
5.99	45.98	267.49	2.226	1.899	1.903	6.20	41.73	561.04	1.767	1.882	1.854
5.99	46.43	578.11	1.933	1.773	1.728	6.20	43.50	356.39	1.648	1.937	1.957
5.99	49.18	269.14	1.873	1.866	1.873	6.20	43.51	428.57	1.787	1.910	1.918
5.99	52.76	403.72	1.678	1.779	1.777	6.20	64.36	496.46	1.495	1.716	1.722
5.99	54.58	389.95	1.869	1.769	1.769	6.32	55.96	308.39	2.433	1.868	1.919
5.99	55.93	285.93	2.018	1.800	1.808	6.32	56.71	314.33	2.356	1.860	1.911
5.99	56.48	375.22	1.858	1.759	1.762	6.32	57.66	327.61	2.489	1.848	1.897
5.99	56.97	327.44	1.757	1.775	1.781	6.32	58.48	309.41	2.344	1.849	1.900
5.99	60.35	436.53	1.729	1.708	1.701	6.32	58.69	309.41	2.455	1.847	1.898
5.99	61.54	349.54	1.805	1.732	1.735	6.32	58.88	275.82	2.400	1.859	1.911
5.99	62.56	421.05	1.688	1.698	1.693	6.32	59.64	268.37	2.362	1.856	1.909
5.99	65.32	339.14	1.931	1.711	1.713	6.32	60.77	267.67	2.283	1.849	1.901
5.99	69.59	425.34	1.668	1.653	1.644	6.33	18.53	242.05	2.246	2.403	2.366
5.99	70.04	450.28	1.978	1.642	1.629	6.33	39.10	259.59	2.079	2.054	2.092
5.99	72.62	341.58	1.819	1.667	1.662	6.36	23.78	274.73	2.555	2.286	2.276
5.99	81.74	275.12	1.956	1.647	1.630	6.36	24.83	381.27	2.459	2.221	2.201
5.99	102.88	328.09	1.674	1.542	1.495	6.36	25.98	648.09	2.336	2.101	2.009
5.99	102.88	328.09	1.674	1.542	1.495	6.36	26.20	384.26	2.358	2.196	2.181
6.00	73.35	493.50	1.781	1.612	1.590	6.36	27.10	541.73	2.059	2.121	2.070
6.06	16.55	659.09	2.260	2.185	2.050	6.36	27.72	284.21	2.084	2.212	2.218
6.06	27.21	425.17	2.330	2.098	2.049	6.36	27.96	265.21	2.189	2.217	2.225
6.06	38.22	680.37	2.178	1.845	1.758	6.36	28.00	307.59	2.352	2.197	2.202
6.06	42.17	360.45	2.108	1.918	1.919	6.36	28.11	246.07	2.570	2.223	2.232
6.06	51.91	530.89	2.145	1.759	1.738	6.36	28.58	308.84	2.240	2.187	2.194

