

استنتاج معادلات جدید پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین (PGA) در اثر زلزله های ناشی از گسل‌های امتدادلغز

علی درخشانی^{۱*}، علی صابری^۲

۱- استادیار، عضو هیأت علمی دانشگاه شاهد و واحد الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، واحد الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

در این پژوهش یک روش رگرسیون درختی موسوم به M5، برای به دست آوردن معادلات نوین پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین (PGA) در گسل‌های امتدادلغز مورد استفاده قرار گرفت. معادلات پیشنهادی، PGA را به پارامترهای لرزه‌ای مختلفی از جمله بزرگی زمین‌لرزه، فاصله منبع تا سایت زمین‌لرزه و متوسط سرعت موج برشی، ارتباط می‌دهد. معادلات بر اساس پایگاه داده‌های گسترده‌ای مربوط به ضبط حرکات نیرومند زمین که به وسیله مرکز تحقیقات مهندسی زمین‌لرزه (PEER) منتشر شده‌اند، ایجاد شده است. برای اعتبار سنجی معادلات پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین، مدل حاصل از نظر ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) با سه مدل شناخته شده مقایسه گردید. آنالیز حساسیت برای تعیین سهم پارامترهای مؤثر و تاثیر آن‌ها بر PGA انجام شد و حساسیت مدل به تغییرات پارامترهای مؤثر، از راه آنالیز پارامتریک مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. معادلات به دست آمده به طور مؤثری قادر به برآورد بیشینه شتاب زمین هستند. معادلات کارایی پیش‌بینی بهتری در مقایسه با روابط مدل‌های دیگر ارائه می‌کنند. معادلات استنتاج شده به طور قابل ملاحظه‌ای ساده و آسان بوده و می‌توان آن‌ها را با اطمینان برای اهداف پیش‌طراحی مورد استفاده قرار داد.

واژگان کلیدی: حرکات نیرومند زمین، بیشینه شتاب زمین، معادلات پیش‌بینی، مدل درختی M5، خطر لرزه‌ای

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از مردم جهان با خطرات ناشی از زمین‌لرزه‌ها روبرو هستند و و جلوگیری از رخداد آن‌ها در آینده شدنی نیست. از این رو پذیرش خطرات و عواقب ناشی از زمین‌لرزه امری ناگزیر است گرچه کاهش اثرات منفی لرزش‌های نیرومند زمین، در قالب کاهش خسارات، صدمات و تلفات انسانی ناشی از آن، امکان‌پذیر است. با آگاهی به این موضوع که زمین‌لرزه پدیده‌ای است غیرقابل پیش‌بینی که نمی‌توان از رخداد آن جلوگیری نمود، به منظور کاهش خسارات این رخداد طبیعی، نیازمند برآورد خطر زمین‌لرزه به‌ویژه در نواحی لرزه‌خیز هستیم.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعات ارزیابی خطر زمین‌لرزه برای یک ساخت‌گاه، پیش‌بینی پارامترهای جنبش نیرومند زمین است که به وسیله‌ی روابط موسوم به روابط کاهندگی یا روابط پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین (Ground Motion Prediction Equations) صورت می‌گیرد. امروزه یکی از برجسته‌ترین اهداف محققین در تحلیل خطر لرزه‌ای یک منطقه مشخص، گزینش مناسب‌ترین و کاراترین رابطه کاهندگی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزاء تحلیل خطر لرزه‌ای و یکی از مراحل

بنیادی در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه است که در این میان، بیشینه شتاب زمین (Peak Ground Acceleration) یکی از پارامترهای اصلی برای ارزیابی ریسک سازه‌ها است.

