

استنتاج معادلات جدید برای تخمین بیشینه شتاب و سرعت زمین ناشی از زلزله*

علی درخشانی^(۱)علی صابری^(۲)

چکیده در این پژوهش یک روش نوین موسوم به M5، برای به دست آوردن معادلات پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین مورد استفاده قرار گرفت. بیشینه شتاب زمین و بیشینه سرعت زمین با استفاده از بزرگی زمین‌لرزه، فاصله منبع تا سایت، متوسط سرعت موج برشی و مکانیسم گسلش و نیز بهره‌گیری از پایگاه داده‌های گسترده پژوهشگاه مهندسی زمین‌لرزه (PEER) فرمول‌بندی شدند. برای اعتبارسنجی، مدل حاصل با مدل‌های شناخته شده مقایسه گردید. تحلیل حساسیت و آنالیز پارامتریک برای تعیین اهمیت پارامترهای مؤثر بر مدل و حساسیت آن به تغییرات پارامترها انجام شد. معادلات پیشنهادی بسیار آسان است و می‌توان آنها را با اطمینان برای اهداف پیش‌طراحی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی حرکات نیرومند زمین، معادلات پیش‌بینی، مدل درختی M5، ارزیابی خطر لرزه‌ای.

Derivation of New Equations for Estimation of Earthquake Induced Peak Ground Acceleration and Velocity

A. Derakhshani

A. Saberi

Abstract In this study, a new method called M5, was employed to derive ground-motion prediction equations (GMPEs). Peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) was formulated by seismic parameters including earthquake magnitude, earthquake source to site distance, average shear-wave velocity and faulting mechanisms with The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) database. For verification, the proposed model was compared with three well-known models by Correlation Coefficient, Root Mean Square Error and Mean Absolute Error. A sensitivity analysis and a parametric analysis was carried out to determine the contributions of the parameters affecting model and sensitivity of the models to the variations of the influencing parameters. The equations are remarkably simple and can reliably be used for pre-design purposes.

Key Words Strong Ground Motion Parameters, Prediction Equations, M5 Model Tree, Earthquake Risk Assessment.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۷/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران.

Email: adera@shahed.ac.ir

(۲) دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران مرکزی.

مقدمه

زمین لرزه به عنوان یک رویداد غیر قابل پیش بینی، همواره بشر را در معرض خطرات و صدمات جانی و مالی قرار داده است. از این رو خطرات و عواقب ناشی از زمین لرزه ناگزیر اما کاهش اثرات منفی آن امکان پذیر است، که این مهم، نیازمند برآورد خطر زمین لرزه به ویژه در نواحی لرزه خیز است. از جمله مهم ترین بخش های مطالعات ارزیابی خطر زمین لرزه برای یک ساخت گاه، پیش بینی پارامترهای جنبش نیرومند زمین است که به وسیله روابط موسوم به روابط کاهندگی یا روابط پیش بینی حرکات نیرومند زمین (Ground Motion Prediction Equations) صورت می گیرد که گزینش مناسب ترین و کاراترین روابط کاهندگی، یکی از مهم ترین اهداف محققان در تحلیل خطر لرزه ای یک منطقه به عنوان یکی از اصلی ترین اجزای تحلیل خطر لرزه ای و یکی از مراحل بنیادی در طراحی سازه های مقاوم در برابر زمین لرزه است. پارامترهای مهندسی یک زمین لرزه را می توان به دو رده اصلی پارامترهای مربوط به حوزه زمان مانند بیشینه شتاب زمین (Peak Ground Acceleration) و بیشینه سرعت زمین (Peak Ground Velocity) و نیز پارامترهای مربوط به حوزه پاسخ مانند شتاب شبه طیفی (Pseudo Spectral Acceleration) تقسیم نمود که می توان برای ارزیابی ریسک سازه ها از آنها بهره برد. با وجود این که پارامترهای طیفی کارآمدتر از پارامترهای حوزه زمان هستند [1]، به دلیل مستقل بودن پارامترهای حوزه زمان به کارگیری آنها آسان تر است؛ بنابراین در پژوهش های خطر لرزه ای PGA و PGV بیشتر مورد استفاده قرار گرفته اند. به منظور برآورد این عناصر می توان از روش های مختلفی مانند بررسی درجا و یا مدل سازی فیزیکی استفاده نمود که معمولاً بسیار گسترده، توان فرسا و پرهزینه است [2]، لذا معادلات پیش بینی حرکات زمین (GMPEs) نقش برجسته ای در آنالیز خطر لرزه ای بازی می کنند. PGA

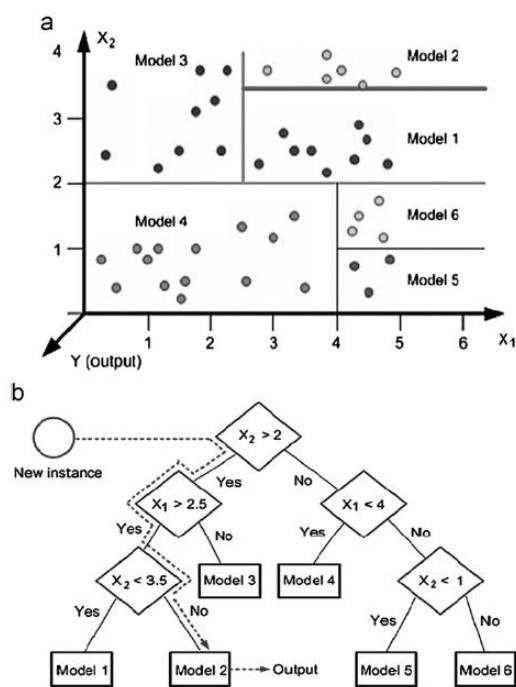
و PGV پارامترهای حوزه زمان حرکات زمین هستند که به طور متداول مورد استفاده قرار گرفته اند. شاخص ترین جنبه های لرزه شناسی که پارامترهای حرکات زمین را تحت تأثیر قرار می دهند شامل اثر منبع، اثر مسیر و اثر سایت است. اثر منبع به پارامترهای گوناگونی هم چون سطح افت تنش در رویداد زمین لرزه، مکانیسم گسلش و جهت گسلش مربوط است که اثر این پارامترها یکسان نیست و به فاصله سایت مورد نظر از گسل بستگی دارد و برای آن در ادبیات فنی موضوع تعاریف مختلفی (مانند نزدیک ترین فاصله از محل گسیختگی، فاصله جویز-بور و...) ارائه شده است. [3] اثر سایت در برخی از مدل ها به صورت کلی در نظر گرفته می شود (به عنوان مثال، خاک یا سنگ) و در برخی دیگر از سرعت موج برشی در خاک به عنوان شاخص اثر سایت استفاده می کنند. به طور کلی، GMPEs نوین عموماً از نظر بزرگی زمین لرزه، فاصله منبع تا سایت، شرایط ژئوتکنیکی سایت و مکانیسم گسلش بررسی می شوند [3-5]، اما پارامترهای فیزیکی مؤثر دیگر مانند افت تنش، انتشار گسیختگی، راستاپذیری و رفتار غیرخطی خاک به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد در توسعه معادلات پیش بینی مورد استفاده قرار نمی گیرند [6,7].