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
6.36	28.72	450.61	2.068	2.129	2.110	6.46	117.32	332.28	1.802	1.632	1.624
6.36	29.01	438.74	2.065	2.129	2.114	6.46	121.75	452.15	1.602	1.584	1.570
6.36	29.91	297.46	2.225	2.171	2.184	6.46	121.75	452.15	1.602	1.584	1.570
6.36	30.30	492.43	1.981	2.089	2.065	6.46	125.54	382.07	1.871	1.597	1.578
6.36	30.34	372.73	2.172	2.134	2.137	6.46	125.54	382.07	1.871	1.597	1.578
6.36	30.43	372.26	1.846	2.132	2.137	6.46	129.61	324.50	1.989	1.608	1.578
6.36	30.91	308.87	2.220	2.151	2.166	6.46	129.61	324.50	1.989	1.608	1.578
6.36	31.64	266.65	1.894	2.158	2.179	6.46	140.22	379.00	1.569	1.569	1.527
6.36	31.85	360.92	2.032	2.116	2.127	6.46	140.22	379.00	1.569	1.569	1.527
6.36	32.81	565.08	2.256	2.027	1.990	6.46	144.92	326.19	1.557	1.577	1.522
6.36	33.28	386.19	1.831	2.085	2.096	6.46	144.92	326.19	1.557	1.577	1.522
6.36	33.42	220.75	2.133	2.152	2.181	6.46	147.68	257.21	1.691	1.596	1.524
6.36	35.04	214.43	2.131	2.132	2.166	6.46	147.68	257.21	1.691	1.596	1.524
6.36	35.29	566.33	2.028	1.994	1.964	6.50	26.72	219.31	2.407	2.281	2.306
6.36	35.93	290.50	2.041	2.087	2.120	6.50	33.32	249.28	2.034	2.165	2.213
6.36	36.14	211.74	2.325	2.118	2.155	6.50	49.13	496.46	1.612	1.896	1.935
6.36	37.92	294.26	2.245	2.060	2.097	6.50	56.88	213.44	1.894	1.934	2.014
6.36	38.10	510.92	2.257	1.977	1.973	6.50	80.37	352.05	1.922	1.749	1.807
6.36	39.94	392.24	1.961	1.998	2.026	6.50	91.54	671.52	1.443	1.612	1.603
6.36	40.01	397.36	1.796	1.995	2.022	6.50	93.17	308.39	1.606	1.716	1.756
6.36	40.13	421.20	2.041	1.985	2.008	6.50	94.00	314.33	1.549	1.711	1.750
6.36	41.04	178.27	2.249	2.073	2.118	6.50	94.58	308.39	1.559	1.711	1.749
6.36	41.99	522.74	1.647	1.929	1.930	6.50	95.42	309.41	1.623	1.708	1.745
6.36	42.72	441.37	1.954	1.949	1.972	6.50	95.57	309.41	1.589	1.708	1.744
6.36	42.76	326.64	2.099	1.990	2.034	6.50	95.72	275.82	1.628	1.719	1.754
6.36	43.83	173.02	2.189	2.044	2.093	6.50	96.28	268.37	1.633	1.720	1.754
6.36	44.82	230.57	2.103	2.008	2.061	6.50	97.16	267.67	1.582	1.718	1.749
6.36	45.49	410.40	2.259	1.931	1.966	6.50	102.05	356.39	1.700	1.672	1.698
6.36	46.73	283.38	1.925	1.966	2.020	6.53	15.19	471.53	2.353	2.399	2.344
6.36	47.04	232.44	1.962	1.984	2.040	6.53	17.94	196.88	2.263	2.466	2.457
6.36	47.88	236.59	2.281	1.974	2.031	6.53	19.76	237.33	2.284	2.408	2.406
6.36	49.40	251.57	2.205	1.954	2.011	6.53	21.98	249.92	2.253	2.358	2.366
6.36	50.98	256.82	2.147	1.937	1.996	6.53	22.03	242.05	2.617	2.360	2.369
6.36	55.05	359.03	1.800	1.865	1.916	6.53	23.17	205.78	2.171	2.356	2.370
6.40	44.52	219.31	2.216	2.023	2.082	6.53	24.61	362.38	2.354	2.262	2.267
6.46	104.03	318.00	1.962	1.671	1.686	6.53	30.33	316.64	1.850	2.186	2.221
6.46	104.03	318.00	1.962	1.671	1.686	6.53	31.92	242.05	2.308	2.193	2.241
6.46	107.18	339.60	1.835	1.655	1.665	6.53	35.64	212.00	2.105	2.154	2.214
6.46	107.18	339.60	1.835	1.655	1.665	6.53	49.10	336.49	2.229	1.956	2.031
6.46	111.27	370.60	1.796	1.634	1.638	6.54	17.03	208.71	2.251	2.481	2.470
6.46	111.27	370.60	1.796	1.634	1.638	6.54	18.20	192.05	2.636	2.464	2.457
6.46	113.58	265.16	2.052	1.665	1.658	6.54	18.48	266.01	2.246	2.422	2.415
6.46	113.58	265.16	2.052	1.665	1.658	6.54	22.25	316.64	2.376	2.325	2.329
6.46	114.94	365.22	1.876	1.627	1.625	6.54	23.85	179.00	2.430	2.357	2.376
6.46	114.94	365.22	1.876	1.627	1.625	6.54	25.88	191.14	2.235	2.315	2.343
6.46	115.57	296.62	1.734	1.649	1.641	6.54	27.00	205.78	2.498	2.288	2.321
6.46	115.57	296.62	1.734	1.649	1.641	6.60	16.09	551.30	2.563	2.361	2.292
6.46	117.32	332.28	1.802	1.632	1.624	6.60	91.15	219.31	1.865	1.775	1.830