GMPEs پارامترهای حرکات زمین را به متغیرهای گوناگون مستقلی مانند بزرگی زمین‌لرزه، فاصله منبع تا سایت، شرایط سایت‌های محلی، ویژگی‌های منبع زمین‌لرزه و انتشار موج ارتباط می‌دهند. [۱]، [۲]، [۳] دیگر پارامترهای فیزیکی مانند افت تنش، انتشار گسیختگی، راستا پذیری (سونمانی)، اثرات حوضه و رفتار غیرخطی خاک به‌طور کلی در مدل‌های پیش‌بینی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. [۴] یک‌راه فراگیر برای ساخت GMPEs از داده‌های جنبش نیرومند ثبت‌شده، استفاده از آنالیز رگرسیون است به‌عنوان مثال: Ambraseys, et al. [۵]، Boore, et al. [۶]، Atkinson and Boore [۷] و Campbell and Bozorgnia [۸]. هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین برای گسل‌های امتدادلغز با به‌کارگیری الگوریتم مبتنی بر رگرسیون درختی موسوم به M5 است. بارزترین عوامل نشان‌دهنده رفتار پارامترهای حرکات زمین بر پایه‌ی ادبیات فنی موضوع گزینش شده‌اند به‌عنوان مثال: Campbell and Bozorgnia [۷]، Atkinson and Boore [۹]، Güllü and Erçelebi [۲]، Boore and Atkinson [۱۰]، Kaveh, et al. [۱۱] که در آن M_w بزرگی زمین‌لرزه (بزرگی گشتاوری)، R_{jb} نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر عمودی صفحه گسیختگی گسل (فاصله جویئر-بوور) که تقریباً برابر با فاصله رومرکزی برای زمین‌لرزه‌های $M_w < 6$ است. [۷] و V_{s30} متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی سایت است.

شاخص نشان‌دهنده سبک گسلش از نظر زاویه ریک (Rake) تعریف شده‌است. زاویه ریک به‌عنوان متوسط زاویه لغزش در درجات اندازه‌گیری شده در سطح گسیختگی بین جهت لغزش و بردار لغزش توصیف شده است [۸] که برای گسل امتدادلغز بازه‌های $-150 < \text{Rake} < -180$ ، $30 < \text{Rake} < -30$ و $150 < \text{Rake} < 180$ است.

منبع داده‌های حرکات نیرومند زمین به‌کاررفته برای توسعه GMPEs پایگاه داده‌هایی بود که در پروژه PEER-NGA (Pacific Earthquake Engineering Research Center- Next Generation Attenuation Relationship) به‌وسیله‌ی Power, et al. [۱۲] جمع‌آوری شده بود.

پس از جدا کردن داده‌های مربوط به گسل امتدادلغز، داده‌ها به‌طور تصادفی به دودسته تقسیم شد، یکی ۸۰ درصد برای زیرمجموعه‌های آموزشی (یادگیری) و دیگری ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی. در ادامه پس از تهیه مدل نهایی، برای اعتبارسنجی، مدل ارائه‌شده با ۳ مقاله بیشتر شناخته‌شده در این زمینه: Boore and Atkinson [۹]، Campbell and Bozorgnia [۱۰] و Gandomi, et al. [۱۳] که دارای اشتراک در پارامترهای استفاده‌شده در مدل‌سازی بودند مقایسه شد. از برتری‌های مدل ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان به محاسبه مستقیم PGA به‌جای \ln این مقادیر و نیز برتری در بیشتر موارد به لحاظ ضریب همبستگی و خطاها برحسب نوع گسل اشاره کرد. همچنین آنالیز حساسیت برای تعیین سهم پارامترهای مؤثر بر PGA انجام شد و حساسیت مدل‌ها به تغییرات پارامترهای مؤثر، از راه آنالیز پارامتریک مورد بررسی بیشتر قرار گرفت.

۲- پارامترها و داده‌های ورودی

۲-۲- معرفی پارامترهای ورودی

در این پژوهش بر پایه‌ی مرور ادبیات فنی، ۳ پارامتر در مدل‌سازی معادلات پیش‌بینی PGA به‌کاررفته است. فرمول‌بندی در نظر گرفته‌شده بدین‌صورت است:

$$PGA = f(M_w, R_{jb}, V_{s30}) \quad (1)$$

که در آن:

M_w بزرگی زمین‌لرزه

R_{jb} نزدیکترین فاصله افقی تا تصویر عمودی صفحه گسیختگی گسل (فاصله‌ی جویئر-بور)