هدف اصلی این پژوهش پیش بینی بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) با بهره گیری از الگوریتم درختی مبتنی بر رگرسیون موسوم به M5 است که پس از تهیه مدل های نهایی برای هر یک از انواع گسل، به منظور اعتبار سنجی، مدل های ارائه شده با ۳ مدل بیشتر شناخته شده در این زمینه (Boore and Atkinson [8], Campbell and Bozorgnia [9] و Gandomi, et al [10]) که دارای اشتراک در پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی بودند مقایسه گردید و برای تحلیل عملکرد و اعتبار، آنالیز پارامتریک و حساسیت بر روی مدل انجام شد.

$$SDR = sd(T) - \sum \frac{|T_i|}{|T|} sd(T_i) \quad (1)$$

الگوریتم M5

با پیشرفت در روش‌های داده‌کاوی به‌کمک رایانه، معادلات جدید برای پیش‌بینی حرکت زمین برپایه الگوریتم‌های ژنتیکی و ترکیبی ژنتیکی [10]، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) [10,11] و دیگر الگوریتم‌های هوش مصنوعی [12,13] ارائه شده‌است. در این زمینه شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی معادلات حرکت زمین استفاده شده‌است اما این روش مانند بسیاری از دیگر انواع روش‌های الگوریتم‌های هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) شفاف و قابل فهم نیست. از این رو به‌عنوان یکی از اهداف اصلی این پژوهش، به‌منظور یافتن روابط ساده‌تر از روش رگرسیون درختی M5 استفاده شده‌است. این روش یکی از موفق‌ترین و رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی‌های داده‌محور است که برای نخستین بار توسط Quinlan [14] به‌صورت مدل درخت تصمیم موسوم به M5 برای پیش‌بینی داده‌های پیوسته ارائه شد و Witten and Wang [15] این مدل را توسعه دادند. برخلاف مدل‌های درخت تصمیم معمول که کلاس یا رده‌های گسسته را به‌عنوان خروجی ارائه می‌کنند، مدل M5 مدل خطی چندمتغیره را برای داده‌ها در هر گره از مدل درختی می‌سازد. برپایه ساختار مدل‌های درخت تصمیم‌گیری دارای ۳ مرحله اصلی است؛ ایجاد درخت، هرس کردن آن و ساده‌سازی درخت. در گام ساختن درخت، از یک الگوریتم استنتاجی یا معیار تقسیم (انشعاب) برای ساخت یک درخت تصمیم استفاده می‌شود. معیار بخش کردن برای الگوریتم مدل M5 ارزیابی انحراف معیار مقادیر کلاسی است که به‌عنوان کمیتی از خطا به یک گره می‌رسد و کاهش مورد انتظار در این خطا را به‌عنوان نتیجه آزمون هر پارامتر یا صفت در آن گره محاسبه می‌کند [16]. در شکل (۱) نمونه جداسازی درخت نشان داده شده‌است. کاهش انحراف معیار (SDR) از رابطه (۱) به دست می‌آید:

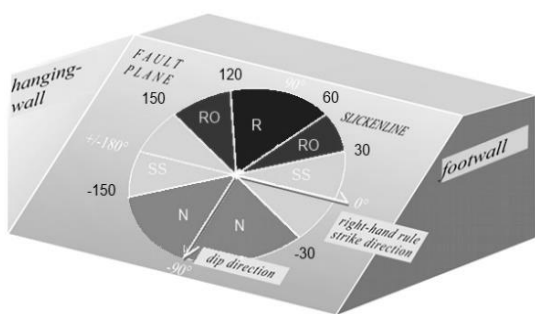


شکل ۱ جداسازی فضای ورودی و پیش‌بینی توسط مدل درختی برای داده‌های جدید. (a) جداسازی فضای ورودی $x_1 \times x_2$ به‌وسیله الگوریتم درختی M5 و (b) پیش‌بینی مقدار جدید توسط مدل درختی [17]

که در آن T بیانگر یک سری نمونه‌هایی است که به گره می‌رسند و T_i بیانگر نمونه‌هایی است که λ_{min} خروجی سری پتانسیلی را دارند و sd بیانگر انحراف معیار است. به‌دلیل فرایند انشعاب، داده‌های قرارگرفته در گره‌های فرزند، انحراف معیار کمتری نسبت به گره مادر دارند و بنابراین خالص‌تر هستند. پس از بیشینه‌سازی همه انشعاب‌های ممکن، M5 صفتی را گزینش می‌کند که کاهش مورد انتظار را بیشینه کند. این تقسیم بیشتر ساختار شبه‌درختی بزرگی را تشکیل می‌دهد که سبب بیش‌برازش (Over-Fitting) می‌شود. برای غلبه بر مسئله بیش‌برازش، درخت تشکیل شده باید هرس شود. این کار با جایگزینی یک درخت فرعی با یک برگ انجام می‌شود. بنابراین، گام دوم در طراحی مدل درختی شامل هرس کردن

جدول ۱ تقسیم‌بندی مکانیسم‌های گسلش برپایه زاویه ریک

| Mechanism Class | Rake Angle |
|-------------------|-----------------------------|
| Strike - Slip | $-180 < \text{Rake} < -150$ |
| | $-30 < \text{Rake} < 30$ |
| | $150 < \text{Rake} < 180$ |
| Normal | $-150 < \text{Rake} < -30$ |
| Reverse | $60 < \text{Rake} < 120$ |
| Reverse - Oblique | $30 < \text{Rake} < 60$ |
| | $120 < \text{Rake} < 150$ |



شکل ۲ تقسیم‌بندی مکانیسم‌های گسلش برپایه زاویه ریک

پایگاه داده (NGA Flatfile V 7.3) دربرگیرنده داده‌های ثبت‌شده زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای کم‌عمق در مناطق تکتونیکی فعال جهان است. پایگاه داده‌ها طیف گسترده‌ای از بزرگی و فاصله را پوشش می‌دهد. پژوهشگران بسته به نوع مطالعه ممکن است که از همه پایگاه داده‌ها استفاده کنند و یا آنالیزهایشان را به زیرمجموعه‌های گزینشی محدود کنند. در این پژوهش، بخشی از پایگاه داده از آنالیز حذف شده‌است. مجموعه داده‌های فاقد اطلاعات پارامترهای موردنیاز و همچنین نگاشت‌های تکراری موارد حذف‌شده از آنالیز هستند. درنهایت، از مجموع ۳۵۵۱ نگاشت، ۲۷۷۷ نگاشت برای انواع گسل‌های ذکرشده شامل گسل امتدادلغز، نرمال، معکوس و معکوس مایل برای ایجاد مدل استفاده شد. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده موجود در آنالیز V_{s30} ، R_{jb} ، M_w و F بودند و PGA و PGV پارامترهای حرکات زمین

درخت رشدیافته و جایگزینی درختان فرعی با توابع رگرسیونی خطی است. این روش ساخت مدل درختی، فضای پارامترهای ورودی را به نواحی یا زیر فضاهای کوچک‌تر تقسیم می‌کند و در هرکدام از آنها، یک مدل رگرسیونی خطی برازش می‌دهد. بعد از این که مدل خطی به دست آمد، برای کمینه کردن خطای تخمین با حذف کردن پارامترها، ساده‌سازی مدل انجام می‌شود. در مدل $M5$ از یک جستجوی حریصانه برای حذف متغیرهایی که مشارکت کمی در مدل دارند، استفاده می‌شود [14].