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
6.61	16.60	138.76	2.365	2.536	2.529	6.69	107.20	312.98	2.009	1.712	1.755
6.61	17.22	670.84	2.338	2.296	2.187	6.69	108.18	296.97	2.100	1.715	1.756
6.61	19.33	450.28	2.617	2.338	2.310	6.69	144.62	290.93	1.888	1.645	1.615
6.61	19.45	600.06	2.393	2.280	2.205	6.69	147.47	306.76	2.099	1.635	1.603
6.61	21.50	969.07	2.346	2.124	1.885	6.70	65.67	463.92	1.606	1.824	1.905
6.61	22.23	425.34	2.269	2.293	2.284	6.77	23.99	343.53	2.415	2.315	2.352
6.61	22.77	316.46	2.466	2.326	2.341	6.80	121.00	213.44	1.785	1.736	1.754
6.61	24.16	452.86	2.266	2.248	2.240	6.88	79.59	324.20	1.620	1.828	1.940
6.61	24.69	389.00	2.333	2.263	2.273	6.88	80.00	324.20	1.494	1.827	1.938
6.61	25.47	415.13	2.156	2.239	2.247	6.88	82.60	279.97	1.755	1.831	1.940
6.61	25.58	634.33	2.119	2.162	2.099	6.88	83.00	279.97	2.024	1.829	1.938
6.61	30.70	667.13	2.423	2.074	2.019	6.88	84.80	279.97	1.809	1.823	1.928
6.61	35.54	529.09	2.229	2.052	2.064	6.88	87.69	375.38	1.850	1.781	1.878
6.61	39.45	298.68	2.162	2.084	2.159	6.88	100.22	445.66	1.712	1.722	1.794
6.61	43.95	308.35	2.118	2.030	2.113	6.88	100.22	445.66	1.833	1.722	1.794
6.61	52.64	421.44	1.962	1.911	1.986	6.90	17.51	496.46	2.095	2.398	2.379
6.61	55.20	280.56	1.685	1.939	2.035	6.90	44.62	356.39	1.800	2.052	2.162
6.61	58.99	217.92	1.605	1.936	2.033	6.90	51.74	496.46	1.764	1.944	2.030
6.61	59.52	394.18	1.514	1.868	1.951	6.90	52.93	612.78	1.637	1.902	1.952
6.61	61.64	486.00	1.847	1.825	1.890	6.90	59.63	593.35	1.865	1.858	1.923
6.61	61.72	487.23	1.983	1.824	1.889	6.90	119.64	609.00	2.029	1.637	1.664
6.61	61.75	669.48	1.749	1.772	1.783	6.93	17.92	663.31	2.319	2.340	2.259
6.61	61.79	235.00	1.993	1.910	2.006	6.93	19.90	488.77	1.996	2.359	2.354
6.61	68.38	347.67	1.607	1.829	1.916	6.93	40.85	449.64	2.182	2.066	2.149
6.61	68.84	248.98	1.566	1.862	1.953	6.93	52.39	517.06	2.054	1.937	2.021
6.61	89.37	813.48	1.390	1.608	1.570	6.93	52.53	271.06	2.335	2.014	2.147
6.61	92.25	477.22	1.557	1.687	1.733	6.93	117.02	418.07	2.275	1.699	1.752
6.61	96.81	301.95	1.688	1.729	1.780	7.01	15.97	457.06	2.205	2.457	2.453
6.61	108.01	459.37	1.731	1.648	1.675	7.01	16.54	355.18	2.632	2.482	2.508
6.61	108.56	443.85	1.168	1.651	1.679	7.01	16.64	387.95	2.656	2.468	2.486
6.61	109.01	441.25	1.099	1.651	1.678	7.20	76.06	311.75	2.195	1.892	2.023
6.61	111.37	385.69	1.221	1.662	1.688	7.20	76.06	311.75	2.317	1.892	2.023
6.61	111.88	241.41	0.987	1.710	1.727	7.20	76.06	311.75	2.330	1.892	2.023
6.61	124.38	322.42	1.385	1.654	1.655	7.28	17.36	396.41	2.434	2.479	2.500
6.61	124.79	442.88	1.306	1.615	1.619	7.28	19.74	352.98	2.695	2.448	2.490
6.61	130.00	591.00	1.058	1.564	1.550	7.28	117.50	384.44	1.896	1.758	1.816
6.61	139.14	328.09	1.740	1.624	1.599	7.28	121.80	367.54	1.854	1.756	1.805
6.63	45.12	213.44	2.153	2.058	2.152	7.28	122.61	362.31	1.860	1.756	1.804
6.63	129.11	442.88	1.787	1.611	1.611	7.28	126.33	459.14	1.542	1.723	1.761
6.69	15.11	1222.52	2.269	2.166	1.768	7.28	128.06	324.79	1.906	1.758	1.794
6.69	15.53	277.98	2.522	2.499	2.500	7.28	131.92	544.68	1.633	1.692	1.715
6.69	15.87	581.93	2.281	2.369	2.297	7.28	132.08	339.52	1.731	1.748	1.776
6.69	16.92	341.58	2.536	2.442	2.439	7.28	132.32	334.69	1.814	1.749	1.776
6.69	17.81	411.55	2.421	2.395	2.381	7.28	132.94	416.93	1.664	1.724	1.753
6.69	17.82	347.70	2.447	2.421	2.420	7.28	135.22	367.53	1.842	1.735	1.759
6.69	19.10	550.11	2.474	2.318	2.268	7.28	135.88	290.63	1.745	1.757	1.773
6.69	19.73	316.46	2.621	2.395	2.408	7.28	136.29	337.00	1.824	1.742	1.762
6.69	103.04	336.92	1.878	1.714	1.766	7.28	136.72	303.09	1.761	1.752	1.768