V_{s30} متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر بالایی سایت

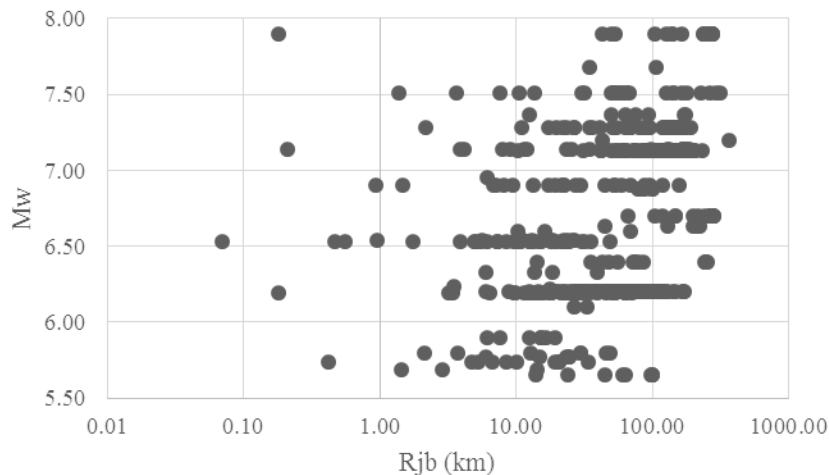
محدوده‌ها و آمارهای پارامترهای درگیر در فرایند مدل‌سازی در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، دامنه‌های متغیرهای پیش‌بینی کننده، به‌ویژه برای بزرگی و فاصله نسبتاً گسترده هستند. گسترده بودن محدوده‌ها نقش مهمی در آنالیز خطر لرزه‌ای دارد.

جدول ۱: آمار توصیفی از متغیرهای مورد استفاده برای ساخت مدل

	Earthquake Magnitude	Joyner-Boore Dist. (km)	Preferred V_{s30} (m/s)	PGA (g)
Mean	6.63	88.85	378.27	0.08
Standard Error	0.02	2.73	6.33	0.00
Median	6.40	69.04	338.60	0.04
Standard deviation	0.55	72.86	168.70	0.12
Variance	0.30	5307.12	28479.85	0.01
Range	2.25	365.07	1311.65	0.96
Min.	5.65	0.07	116.35	0.00
Max.	7.90	365.14	1428.00	0.97