پارامترهای ورودی

در این پژوهش برپایه مرور ادبیات فنی، ۴ پارامتر در مدل‌سازی معادلات پیش‌بینی PGA و PGV به کار رفته‌است. فرمول‌بندی در نظر گرفته‌شده بدین صورت است:

$$PGA, PGV = f(M_w, R_{jb}, V_{s30}, F) \quad (2)$$

که در آن M_w بزرگی زمین‌لرزه، R_{jb} نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر عمودی صفحه گسیختگی گسل (فاصله جویز-بور)، V_{s30} متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی سایت و F مکانیسم گسلش شامل گسل‌های نرمال، امتدادلغز، معکوس و معکوس مایل است که با توجه به زاویه ریک و مطابق جدول (۱) و شکل (۲) تفکیک می‌شود.

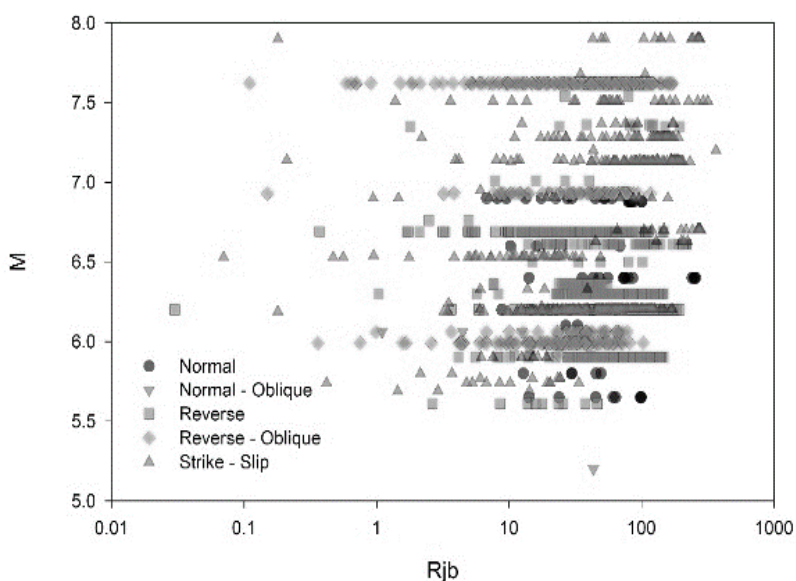
پایگاه داده‌ها

منبع داده‌های حرکات نیرومند زمین به کاررفته برای توسعه $GMPEs$ پایگاه داده‌هایی بوده‌است که در پروژه $PEER-NGA$ (Pacific Earthquake Engineering Research Center- Next Generation Attenuation Relationship) به وسیله Power, et al [18] جمع‌آوری شده بود.

هستند. گسترده بودن محدوده‌ها این امکان را می‌دهد تا بتوان در مسائل مختلف و با اطمینان بیشتری از معادلات پیش‌بینی به دست‌آمده استفاده نمود؛ لذا این گستردگی نقش مهمی در آنالیز خطر لرزه‌ای دارد. برای تجسم بهتر، داده‌ها به وسیله نمودارهای هیستوگرام نشان داده شده‌اند.

بودند که فرموله شدند. شکل (۳) توزیع داده‌های مورد استفاده برای ساخت مدل معادلات پیش‌بینی را نشان می‌دهد.

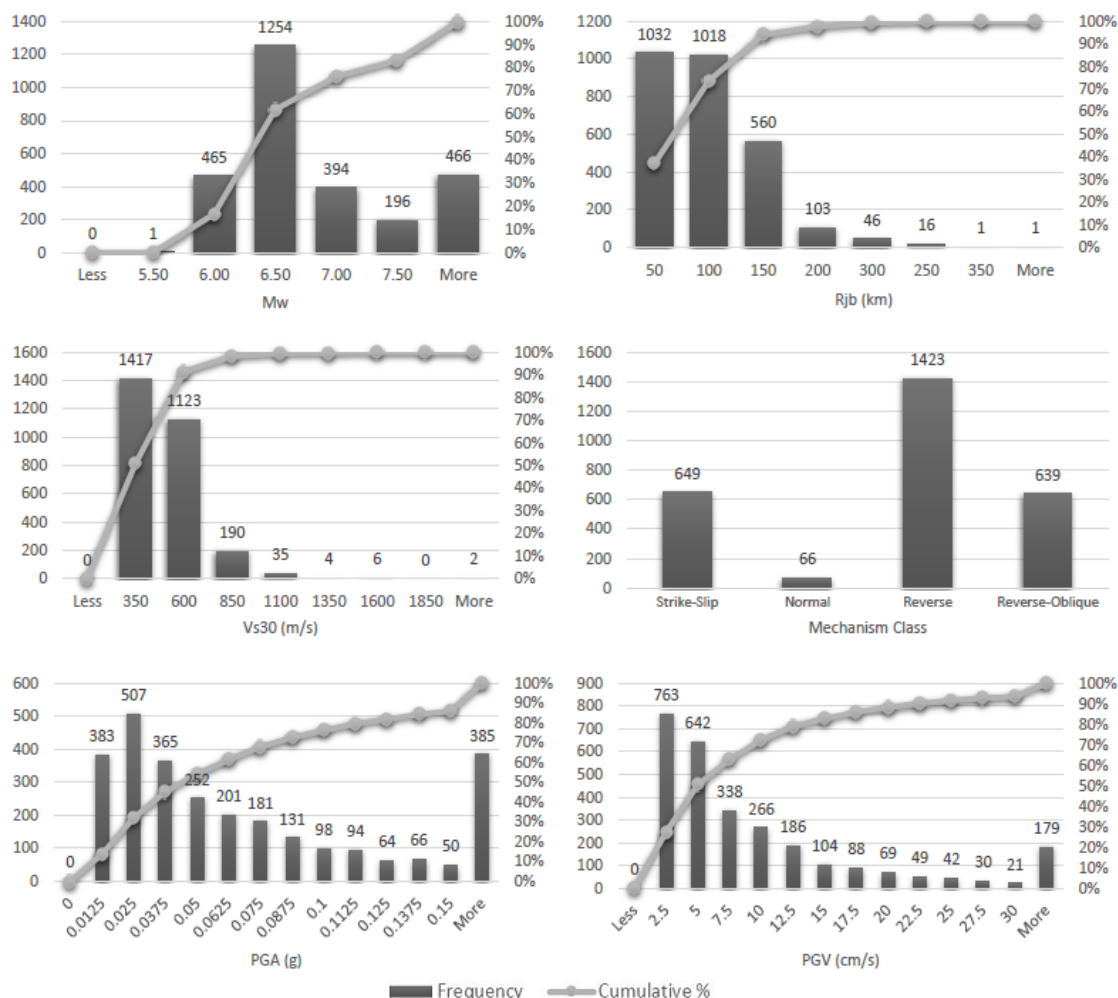
محدوده‌ها و آمارهای پارامترهای درگیر در فرایند مدل‌سازی در جدول (۲) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، دامنه‌های متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، به‌ویژه برای بزرگی و فاصله نسبتاً گسترده



شکل ۳ توزیع داده‌های مورد استفاده برای توسعه معادلات پیش‌بینی تفکیک شده بر پایه نوع گسل