			log(PGA) (cm/s ²)						log(PGA) (cm/s ²)		
M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method	M	R	V	Actual	GEP Method	GMDH Method
7.28	137.25	330.50	1.597	1.743	1.760	7.30	56.18	275.82	2.277	2.031	2.170
7.28	137.44	322.75	1.781	1.745	1.761	7.30	56.87	268.37	2.259	2.029	2.168
7.28	141.92	401.37	1.781	1.716	1.729	7.30	56.94	320.11	2.266	2.011	2.145
7.28	143.12	338.27	1.773	1.733	1.739	7.30	57.13	285.09	2.454	2.021	2.159
7.28	144.90	269.29	1.801	1.752	1.746	7.30	57.90	267.67	2.324	2.021	2.161
7.28	146.89	270.54	1.966	1.750	1.739	7.30	58.00	303.36	2.318	2.009	2.145
7.28	148.07	371.07	1.894	1.717	1.717	7.35	24.07	324.57	2.125	2.388	2.448
7.30	51.35	671.52	2.285	1.958	1.984	7.35	89.76	302.64	2.139	1.860	1.963
7.30	53.31	308.39	2.387	2.042	2.176	7.35	119.77	377.56	2.045	1.765	1.812
7.30	53.99	293.46	2.399	2.042	2.178	7.36	38.42	385.43	2.372	2.169	2.259
7.30	54.17	314.33	2.344	2.034	2.167	7.36	81.30	514.99	2.195	1.832	1.914
7.30	54.80	357.43	2.328	2.015	2.142	7.36	114.62	316.46	1.852	1.794	1.849
7.30	55.11	327.61	2.341	2.022	2.154	7.36	122.65	415.13	1.846	1.751	1.790
7.30	55.18	288.24	2.309	2.034	2.171	7.50	126.03	341.56	2.112	1.782	1.793
7.30	55.82	309.41	2.223	2.023	2.157	7.50	141.37	585.09	2.119	1.697	1.672
7.30	56.01	309.41	2.283	2.021	2.156	7.50	145.06	399.61	1.884	1.740	1.716