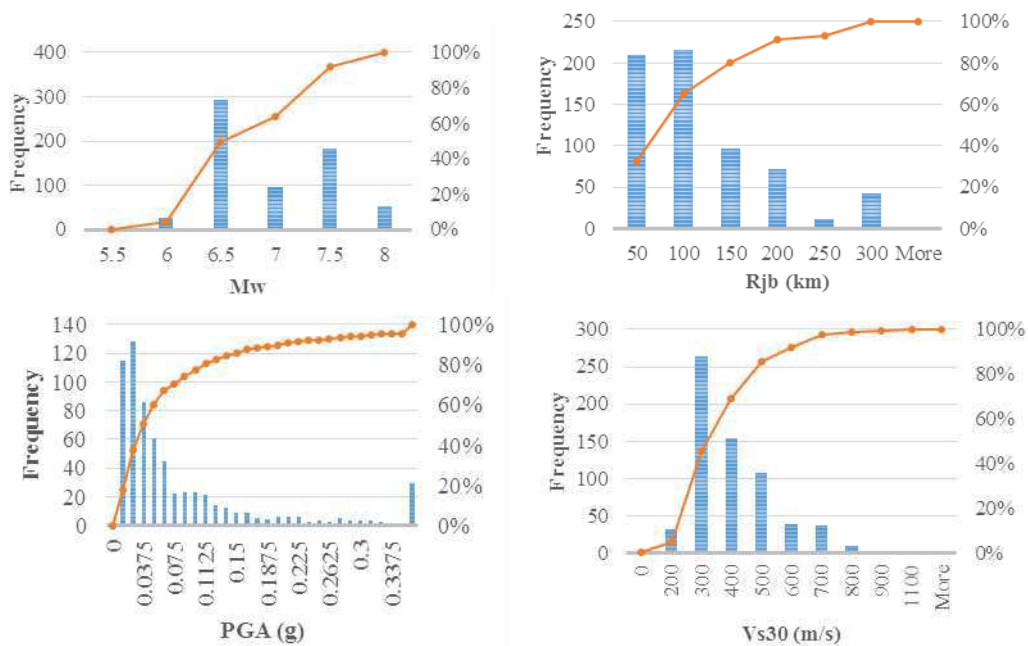
۳-۲- پایگاه داده‌ها

منبع داده‌های حرکات نیرومند زمین به‌کاررفته برای توسعه GMPEs پایگاه داده‌هایی بود که در پروژه PEER-NGA به‌وسیله‌ی Power, et al [۱۲] جمع‌آوری شده بود. پایگاه داده (NGA Flatfile V 7.3) دربرگیرنده داده‌های ثبت‌شده‌ی زمین‌لرزه‌های پوسته‌ای کم‌عمق در مناطق تکتونیکی فعال جهان است. پایگاه داده‌ها طیف گسترده‌ای از بزرگی و فاصله را پوشش می‌دهد. پژوهشگران مختارند که از همه‌ی پایگاه داده‌ها استفاده کنند و یا آنالیزهایشان را به زیرمجموعه‌های گزینشی محدود کنند. در این پژوهش، بخشی از پایگاه داده از آنالیز حذف شده است. مجموعه داده‌های دارای کاستی در پارامترهای مورد استفاده، فاقد اطلاعات مورد نیاز و همچنین نگاشت‌های تکراری موارد حذف‌شده از آنالیز هستند. در نهایت، از مجموع ۳۵۵۱ نگاشت، ۶۴۹ نگاشت مربوط به گسل‌های امتدادلغز برای ایجاد مدل استفاده شد.



نمودار ۱: توزیع داده‌های مورد استفاده برای توسعه معادلات پیش‌بینی

برای تجسم بهتر، نمودار هیستوگرام داده‌ها به وسیله‌ی نمودار ۲ نشان داده شده‌اند:



نمودار ۲: هیستوگرام فراوانی داده‌ها

۴-۲- پیش پردازش داده‌ها

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

$$PGA = \alpha * M_w + \beta * R_{jb} + \gamma * V_{s30} + C \quad (2)$$

که در آن α ، β و γ ضرایب پارامترها و C مقدار ثابت است. در پژوهش‌های گذشته، تاکنون خروجی اکثر GMPEs به صورت \ln مقادیر بیشینه شتاب زمین بوده است که برگرداندن \ln به مقدار واقعی هر کدام از این مقادیر خود باعث بروز خطا شده و دقت و کارکرد مدل را با چالش روبرو می‌سازد. از این رو در این پژوهش برای آسان‌تر شدن فهم معادله و اینکه تغییر هر پارامتر چه تأثیری در مقدار نهایی PGA دارد، معادله خروجی به صورت رابطه (۵) تغییر یافته است. به این منظور نخست از همه پارامترهای ورودی و خروجی \ln گرفته شده و سپس مدل می‌شود؛ مانند رابطه (۳) و در نهایت \ln از هر دو سوی رابطه به نحوی که در رابطه (۴) آمده است حذف می‌گردد.

$$\ln PGA = \alpha * \ln M_w + \beta * \ln R_{jb} + \gamma * \ln V_{s30} + C \quad (3)$$

$$\exp(\ln PGA) = \exp(\alpha * \ln M_w + \beta * \ln R_{jb} + \gamma * \ln V_{s30} + C) \quad (4)$$

$$PGA = M_w^\alpha * R_{jb}^\beta * V_{s30}^\gamma * \exp C \quad (5)$$

پس در نخستین گام از پیش پردازش داده‌ها، از همه پارامترهای موردنظر ورودی و خروجی ۶۴۹ داده گزینش شده، \ln گرفته شد. سپس برای آنالیز، به طور تصادفی ۸۰ درصد داده‌ها به زیرمجموعه‌های آموزشی و ۲۰ درصد داده‌ها به زیرمجموعه

آزمایشی اختصاص یافت که شمار داده‌های اختصاص یافته برای هر یک از این زیرمجموعه‌ها به ترتیب ۵۱۹ و ۱۳۰ است. داده‌های یادگیری برای آموزش الگوریتم آماده شدند و داده‌های اعتبارسنجی برای مشخص کردن توانایی تعمیم مدل‌ها بر روی داده‌هایی که برای آن‌ها آموزش نمی‌بینند مورد استفاده قرار گرفتند؛ بنابراین، هم داده‌های یادگیری و هم داده‌های اعتبارسنجی در فرایند مدل‌سازی، درگیر بودند. برای اندازه‌گیری کارکرد مدل‌های به‌دست‌آمده به‌وسیله‌ی M5، داده‌های آزمون که هیچ نقشی در ساخت مدل‌ها نداشتند، در مدل نهایی قرار گرفته و مقادیر خطا و ضریب همبستگی که در بخش بعدی توضیح داده شده است به دست آمد. به‌منظور به دست آوردن یک دسته‌بندی داده‌ها، چندین ترکیب از مجموعه‌های آموزشی و آزمون مدنظر قرار گرفت. گزینش به‌گونه‌ای بود که بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف استاندارد پارامترها، در مجموعه داده‌های آموزشی و آزمون سازگار باشد.