جدول ۲ آمار توصیفی از متغیرهای مورد استفاده برای ساخت مدل

| Parameter | M_w | R_{jb} (km) | V_{s30} (m/s) | PGA (g) | PGV (cm/sec) |
|--------------------|-------|---------------|-----------------|---------|--------------|
| Mean | 6.55 | 73.34 | 386.07 | 0.08 | 9.38 |
| Standard Error | 0.01 | 0.96 | 3.28 | 0.00 | 0.24 |
| Median | 6.30 | 63.49 | 345.42 | 0.04 | 4.89 |
| Standard deviation | 0.59 | 50.55 | 172.79 | 0.11 | 12.65 |
| Variance | 0.35 | 2555.97 | 29861.63 | 0.01 | 160.14 |
| Kurtosis | -0.68 | 3.19 | 10.22 | 33.92 | 14.49 |
| Skewness | 0.83 | 1.38 | 2.12 | 4.43 | 3.28 |
| Range | 2.70 | 365.11 | 1899.78 | 1.66 | 117.04 |
| Min. | 5.20 | 0.03 | 116.35 | 0.00 | 0.10 |
| Max. | 7.90 | 365.14 | 2016.13 | 1.66 | 117.14 |



شکل ۴: هیستوگرام پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی

می‌گیرد؛ در نهایت \ln از هر دو سوی رابطه حذف می‌گردد. مراحل مذکور به ترتیب در روابط (۴)، (۵) و (۶) نمایش داده شده‌است.

$$\frac{\ln \text{PGA}}{\ln \text{PGV}} = \alpha * \ln M_w + \beta * \ln R_{jb} + \gamma * \ln V_{s30} + C$$

(۴)

$$\exp\left(\frac{\ln \text{PGA}}{\ln \text{PGV}}\right) = \exp(\alpha * \ln M_w + \beta * \ln R_{jb} + \gamma * \ln V_{s30} + C)$$

(۵)

پیش پردازش داده‌ها

خروجی الگوریتم M5 به صورت جمع و تفریق پارامترهای ضریب دار و به شکل زیر است:

$$\frac{\text{PGA}}{\text{PGV}} = \alpha * M_w + \beta * R_{jb} + \gamma * V_{s30} + C \quad (۳)$$

که در آن α ، β و γ ضرایب پارامترها و C مقدار

ثابت است.

در این پژوهش برای آسان تر شدن فهم معادله و

این که تغییر هر پارامتر چه تأثیری در مقدار نهایی PGA و PGV دارد، نخست از همه پارامترهای ورودی و خروجی \ln گرفته می‌شود و سپس مدل سازی انجام

اعتبارسنجی

برپایه مرور ادبیات فنی موضوع، سه پارامتر عمده که در اکثر مطالعات به عنوان پارامترهای اعتبارسنجی مدل‌ها از آنها استفاده شده است، عبارتند از: ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)، میانگین ریشه مربعات خطا (Root Mean Square Error) و میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error) که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t}_i)^2}} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - t_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - t_i| \quad (8)$$

که در آنها h_i و t_i به ترتیب، مقادیر خروجی واقعی و پیش‌بینی شده برای خروجی i ام و \bar{h}_i و \bar{t}_i به ترتیب، میانگین مقادیر خروجی واقعی و میانگین مقادیر پیش‌بینی شده در نمونه‌ها و n تعداد نمونه‌ها است. مقادیر بالاتر CC و مقادیر پایین‌تر $RMSE$ و MAE نشان‌دهنده یک مدل دقیق‌تر است.

ارائه و تحلیل مدل

در این بخش مدل‌های به‌دست‌آمده به روش الگوریتم درختی $M5$ برای بیشینه شتاب زمین و بیشینه سرعت زمین که برحسب نوع گسل تفکیک شده، به همراه نمودار درختی پیش‌بینی آمده است. سپس نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر به‌دست‌آمده به وسیله مدل برای مجموعه داده‌های آزمایشی و مجموعه داده‌های اعتبارسنجی رسم شده و با چند مدل دیگر که دارای اشتراک در پارامترهای ورودی مدل هستند مقایسه گردیده است. سپس برای هر بخش تحلیل حساسیت و مطالعه پارامتری انجام شده است.

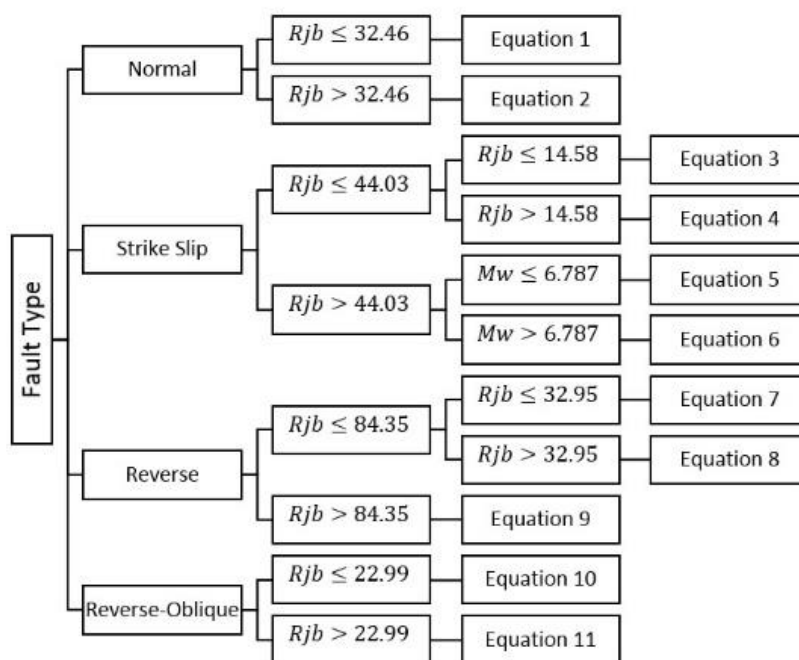
$$\frac{PGA}{PGV} = M_w^\alpha * R_{jb}^\beta * V_{s30}^\gamma * \exp C \quad (6)$$

پس از محاسبه \ln همه پارامترهای موردنظر ورودی و خروجی ۲۷۷۷ داده گزینش شده در نخستین گام از پیش‌پردازش، داده‌ها برپایه نوع گسل از یکدیگر تفکیک گردید. برای آنالیز، در هر یک از مجموعه داده‌های تفکیک شده برحسب نوع گسل، ۸۰ درصد داده‌ها به طور تصادفی به زیرمجموعه آموزشی و ۲۰ درصد داده‌ها به زیرمجموعه آزمایشی اختصاص یافت که در جدول (۳) شمار داده‌های اختصاص یافته برای هر یک از این زیرمجموعه‌ها نشان داده شده است. داده‌های یادگیری برای آموزش الگوریتم آماده شد و به وسیله آنها مدل ساخته شد. داده‌های اعتبارسنجی در مدل به دست آمده با استفاده از داده‌های آموزشی قرار گرفت و از آن برای مشخص کردن توانایی تعمیم مدل‌ها استفاده شد؛ به این ترتیب، هم داده‌های یادگیری و هم داده‌های اعتبارسنجی در فرایند مدل‌سازی، لحاظ شدند. برای ارزیابی کارکرد مدل‌های به دست آمده به وسیله $M5$ ، داده‌های آزمون که هیچ نقشی در ساخت مدل‌ها نداشتند، در مدل نهایی قرار گرفتند و مقادیر خطا و ضریب همبستگی که در ادامه توضیح داده شده است به دست آمد. به منظور به دست آوردن یک دسته‌بندی مناسب از داده‌ها، چندین ترکیب از مجموعه‌های آموزشی و آزمون مدنظر قرار گرفت. گزینش به گونه‌ای بود که بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف استاندارد پارامترها، در مجموعه داده‌های آموزشی و آزمون سازگار باشد.