1. Satake, K. and B.F. Atwater, *Long-term perspectives on giant earthquakes and tsunamis at subduction zones*. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2007. **35**: p. 349-374.
2. Kramer, S., L., (1996). " *Geotechnical Earthquake Engineering* Prentice Hall. Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
3. Somerville, P. and R. Graves, *Characterization of earthquake strong ground motion*, in *Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions*. 2003, Springer. p. 1811-1828.
4. McGuire, R.K., *Seismic hazard and risk analysis*. 2004: Earthquake Engineering Research Institute.
۵. غلامرضا قدرتی، غلامرضا؛ شامخی امیری، محمد "ارائه ی روابط کاهندگی برای بیشینه ی شتاب افقی و قائم جنبش های نیرومند زمین در فلات ایران با استفاده از الگوریتم توسعه ی ژنی" مهندسی عمران شریف، ۱۳۹۳.
6. Neumann, F., *Earthquake intensity and related ground motion*. 1954: University of Washington Press Seattle, Washington.
7. Milne, W. and A.G. Davenport, *Distribution of earthquake risk in Canada*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1969. **59**(2): p. 729-754.
8. Esteva, L., *SEISMIC RISK AND SEISMIC DESIGN DECISIONS*. 1970, Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge. Univ. of Mexico, Mexico City.
9. Denham, D. and R. Small, *Strong motion data centre: Bureau of Mineral Resources, Canberra*. Bull. New Zealand Soc. for Earthq. Eng, 1971. **4**.
10. Donovan, N. *A statistical evaluation of strong motion data including the Feb. 9 1971, San Fernando earthquake*. in *Proc. 5th World Conf. on Earthq. Eng.*, Rome. 1973.
11. Esteva, L. and R. Villaverde. *Seismic risk, design spectra and structural reliability*. in *Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering*. 1973.
12. Orphal, D. and J. Lahoud, *Prediction of peak ground motion from earthquakes*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1974. **64**(5): p. 1563-1574.

13. Trifunac, M., *Preliminary analysis of the peaks of strong earthquake ground motion—dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976. 66(1): p. 189-219.
14. Espinosa, A., *Attenuation of strong horizontal ground accelerations in the western United States and their relation to ML*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1980. 70(2): p. 583-616.
15. Battis, J., *Regional modification of acceleration attenuation functions*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981. 71(4): p. 1309-1321.
16. Campbell, K.W., *Near-source attenuation of peak horizontal acceleration*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981. 71(6): p. 2039-2070.
17. Boore, D.M. and W.B. Joyner, *The empirical prediction of ground motion*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982. 72(6B): p. S43-S60.
18. Sabetta, F. and A. Pugliese, *Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987. 77(5): p. 1491-1513.
19. Petrovski, D. and A. Marcellini. *Prediction of seismic movement of a site*. in *Proceeding of International Seminar on predict of earthquakes* 1988. Lisbon, Portugal.
20. Atkinson, G.M. and D.M. Boore, *Recent trends in ground motion and spectral response relations for North America*. Earthquake Spectra, 1990. 6(1): p. 15-35.
21. Tamura, K., Y. Sasaki, and K. Aizawa. *Attenuation characteristics of ground motions in the period range of 2 to 20 seconds—for application to the seismic design of long-period structures*. in *of: Proceedings of the Fourth US National Conference on Earthquake Engineering*. 1990.
22. Theodulidis, N. and B. Papazachos, *Dependence of strong ground motion on magnitude-distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992. 11(7): p. 387-402.
23. Tento, A., L. Franceschina, and A. Marcellini. *Expected ground motion evaluation for Italian sites*. in *Proceedings 10th World Conf. on Earthquake Engineering, Spain*. 1992.