۵-۲- اعتبارسنجی

بر پایه‌ی مرور ادبیات فنی موضوع، سه پارامتر عمده که در اکثر مطالعات به‌عنوان پارامترهای اعتبارسنجی مدل‌ها از آن استفاده شده است، ضریب همبستگی (Coefficient Correlation)، میانگین ریشه مربعات خطا (Root Mean Square Error) و میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error) است و به این شکل محاسبه می‌شود:

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

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

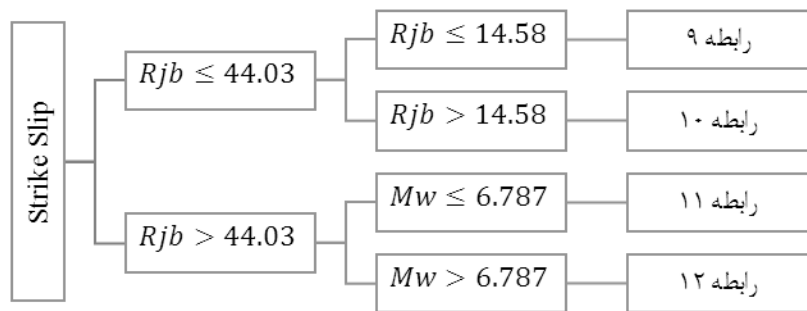
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - t_i| \quad (8)$$

که در آن 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 نمونه و n تعداد نمونه است. مقدار CC به‌تنهایی شاخص خوبی برای دقت پیش‌بینی یک مدل نیست. دلیل این است که با تغییر مقادیر خروجی از یک مدل مقدار CC به همان اندازه تغییر نخواهد کرد. مقادیر بالاتر CC و مقادیر پایین‌تر $RMSE$ و MAE نشان‌دهنده یک مدل دقیق‌تر است.

۳- نتایج و تجزیه و تحلیل مدل

۳-۱- مدل‌های پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین بر پایه‌ی الگوریتم M5

در این بخش مدل‌های به‌دست‌آمده به روش الگوریتم درختی M5 برای بیشینه شتاب زمین برای گسل‌های امتدادلغز به همراه شکل درخت آمده است. سپس نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر به‌دست‌آمده به‌وسیله‌ی مدل برای مجموعه داده‌های آزمایشی و مجموعه داده‌های اعتبارسنجی رسم شده است.



$$\text{for } R_{jb} \leq 14.58$$

$$PGA = M_w^{0.444} * R_{jb}^{-0.146} * V_{s30}^{-0.031} * 1.653 * 10^{-1} \quad (9)$$

$$\text{for } 14.58 < R_{jb} \leq 44.03$$

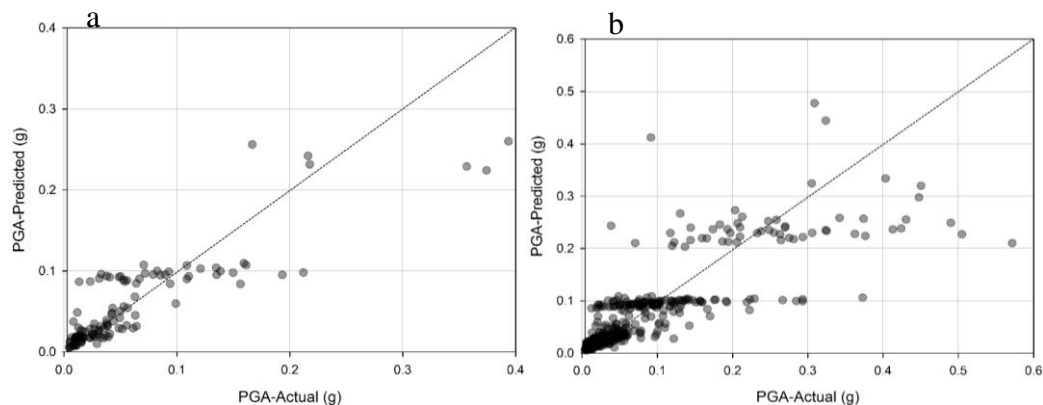
$$PGA = M_w^{0.444} * R_{jb}^{-0.127} * V_{s30}^{-0.031} * 7.608 * 10^{-2} \quad (10)$$