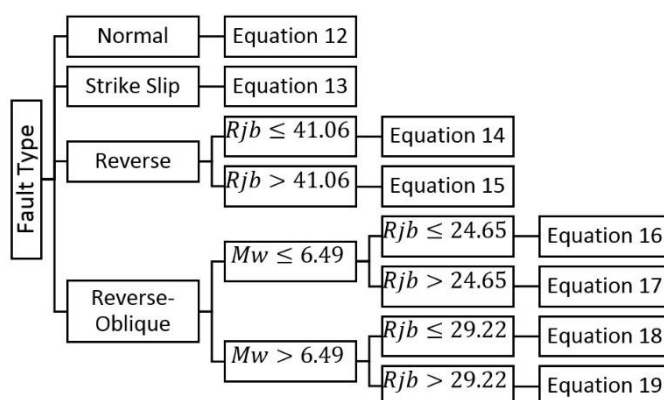
جدول ۳ تعداد داده‌های آموزشی و آزمایشی در هر یک از انواع گسل

| MECHANISM CLASS | TOTAL | TRAIN | TEST |
|-------------------|-------|-------|------|
| STRIKE - SLIP | 649 | 519 | 130 |
| NORMAL | 66 | 53 | 13 |
| REVERSE | 1423 | 1139 | 284 |
| REVERSE - OBLIQUE | 639 | 511 | 128 |

برای آسانی به کارگیری، روابط پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) در قالب نمودار درختی به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) و ضرایب ثابت هر معادله آمده‌است. نشان داده شده‌است و در ادامه رابطه‌های ارائه شده به صورت جدول (۴) شامل توان‌های پارامترهای ورودی و ضرایب ثابت هر معادله آمده‌است.



شکل ۵ چارت روابط پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA



شکل ۶ چارت روابط پیش‌بینی بیشینه سرعت زمین PGV

جدول ۴ توان‌های پارامترهای ورودی و ضرایب ثابت معادلات پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین

| GMPE | Equation | M _w Power | R _{jb} Power | V _{s30} Power | C |
|------|----------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|
| PGA | 1 | 2.752 | -0.726 | -0.564 | 1.757E-01 |
| | 2 | 3.138 | -1.295 | -0.091 | 3.272E-02 |
| | 3 | 0.444 | -0.146 | -0.031 | 1.653E-01 |
| | 4 | 0.444 | -0.127 | -0.031 | 7.608E-02 |
| | 5 | 0.708 | -0.816 | -0.457 | 2.444E+00 |
| | 6 | 0.840 | -1.052 | -0.052 | 1.666E+00 |
| | 7 | 3.893 | -0.553 | -0.025 | 6.69E-04 |
| | 8 | 6.602 | -0.584 | -0.331 | 2.1E-05 |
| | 9 | 3.834 | -1.410 | -0.327 | 1.022E-01 |
| | 10 | 0.529 | -0.252 | -0.023 | 1.461E-01 |
| | 11 | 1.079 | -0.795 | -0.304 | 1.194E+00 |
| PGV | 12 | 4.686 | -0.956 | -0.321 | 1.441E-01 |
| | 13 | 7.114 | -0.689 | -0.784 | 1.191E-02 |
| | 14 | 6.892 | -0.425 | -0.042 | 1.43E-04 |
| | 15 | 8.358 | -0.840 | -0.792 | 2.475E-03 |
| | 16 | 0.572 | -0.305 | -0.780 | 7.16E+02 |
| | 17 | 0.572 | -0.760 | -0.528 | 5.145E+02 |
| | 18 | 4.210 | -0.241 | -0.114 | 2.62E-02 |
| | 19 | 0.198 | -0.472 | -0.617 | 2.045E+03 |

مقایسه با مدل‌های دیگر

مطلق (MAE) در انواع گسل؛ هم در مجموعه داده‌های آموزشی و هم در مجموعه داده‌های آزمایشی اشاره نمود. مقایسه بر روی داده‌های آموزشی و آزمایشی استفاده شده در فرایند ابداع مدل‌های حاضر انجام شده است. همان‌طور که در ادامه خواهد آمد، ملاحظه می‌شود که در فریب به اتفاق موارد، برتری با مدل به دست آمده با روش M5 است. هم‌چنین، اگر یک مدل $CC > 0.8$ ارائه دهد و مقادیر خطا (به عنوان مثال، RMSE و MAE) حداقل باشند، یک همبستگی قوی میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد [19]؛ بنابراین مدل می‌تواند به عنوان بسیار خوب در نظر گرفته شود. مدل‌های M5 به دست آمده با CC بالا و مقادیر RMSE و MAE کم، به میزان قابل ملاحظه‌ای قادر

برای اعتبارسنجی، مدل‌های ارائه شده برای بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) بر پایه ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) با ۳ مدل ارائه شده به وسیله Boore and Atkinson [8]، Campbell and Bozorgnia [9] و Gandomi, et al [10] که دارای اشتراک در پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی بودند، مقایسه شد. از برتری‌های مدل ارائه شده در این پژوهش می‌توان به محاسبه مستقیم PGA و PGV به جای In این مقادیر، سادگی مدل و برتری از نظر ضریب همبستگی (CC) در بیشتر موارد، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای

به پیش‌بینی مقادیر هدف هستند [20].
 مدل به‌دست‌آمده برای بیشینه شتاب زمین و بیشینه
 سرعت زمین با ۳ مدل دیگر مطابق جدول (۵) و جدول
 (۶) مقایسه شد. مشاهده می‌شود که در اکثر موارد
 برتری با مدل M5 است.

جدول ۵ مقایسه مدل M5 با ۳ مدل دیگر PGA برای داده‌های آزمایشی در هر یک از انواع گسل

| Mechanism Class | Model Error | Campbell-Bozorgnia - 2007 | Boore-Atkinson - 2008 | Gandomi-Alavi - 2011 | M5 |
|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|--------|
| N | CC | 0.8988 | 0.9404 | 0.8967 | 0.9373 |
| | MAE | 0.5582 | 0.4320 | 0.9574 | 0.0340 |
| | RMSE | 0.7450 | 0.4898 | 1.0856 | 0.0567 |
| S | CC | 0.8808 | 0.8505 | 0.8777 | 0.9106 |
| | MAE | 0.5163 | 0.6077 | 0.7430 | 0.0364 |
| | RMSE | 0.6038 | 0.7473 | 0.8953 | 0.0856 |
| R | CC | 0.7377 | 0.7778 | 0.7205 | 0.9531 |
| | MAE | 0.8121 | 0.9785 | 0.5161 | 0.0313 |
| | RMSE | 0.9573 | 1.1246 | 0.7055 | 0.2677 |
| RO | CC | 0.6810 | 0.5142 | 0.6075 | 0.8041 |
| | MAE | 0.3997 | 0.7165 | 0.6532 | 0.0327 |
| | RMSE | 0.5662 | 0.8016 | 0.8907 | 0.0662 |