24. Sadigh, K., et al. *Specification of long-period ground motions: updated attenuation relationships for rock site conditions and adjustment factors for near-fault effects*. in *Proc. ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*. 1993.
25. Boore, D.M., W.B. Joyner, and T.E. Fumal, *Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an interim report*. 1993.
26. Sarma, S. and M. Free. *The comparison of attenuation relationships for peak horizontal acceleration in intraplate regions*. in *Procs. of the Fifth Pacific Conference on Earthquake Engineering*. 1995.
27. Ambraseys, N.u. and K. Simpson, *Prediction of vertical response spectra in Europe*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1996. 25(4): p. 401-412.
28. Abrahamson, N.A. and W.J. Silva, *Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes*. *Seismological Research Letters*, 1997. 68(1): p. 94-127.
29. Boore, D.M., W.B. Joyner, and T.E. Fumal, *Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work*. *Seismological research letters*, 1997. 68(1): p. 128-153.
30. Spudich, P., et al., *SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999. 89(5): p. 1156-1170.
31. Ambraseys, N. and J. Douglas, *Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response, engineering seismology and earthquake engineering, esee report no. 00-4*. Department of Civil Engineering and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2000.
32. Khademi, M. *Attenuation of peak and spectral accelerations in the Persian plateau*. in *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering, London, UK, Paper*. 2002.
33. Fukushima, Y., et al., *Attenuation relation for West Eurasia determined with recent near-fault records from California, Japan and Turkey*. *Journal of Earthquake Engineering*, 2003. 7(04): p. 573-598.
34. Özbey, C., et al., *An empirical attenuation relationship for northwestern Turkey ground motion using a random effects approach*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004. 24(2): p. 115-125.

35. Megawati, K., T.-C. Pan, and K. Koketsu, *Response spectral attenuation relationships for Sumatran-subduction earthquakes and the seismic hazard implications to Singapore and Kuala Lumpur*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005. **25**(1): p. 11-25.
 36. Amiri, G.G., A. Mahdavian, and F.M. Dana, *Attenuation relationships for Iran*. Journal of Earthquake Engineering, 2007. **11**(4): p. 469-492.
 37. Mandal, P., et al., *Ground-motion attenuation relation from strong-motion records of the 2001 Mw 7.7 Bhuj earthquake sequence (2001–2006), Gujarat, India*. Pure and applied geophysics, 2009. **166**(3): p. 451-469.
 38. Ornthammarath, T., et al. *Assessment of strong ground motion variability in Iceland*. in *Proceedings of Fourteenth European Conference on Earthquake Engineering*. 2010.
 39. Alavi, A.H., et al., *New ground-motion prediction equations using multi expression programing*. Journal of Earthquake Engineering, 2011. **15**(4): p. 511-536.
 40. Convertito, V., et al., *From induced seismicity to direct time-dependent seismic hazard*. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012. **102**(6): p. 2563-2573.
 41. Graizer, V. *Extending and testing Graizer-Kalkan ground motion attenuation model based on Atlas database of shallow crustal events*. in *Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. 2010.
 42. Graizer, V., E. Kalkan, and K.-W. Lin, *Global ground motion prediction equation for shallow crustal regions*. Earthquake spectra, 2013. **29**(3): p. 777-791.
 43. Vacareanu, R., et al., *Analysis of soil factor S using strong ground motions from Vrancea subcrustal seismic source*. Rom Rep Phys, 2014. **66**(3): p. 893-906.
۴۴. شامخی امیری، محمد؛ "ارائه مدل های کاهندگی لرزه ای با استفاده از الگوریتم توسعه ژنی"
دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲۰۱۴.
45. Kühn, N.M. and F. Scherbaum, *Ground-motion prediction model building: a multilevel approach*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015. **13**(9): p. 2481-2491.
 46. Zuccolo, E., F. Bozzoni, and C.G. Lai, *Regional Low-Magnitude GMPE to Estimate Spectral Accelerations for Earthquake Early Warning Applications in Southern Italy*. Seismological Research Letters, 2017. **88**(1): p. 61-71.