$$\text{for } R_{jb} > 44.03 \text{ \& } M_w \leq 6.787$$

$$PGA = M_w^{0.708} * R_{jb}^{-0.816} * V_{s30}^{-0.457} * 2.444 \quad (11)$$

$$\text{for } R_{jb} > 44.03 \text{ \& } M_w > 6.787$$

$$PGA = M_w^{0.84} * R_{jb}^{-1.052} * V_{s30}^{-0.052} * 1.666 \quad (12)$$



نمودار ۳: PGA اندازه گیری شده در برابر PGA به دست آمده به وسیله مدل $M5$ برای گسل امتداد لغز در (a) مجموعه داده های آموزشی و (b) مجموعه داده های آزمایشی

۲-۳- مقایسه با مدل های دیگر

برای اعتبارسنجی، مدل های ارائه شده برای پیشینه شتاب زمین (PGA)، 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، [۹] Campbell and Bozorgnia، [۱۰] و [۱۳] Gandomi, et al که دارای اشتراک در پارامترهای استفاده شده در مدل سازی بودند مقایسه شد. از برتری های مدل ارائه شده در این پژوهش می توان به محاسبه مستقیم PGA به جای \ln این مقادیر، سادگی مدل و نیز برتری در بیشتر موارد از نظر ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا ($RMSE$) و

میانگین خطای 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 فرآیند ابداع مدل‌های حاضر انجام شده است. همانطور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، در بیشتر 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 [۱۴]؛ بنابراین مدل می‌تواند به عنوان بسیار خوب در نظر گرفته شود. مدل $M5$ با CC بالا و مقادیر $RMSE$ و MAE کم قادر به پیش‌بینی مقادیر هدف تا میزان قابل قبولی از صحت هستند. شایان ذکر است که مقادیر $RMSE$ و MAE نه تنها کم می‌باشند بلکه تا جایی که برای مجموعه‌های آموزشی و آزمون مقدور است، مشابه‌اند. این نشان می‌دهد که مدل‌های ارائه شده دارای توانایی پیش‌بینی مقادیر کم و عملکرد تعمیم مقادیر مشابه است. [۱۵]

جدول ۲: مقایسه مدل $M5$ با ۳ مدل دیگر PGA برای داده‌های آموزشی و آزمایشی در گسل امتدادلغز

Data Set	PGA Model	Campbell-Bozorgnia-2008	Boore-Atkinson-2008	Gandomi-Alavi-2011	M5
	Error / Unit	g	g	cm/s ²	g
Train	CC	0.8268	0.8129	0.8162	0.8043
	MAE	0.5195	0.6253	0.8023	0.0303
	RMSE	0.6523	0.7655	0.9885	0.0696
Test	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

۳-۳- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت برای دریافتن این است که هر یک از پارامترهای ورودی از جمله بزرگی زمین‌لرزه، فاصله جویز-بور و متوسط سرعت موج برشی، در ایجاد مدل چه اندازه تأثیر دارند. به این منظور، بر روی مدل پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA ، آنالیز حساسیت انجام شد.

روش انجام آنالیز حساسیت برای هر پارامتر ورودی در یک گسل به این شکل است که از داده‌های 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، مدل‌سازی انجام می‌شود. پس از آن داده‌های آزمایشی بر روی مدل جدید پیاده شده و ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا ($RMSE$) و میانگین خطای مطلق (MAE) محاسبه می‌گردد.

در جدول ۳ آنالیز حساسیت بیشینه شتاب زمین در گسل امتدادلغز برای پارامترهای M_w ، V_{s30} و R_{jb} مطابق روشی که گفته شد محاسبه شده است.