جدول ۶ مقایسه مدل M5 با ۳ مدل دیگر PGV برای داده‌های آزمایشی در هر یک از انواع گسل

| Mechanism Class | Model Error | Campbell-Bozorgnia - 2007 | Boore-Atkinson - 2008 | Gandomi-Alavi - 2011 | M5 |
|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|--------|
| N | CC | 0.9015 | 0.9214 | 0.9491 | 0.9691 |
| | MAE | 0.6154 | 0.6023 | 0.5136 | 4.1675 |
| | RMSE | 0.7975 | 0.7694 | 0.6624 | 7.9640 |
| S | CC | 0.6651 | 0.8244 | 0.7922 | 0.8939 |
| | MAE | 0.5819 | 0.4762 | 0.5346 | 3.0824 |
| | RMSE | 0.8906 | 0.6146 | 0.6500 | 5.0869 |
| R | CC | 0.7119 | 0.7815 | 0.7679 | 0.8821 |
| | MAE | 0.5733 | 0.5059 | 0.5405 | 2.5625 |
| | RMSE | 0.7448 | 0.6690 | 0.6858 | 5.7484 |
| RO | CC | 0.4689 | 0.7857 | 0.7816 | 0.8560 |
| | MAE | 0.6366 | 0.4932 | 0.4796 | 6.7767 |
| | RMSE | 1.0323 | 0.6038 | 0.5990 | 9.5758 |

تحلیل حساسیت

شده است. مشاهده می شود که در همه انواع گسل، پارامتر فاصله R_{jb} تأثیر زیادی بر روی مدل دارد و در نبود این پارامتر ورودی، ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) دستخوش دگرگونی بسیار زیادی شده است. در گسل های نرمال و امتداد لغز، پس از پارامتر فاصله R_{jb} که بیشترین تأثیر را در ایجاد مدل دارد، پارامتر M_w به نسبت V_{s30} تأثیر بیشتری در مدل دارد. در گسل های معکوس و معکوس مایل، برخلاف گسل های نرمال و امتداد لغز، پارامتر V_{s30} به نسبت M_w تأثیر بیشتری در مدل پیش بینی بیشینه شتاب زمین دارد.

تحلیل حساسیت بیشینه سرعت زمین نیز در هر یک از انواع گسل برای پارامترهای M_w ، V_{s30} و R_{jb} محاسبه شده است. در جدول (۸) دیده می شود که مانند تحلیل حساسیت بیشینه شتاب زمین در همه انواع گسل، پارامتر فاصله R_{jb} تأثیر بسیار زیادی بر روی ایجاد مدل پیش بینی بیشینه سرعت زمین دارد. پس از پارامتر فاصله R_{jb} ، پارامترهای M_w و V_{s30} به ترتیب بیشترین تأثیر را در ایجاد مدل دارند.

تحلیل حساسیت برای درک آن است که هر یک از پارامترهای ورودی از جمله بزرگی زمین لرزه، فاصله جویز-بور و متوسط سرعت موج برشی در هر یک از انواع گسل، در ایجاد مدل چه اندازه تأثیر گذارند. به این منظور، به صورت جداگانه، بر روی هر یک از مدل های پیش بینی بیشینه شتاب زمین PGA و بیشینه سرعت زمین PGV تحلیل حساسیت انجام شد. روش انجام تحلیل حساسیت برای هر پارامتر ورودی در یک گسل به این شکل است که از داده های آموزشی مورد استفاده در ایجاد مدل، پارامتر ورودی مورد نظر حذف شده و سپس با شرایطی دقیقاً همسان که برای ایجاد مدل اصلی استفاده شده است، مدل سازی انجام می شود. پس از آن داده های آزمایشی بر روی مدل جدید پیاده می شود و ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) محاسبه می گردد. در جدول (۷) نتایج تحلیل حساسیت بیشینه شتاب زمین در هر یک از انواع گسل برای پارامترهای M_w ، V_{s30} و R_{jb} مطابق روشی که گفته شد ارائه

جدول ۷ تحلیل حساسیت بیشینه شتاب زمین در هر یک از انواع گسل

| Mechanism Class | Model tree in absence of | CC | MAE | RMSE |
|-------------------|--------------------------|---------|--------|--------|
| Normal | - | 0.9373 | 0.0340 | 0.0567 |
| | M_w | 0.8290 | 0.0372 | 0.0607 |
| | R_{jb} | 0.0000 | 0.0571 | 0.0999 |
| | V_{s30} | 0.8472 | 0.0296 | 0.0551 |
| Strike-Slip | - | 0.9106 | 0.0364 | 0.0856 |
| | M_w | 0.8903 | 0.0429 | 0.0909 |
| | R_{jb} | 0.1618 | 0.0702 | 0.1549 |
| | V_{s30} | 0.9089 | 0.0406 | 0.0865 |
| Reverse | - | 0.9531 | 0.0313 | 0.2677 |
| | M_w | 0.9545 | 0.0438 | 0.3962 |
| | R_{jb} | -0.0939 | 0.0259 | 0.0301 |
| | V_{s30} | 0.9515 | 0.0320 | 0.2602 |
| Reverse - Oblique | - | 0.8041 | 0.0327 | 0.0662 |
| | M_w | 0.8208 | 0.0320 | 0.0687 |
| | R_{jb} | 0.3062 | 0.0480 | 0.0984 |
| | V_{s30} | 0.8069 | 0.0314 | 0.0663 |

جدول ۸ تحلیل حساسیت بیشینه سرعت زمین در هر یک از انواع گسل

| Mechanism Class | Model tree in absence of | CC | MAE | RMSE |
|-------------------|--------------------------|--------|---------|---------|
| Normal | - | 0.9691 | 4.1675 | 7.9640 |
| | Mw | 0.8932 | 5.2204 | 9.5378 |
| | Rjb | 0.0000 | 6.6070 | 13.1714 |
| | Vs30 | 0.9704 | 3.9900 | 7.2333 |
| Strike-Slip | - | 0.8939 | 3.0824 | 5.0869 |
| | Mw | 0.5975 | 5.2716 | 9.2373 |
| | Rjb | 0.3993 | 5.7575 | 10.5690 |
| | Vs30 | 0.8229 | 3.7547 | 6.5424 |
| Reverse | - | 0.8821 | 2.5625 | 5.7484 |
| | Mw | 0.6774 | 3.2777 | 8.3848 |
| | Rjb | 0.5054 | 3.7534 | 9.5527 |
| | Vs30 | 0.8785 | 2.7286 | 5.8157 |
| Reverse - Oblique | - | 0.8560 | 6.7767 | 9.5758 |
| | Mw | 0.6585 | 11.0747 | 15.7054 |
| | Rjb | 0.3377 | 11.3965 | 17.5614 |
| | Vs30 | 0.8408 | 7.0653 | 9.9895 |