47. Kumar, A., et al., *Empirical attenuation relationship for peak ground horizontal acceleration for North-East Himalaya*. Vietnam Journal of Earth Sciences, 2017. 39(1): p. 47-57.
48. Wen, R., et al., *Single-Station Standard Deviation Using Strong-Motion Data from Sichuan Region, China*. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018. 108(4): p. 2237-2247.
49. Javan-emrooz, H., M. Eskandari-Ghadi, and N. Mirzaei, *Prediction equations for horizontal and vertical PGA, PGV, and PGD in northern Iran using prefix gene expression programming*. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018. 108(4): p. 2305-2332.
50. Ferreira, C., *Gene expression programming: mathematical modeling by an artificial intelligence*. Vol. 21. 2006: Springer.
51. Ferreira, C., *Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems*. arXiv preprint cs/0102027, 2001.
52. Mahdavian, A. *Empirical evaluation of attenuation relations of peak ground acceleration in the Zagros and central Iran*. in *Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC)*. 2006.
53. Amanifard, N., et al., *Modelling of multiple short-length-scale stall cells in an axial compressor using evolved GMDH neural networks*. Energy Conversion and Management, 2008. 49(10): p. 2588-2594.
54. Hwang, H.S., *Fuzzy GMDH-type neural network model and its application to forecasting of mobile communication*. Computers & Industrial Engineering, 2006. 50(4): p. 450-457.
55. Ivakhnenko, A.G., *Polynomial theory of complex systems*. IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1971(4): p. 364-378.
56. Farlow, S.J., *Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms*. Vol. 54. 1984: CrC Press.
57. Pachepsky, Y., et al., *Use of soil penetration resistance and group method of data handling to improve soil water retention estimates*. Soil and Tillage Research, 1998. 49(1-2): p. 117-126.

58. Ebtehaj, I., et al., *GMDH-type neural network approach for modeling the discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2015. **18**(4): p. 746-757.
 59. Iba, H., H. deGaris, and T. Sato, *A numerical approach to genetic programming for system identification*. Evolutionary computation, 1995. **3**(4): p. 417-452.
 60. Nariman-Zadeh, N., et al., *Evolutionary design of generalized polynomial neural networks for modelling and prediction of explosive forming process*. Journal of Materials Processing Technology, 2005. **164**: p. 1561-1571.
۶۱. نشریه ۱۳۴، تاریخچه مدل های کاهندگی و معیارهایی برای انتخاب مدل مناسب استاندارد مهندسی آب، ۱۳۷۹، وزارت نیرو.
62. GHODRATI, A.G., et al., *Appropriate frequency band for correcting Iranian accelerograms in different site conditions*. 2004.
 63. Alavi, A.H. and A.H. Gandomi, *Prediction of principal ground-motion parameters using a hybrid method coupling artificial neural networks and simulated annealing*. Computers & Structures, 2011. **89**(23-24): p. 2176-2194.

Abstract:

Earthquake is one of the natural disasters that has always influenced human life. Although it is impossible to prevent earthquakes or to predict the precise time of its occurrence, by designing earthquake resistant structures, the amount of financial damages and casualties can be reduced to some extent. Of course, this resistant design requires the use of seismic hazard analysis science, which will be possible by estimating the parameters of strong ground motion, such as acceleration, velocity and displacement in any area. It should be noted that estimating the parameters of strong ground motion will not be possible unless through obtaining the appropriate attenuation relationship. In this paper the effort is on estimating an appropriate attenuation relationship to estimate the horizontal component of Peak Ground Acceleration (PGAH) possible occurrence in each region by using the two methods of Gene Expression Programming (GEP) and Group Method of Data Handling (GMDH) with high approximation and finally the two methods are compared. To achieve this goal, an up-to-date and extensive catalog consisting of 1185 records of earthquakes occurred around the world has been prepared and the parameters of magnitude, hypo central distance and shear wave velocity of these earthquakes have been used to obtain an attenuation relationship. Finally, the fitness function is calculated using the root mean square error (RMSE), which is obtained 765.55 from 1000 in the Gene Expression Programming (GEP) method and 766.6 from 1000 in the Group Method of Data Handling (GMDH) method showing the high proportion of the obtained values from the final attenuation relation with measured values from the previous earthquakes in both of methods.

Generally, some strength points of this study are:

First of all, the widespread being of statistical population and addition of records in recent years to earthquake catalogue leads to more precise attenuation relation.

Secondly, using the Gene Expression Programming (GEP) and Group Method of Data Handling (GMDH) and comparing results.

Keywords: Attenuation relationship, horizontal component of Peak Ground Acceleration (PGAH), Gene Expression Programming (GEP), Group Method of Data Handling (GMDH)



Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Civil Engineering

**Presentation of new global models of attenuation
relationship for horizontal component of Peak Ground
Acceleration**

By:

Mehrasa Ajam

Supervisors:

Dr. Mohammad Shamekhi Amiri

Dr. Hossein Pahlavan

October 2020