جدول ۳: آنالیز حساسیت بیشینه شتاب زمین برای گسل امتدادلغز

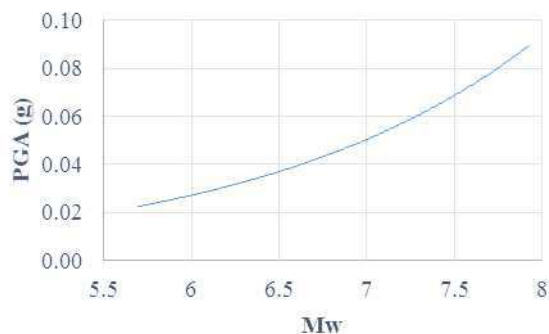
Model tree in absence of	CC	MAE	RMSE
-	0.9106	0.0364	0.0856
M_w	0.8903	0.0429	0.0909
R_{jb}	0.1618	0.0702	0.1549
V_{s30}	0.9089	0.0406	0.0865

مشاهده می‌شود که 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. پس از پارامتر فاصله R_{jb} که بیشترین تأثیر را در ایجاد مدل دارد، پارامتر M_w به نسبت V_{s30} تأثیر بیشتری در ایجاد مدل پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین دارد.

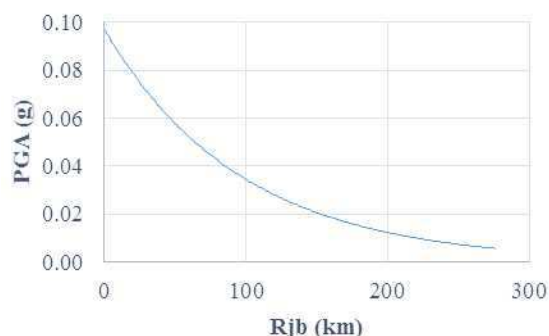
۴-۳- بررسی پارامتریک

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 مدل پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین PGA ، تنها یک متغیر پیش‌بینی کننده تغییر می‌کند در حالی که دیگر متغیرهای لرزه‌ای 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 می‌توان نمودارهای برازش این مقادیر در برابر پارامتری که ثابت نبوده است را رسم نمود. توانمندی معادلات ارائه شده با بررسی اینکه مقادیر پیش‌بینی شده چه اندازه با رفتار فیزیکی اساسی سیستم مورد بررسی هم‌خوانی دارد تعیین شده است. [۱۶]

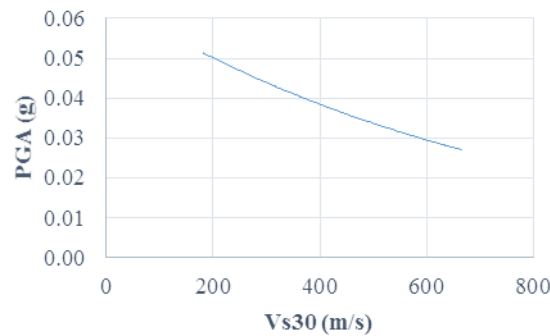
نمودارهای ۴ تا ۶، به ترتیب، روند تغییرات پیش‌بینی‌های مدل PGA را با تغییرات پارامترهای لرزه‌ای، M_w ، R_{jb} و V_{s30} نشان می‌دهند. نتایج آنالیز پارامتریک نشان می‌دهد که PGA همواره با افزایش M_w افزایش می‌یابد و با افزایش R_{jb} و V_{s30} کاهش می‌یابد که این نتایج از دید زمین‌لرزه‌شناسی همگی مورد انتظار بوده‌اند. [۵]، [۶]، [۷]، [۸] و تأیید می‌کند که معادلات طرح پیشنهادی برای بیشینه شتاب زمین PGA توانمند هستند و می‌توانند با اطمینان به منظور پیش‌گویی در مطالعات خطر لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.