بررسی پارامتریک

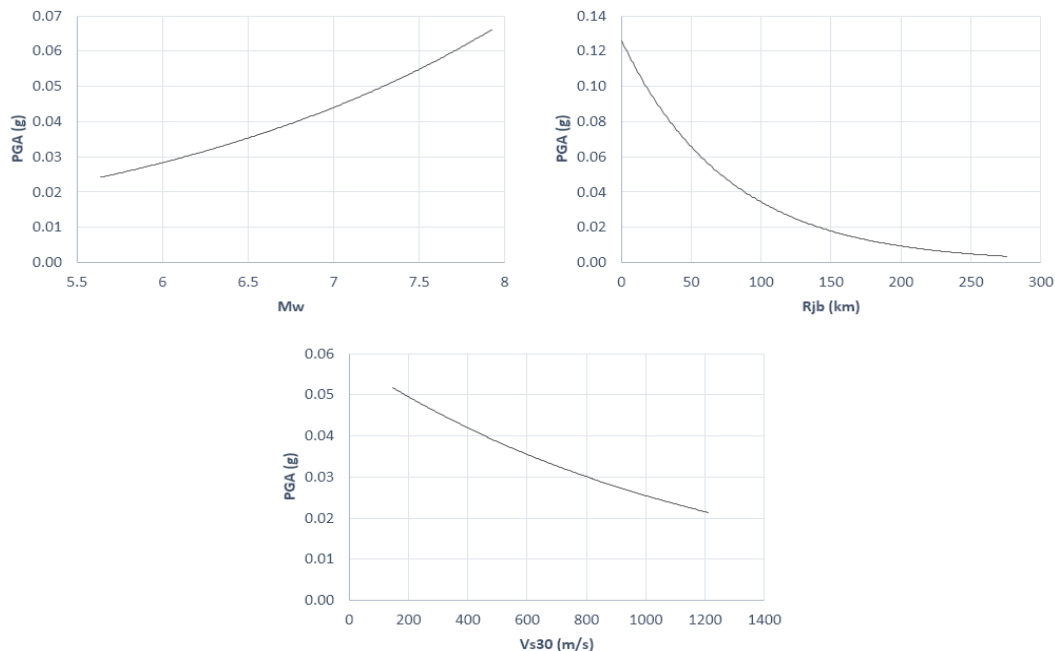
در این پژوهش به منظور بررسی توانمندی معادلات پیش‌بینی، آنالیز پارامتریک بر روی داده‌ها و مدل ارائه شده انجام شد. روش کار به این صورت بود که برای هر یک از مدل‌های پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA و بیشینه سرعت زمین PGV تنها یک متغیر پیش‌بینی‌کننده تغییر می‌کند در حالی که دیگر متغیرهای ورودی در مقادیر میانگین مجموعه داده‌های آزمون ثابت نگه داشته می‌شوند. بدین صورت با نهادن این متغیرها در معادلات پیش‌بینی به دست آمده به وسیله مدل M5 و محاسبه مقادیر بیشینه شتاب زمین PGA و بیشینه سرعت زمین PGV می‌توان نمودارهای برازش این مقادیر را در برابر پارامتری که ثابت نبوده است، رسم نمود. توانمندی معادلات ارائه شده با بررسی این که مقادیر پیش‌بینی شده چه اندازه با رفتار فیزیکی حاکم بر سیستم مورد بررسی هم‌خوانی دارد تعیین شده است [21]. شکل

(۷) روند پیش‌بینی‌های مدل PGA را با تغییرات پارامترهای M_w ، R_{jb} و V_{s30} نشان می‌دهند. نتایج آنالیز پارامتریک نشان می‌دهد که PGA همواره با افزایش M_w افزایش می‌یابد و با افزایش R_{jb} و V_{s30} کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نتایج آنالیز پارامتریک از دید زمین‌لرزه‌شناسی همگی مورد انتظار بوده‌اند [22, 5-3].

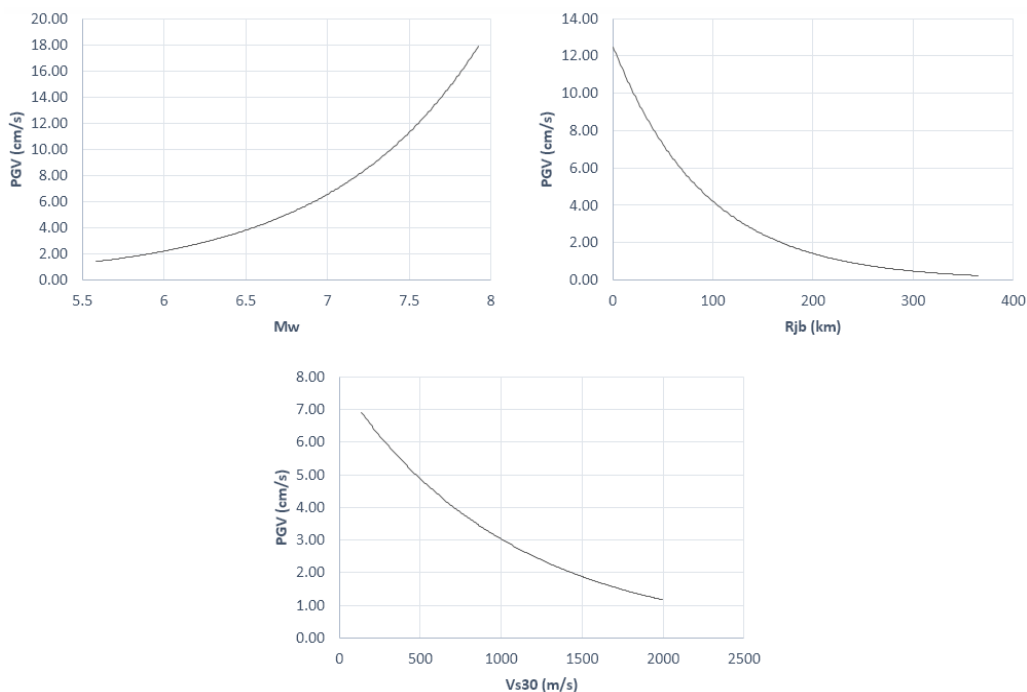
نتایج تأیید می‌کند که معادلات پیشنهادی برای بیشینه شتاب زمین PGA توانمند هستند و می‌توانند با اطمینان به منظور پیش‌گویی در مطالعات خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

شکل (۸) گرایش مدل پیش‌بینی PGV را به تغییرات پارامترهای لرزه‌ای، M_w ، R_{jb} و V_{s30} نشان می‌دهند. نتایج آنالیز پارامتریک نشان می‌دهد که PGV همواره با افزایش M_w افزایش می‌یابد و با افزایش R_{jb} و V_{s30} کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نتایج آنالیز پارامتریک با دیدگاه‌های زمین‌لرزه‌شناسی سازگار است

و تأیید می‌کند که معادلات پیشنهادی برای بیشینه سرعت زمین PGV قوی هستند و می‌توانند با اطمینان به منظور پیش‌گویی در مطالعات خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۷ آنالیز پارامتریک برای بیشینه شتاب زمین بر پایه مدل M5