نمودار ۴: اثر افزایش M_w بر بیشینه شتاب زمین بر پایه‌ی مدل $M5$



نمودار ۵: اثر افزایش R_{jb} بر بیشینه شتاب زمین بر پایه‌ی مدل $M5$



نمودار ۶: اثر افزایش V_{s30} بر بیشینه شتاب زمین بر پایه‌ی مدل M5

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش با عنایت به اهمیت تحلیل خطر زمین‌لرزه و به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای حرکات نیرومند زمین به خصوص بیشینه شتاب زمین (PGA) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعات ارزیابی خطر زمین‌لرزه، از یک روش داده‌کاوی مبتنی بر رگرسیون درختی موسوم به M5 بهره‌برده شد. GMPEs پیشنهادی بر اساس گزینش ۶۴۹ نگاشت زمین‌لرزه با گسل امتدادلغز از پایگاه داده‌های گسترده‌ای شامل ۳۵۵۱ نگاشت زمین‌لرزه از سراسر جهان، جمع‌آوری شده در پروژه PEER-NGA ساخته شد. پارامترهای ورودی M_w بزرگی زمین‌لرزه، R_{jb} نزدیک‌ترین فاصله افقی تا تصویر عمودی صفحه گسیختگی گسل (فاصله‌ی جویئر-بور) و V_{s30} متوسط سرعت موج‌برشی در ۳۰ متر بالایی سایت به‌عنوان پارامترهایی کارآمد بر پایه ادبیات فنی موضوع در تهیه مدل پیش‌بینی بیشینه شتاب زمین به کار گرفته شد. برای تهیه مدل، داده‌های انتخابی به زیرمجموعه‌های ۸۰ و ۲۰ درصدی آموزشی و اعتبارسنجی تقسیم و مدل با به‌کارگیری زیرمجموعه داده‌های آموزشی ایجاد شد.

معادلات پیشنهادی در این پژوهش برآوردهای قابل اعتمادی از مقادیر PGA را ارائه می‌دهند و شرایط و معیارهای مختلف مد نظر برای اعتبارسنجی را تأمین می‌کنند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: برتری در بیشتر موارد از نظر ضریب همبستگی (CC)، میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در مقایسه با چند مدل سرشناس در ادبیات فنی موضوع که برای منطقی بودن مقایسه، از لحاظ پارامترهای ورودی با مدل پیشنهادی این پژوهش اشتراک داشتند.

هم‌خوانی نتایج آنالیز پارامتریک انجام‌شده بر روی زیرمجموعه‌ی داده‌های آزمون با رفتارهای مورد انتظار از دید زمین‌لرزه‌شناسی به این گونه که PGA همواره با افزایش M_w افزایش و با افزایش R_{jb} و V_{s30} کاهش می‌یابند. آنالیزهای حساسیت و پارامتریک تضمین می‌کنند که معادلات پیشنهادی به نحو کارآمدی روابط فیزیکی اساسی حاکم بر سیستم را در نظر می‌گیرند. نتایج حساسیت و پارامتریک به‌روشنی نشان می‌دهند که معادلات استنتاج شده تنها ترکیباتی از متغیرهای پیش‌بینی کننده نیستند که به صورت تصادفی بهترین تناسب را با نتایج تجربی داشته باشند.

GMPEs مبتنی بر M5 می‌توانند با اطمینان برای اهداف برنامه‌ریزی و طراحی عملی مورد بهره‌برداری قرار گیرند. نظر به اینکه آن‌ها بر روی یک پایگاه داده‌های جامع با طیف گسترده‌ای از خواص توسعه یافته‌اند. معادلات پیشنهادی به‌طور چشمگیری ساده و جایگزین‌های کارآمدی برای معادلات بسیار پیچیده‌ی ارائه‌شده توسط NGA هستند. افزون بر سادگی روابط، محاسبه‌ی مستقیم بیشینه شتاب زمین (PGA) برخلاف اکثر مدل‌های پیش‌بینی حرکات نیرومند زمین به‌عنوان یکی از برتری‌های مدل پیش‌بینی ارائه‌شده در این پژوهش است.

مراجع

- [1] J. Douglas, "Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates," *Earth-Science Reviews*, vol. 61, pp. 43-104, 2003.
- [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] S. L. Kramer, *Geotechnical earthquake engineering*: Pearson Education India, 1996.
- [4] P. Somerville and R. Graves, "Characterization of earthquake strong ground motion," in *Landslide Tsunamis: Recent Findings and Research Directions*, ed: Springer, 2003, pp. 1811-1828.
- [5] N. N. Ambraseys, K. u. Simpson, and J. J. Bommer, "Prediction of horizontal response spectra in Europe," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 25, pp. 371-400, 1996.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] G. N. Smith, *Probability and statistics in civil engineering*: Collins London, 1986.
- [15] 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.
- [16] 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.