شکل ۸ آنالیز پارامتریک برای بیشینه سرعت زمین بر پایه مدل M5

نتیجه گیری

در این پژوهش با عنایت به اهمیت تحلیل خطر زمین لرزه و به منظور پیش بینی پارامترهای حرکات نیرومند زمین از جمله بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) به عنوان یکی از مهم ترین مراحل مطالعات ارزیابی خطر زمین لرزه، از یک روش داده کاوی مبتنی بر رگرسیون درختی موسوم به M5 بهره برده شد. GMPEs پیشنهادی براساس گزینش ۲۷۷۷ نگاشت زمین لرزه از پایگاه داده های گسترده ای شامل ۳۵۵۱ نگاشت زمین لرزه از سراسر جهان، جمع آوری شده در پروژه PEER-NGA ساخته شد. پارامترهای ورودی Mw بزرگی زمین لرزه، Rjb نزدیک ترین فاصله افقی تا تصویر عمودی صفحه گسیختگی گسل (فاصله جویز-بور)، Vs30 متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی سایت و F مکانیسم گسلش به عنوان پارامترهایی کارآمد بر پایه ادبیات فنی موضوع در تهیه مدل های پیش بینی حرکات نیرومند زمین به کار گرفته شد. برای تهیه مدل های GMPEs، داده های انتخابی براساس انواع گسل شامل گسل نرمال، گسل امتداد لغز، معکوس و معکوس مایل که بر پایه زاویه ریک تعیین می شود جدا گردید و داده های هر یک از انواع گسل به زیرمجموعه های ۲۰ و ۸۰ درصدی آموزشی و اعتبارسنجی تقسیم گردید و مدل با به کارگیری زیرمجموعه داده های آموزشی برای هر گسل ایجاد شد. GMPEs پیشنهادی در این پژوهش برآوردهای قابل اعتمادی از مقادیر PGA و PGV ارائه می دهند و شرایط و معیارهای مختلف مد نظر برای اعتبارسنجی را ارضا می کنند که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. معادلات پیشنهادی به طور چشم گیری ساده و

جایگزین های کارامدی برای معادلات بسیار پیچیده ارائه شده توسط دیگر محققان هستند.

۲. نتایج آنالیز پارامتریک انجام شده بر روی زیرمجموعه داده های آزمون با رفتارهای مورد انتظار از دید زمین لرزه شناسی همخوانی دارند؛ به این ترتیب که PGA و PGV همواره با افزایش Mw افزایش و با افزایش Vs30 و Rjb کاهش می یابند.
۳. نتایج تحلیل های حساسیت و پارامتریک به روشنی نشان می دهند که GMPEs استنتاج شده به نحو کارامدی رفتار فیزیکی اساسی حاکم بر سیستم را در نظر می گیرند و تنها ترکیباتی از متغیرهای پیش بینی کننده نیستند که به صورت تصادفی بهترین تناسب را با نتایج تجربی داشته باشند.
۴. مدل های مربوط به PGA و PGV در مقایسه با چند مدل شناخته شده در ادبیات فنی موضوع که از لحاظ پارامترهای ورودی با مدل های پیشنهادی این پژوهش اشتراک داشتند، از نظر ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در بیشتر موارد برتر هستند.
۵. نظر به این که GMPEs مبتنی بر M5 بر روی یک پایگاه داده های جامع با طیف گسترده ای از خواص توسعه یافته اند، می توانند با اطمینان برای اهداف طراحی به طور کاربردی مورد بهره برداری قرار گیرند.
۶. افزون بر سادگی روابط، برخلاف اکثر مدل های پیش بینی حرکات نیرومند زمین محاسبه بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) بدون استفاده از لگاریتم به عنوان یکی از برتری های مدل پیش بینی ارائه شده در این پژوهش است.

مراجع

1. N., Luco and C. A., Cornell, "Structure-specific Scalar Intensity Measures for Near-source and Ordinary Earthquake Ground Motions", Earthquake Spectra, Vol. 23, Pp. 357-392, (2007).
2. H., Güllü and E., Erçelebi, "A Neural Network Approach for Attenuation Relationships: An Application

- Using Strong Ground Motion Data from Turkey", *Engineering Geology*, Vol. 93, Pp. 65-81, (2007).
3. G. M., Atkinson and D. M., Boore, Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters: Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2007).
 4. D. M., Boore, 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*, Vol. 68, Pp. 128-153, (1997).
 5. K. W., Campbell and Y., Bozorgnia, Campbell-Bozorgnia NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters: Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2007).
 6. A. F., Cabalar and A., Cevik, "Genetic Programming-based Attenuation Relationship: An Application of Recent Earthquakes in Turkey", *Computers & Geosciences*, Vol. 35, Pp. 1884-1896, (2009).
 7. P., Somerville and R., Graves, "Characterization of Earthquake Strong Ground Motion", in *Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions*, ed: Springer, Pp. 1811-1828, (2003).
 8. D. M., Boore and G. M., Atkinson, "Ground-motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s", *Earthquake Spectra*, Vol. 24, Pp. 99-138, (2008).
 9. K. W., Campbell and Y., Bozorgnia, "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s", *Earthquake Spectra*, Vol. 24, Pp. 139-171, (2008).
 10. A. H., Gandomi, A. H., Alavi, M., Mousavi, and S. M., Tabatabaei, "A Hybrid Computational Approach to Derive New Ground-motion Prediction Equations", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 24, Pp. 717-732, (2011).
 11. S., Thomas, G., Pillai, K., Pal, and M., Zuhair, "Prediction of Peak Ground Acceleration (PGA) using Artificial Neural Networks", *Networks*, Vol. 8, P. 10, (2013).
 12. F., Yerlikaya-Özkurt, A., Askan, and G. W., Weber, "An Alternative Approach to the Ground Motion Prediction Problem by a Non-parametric Adaptive Regression Method", *Engineering Optimization*, Vol. 46, Pp. 1651-1668, (2014).
 13. A. H., Alavi and A. H., Gandomi, "Prediction of Principal Ground-motion Parameters Using a Hybrid Method Coupling Artificial Neural Networks and Simulated Annealing", *Computers & Structures*, Vol. 89, Pp. 2176-2194, (2011).
 14. J. R., Quinlan, "Learning with Continuous Classes", in *5th Australian joint conference on artificial intelligence*, Pp. 343-348, (1992).
 15. I., Witten and Y., Wang, "Induction of Model Trees for Predicting Continuous Classes", in *Proc. Poster*

- Papers Europ. Conf. Machine Learning, (1997).
16. A., Kaveh, T., Bakhshpoori and S., Hamze-Ziabari, "Derivation of New Equations for Prediction of Principal Ground-motion parameters using M5' algorithm," *Journal of Earthquake Engineering*, Pp. 1-21, (2016).
 17. N. C., Jung, I., Popescu, P., Kelderman, D. P., Solomatine, and R. K., Price, "Application of Model Trees and other Machine Learning Techniques for Algal Growth Prediction in Yongdam Reservoir, Republic of Korea", *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 12, Pp. 262-274, (2010).
 18. M., Power, B., Chiou, N., Abrahamson, and C., Roblee, "The Next Generation of Ground Motion Attenuation Models (NGA) Project: An Overview", in Proceedings, *Eighth National Conference on Earthquake Engineering*, (2006).
 19. G. N., Smith, Probability and statistics in civil engineering: Collins London, (1986).
 20. Y., Pan, J., Jiang, R., Wang, H., Cao, and Y., Cui, "A Novel QSPR Model for Prediction of Lower Flammability Limits of Organic Compounds Based on Support Vector Machine", *Journal of hazardous materials*, Vol. 168, Pp. 962-969, (2009).
 21. Y., Kuo, M., Jaksa, A., Lyamin, and W., Kaggwa, "ANN-based Model for Predicting the Bearing Capacity of Strip Footing on Multi-layered Cohesive Soil", *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, Pp. 503-516, (2009).
 22. N. N., Ambraseys, K. U., Simpson, and J. J.U Bommer, "Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 25, Pp. 371-400, (1996).