

چکیده

در این مقاله، با استفاده از یک روش احتمالاتی به انتخاب و مقیاس سازی بهینه‌ی شتاب‌نگاشت‌های موردنیاز در تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی کارایی این روش در حداقل نمودن خطا و پراکندگی پاسخ‌های غیرخطی سازه‌ای و همچنین مقایسه‌ی این روش با روش آئین‌نامه‌ی لرزه‌ای ایران است. روش استفاده شده در این مقاله استفاده از ترکیب عددی و لحاظ نمودن زمان تناوب و ضریب رفتار سازه می‌باشد. در این روش بهینه‌ترین شتاب‌نگاشت‌ها انتخاب و مقیاس سازی آن‌ها به گونه‌ای انجام می‌گیرد که ضمن حداقل شدن پراکندگی پاسخ‌های غیرخطی، میانگین پاسخ‌های خطی نیز بر طیف زلزله طرح منطبق شده و ماهیت لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌ها حفظ شود. بررسی نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی قاب‌های فولادی چند درجه آزادی و مقدار عددی پراکندگی پاسخ‌های سازه‌ای نسبت به پاسخ متوسط، نشان‌دهنده‌ی کارایی این روش در کاهش پراکندگی پاسخ‌های سازه‌ای در هر دو ناحیه‌ی خطی و غیرخطی در مقایسه با روش آئین‌نامه‌ی لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق، نتایج پاسخ‌های لرزه‌ای روش احتمالاتی در مقایسه با نتایج حاصل از آئین‌نامه‌ی لرزه‌ای ایران دارای پراکندگی کمتری بوده و استفاده از پاسخ متوسط حاصل از آن می‌تواند بیانگر اثر واقعی زلزله در سازه‌ها باشد.

کلمات کلیدی: شتاب‌نگاشت، تاریخچه زمانی شتاب، تحلیل دینامیکی غیرخطی، انتخاب و مقیاس سازی، طیف پاسخ، زلزله طرح

یادداشت تحقیقی

انتخاب و مقیاس سازی بهینه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها برای تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها

حمید نظری

دانش‌آموخته مهندسی سازه، دانشگاه ملایر

جلال اکبری (نویسنده مسؤول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملایر،

akbari@malayeru.ac.ir

۱- مقدمه

شتاب‌نگاشت‌ها و روش مقیاس سازی آن‌ها وابسته است. از این رو انتخاب و مقیاس سازی شتاب‌نگاشت‌ها یک بحث مهم و جدی در مهندسی سازه و زلزله است که در چهار دهه‌ی اخیر بسیار مورد توجه بوده است. هدف مشترک تمامی مطالعات انجام شده در زمینه‌ی انتخاب و مقیاس سازی، کاهش پراکندگی در نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی و قابل اطمینان ساختن پاسخ‌های سازه‌ای می‌باشد. گام اول انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها است که باید با توجه به مشخصات لرزه‌ای ساختگاه و طرح موردنظر انجام شود. از جمله مشخصات مهم و مؤثر در انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها می‌توان به بزرگای، فاصله از رومرکز^۱، نوع خاک و سازوکار گسل اشاره کرد که تمامی مطالعات بر اهمیت در

به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های موجود و طراحی لرزه‌ای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، باید نیروی ناشی از زلزله با روشی مناسب به سازه اعمال شده و با انجام تحلیل غیرخطی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه محاسبه شوند. روش تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی با اثر دادن شتاب زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه‌ی ساختمان، واقعی‌ترین رفتار را از وقوع زلزله شبیه سازی می‌کند و به عنوان دقیق‌ترین روش در این زمینه شناخته می‌شود. این روش نیازمند تعدادی شتاب‌نگاشت زلزله است که پس از انتخاب، برای هماهنگ شدن با طرح موردنظر مقیاس سازی شده و به عنوان ورودی تحلیل مورد استفاده قرار گیرند. دقت نتایج حاصل از این روش کاملاً به مشخصات این

کشور ایران، در این مقاله ضمن استفاده از داده‌های شتاب‌نگاشتی ایران، با انجام مقایسه بین نتایج حاصل از این روش و روش استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۸]، دقت روش‌های آئین‌نامه‌ای در زمینه‌ی انتخاب و مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها بررسی شده است.

۲- روش احتمالاتی نوین

در سال ۲۰۱۲ آی و آکار روشی نوین [۹] در زمینه‌ی انتخاب و مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها، با هدف کاهش پراکندگی پاسخ‌های لرزه‌ای نسبت به پاسخ متوسط در ناحیه‌ی رفتار غیرخطی ارائه نمودند. این روش با استفاده از ترکیب عددی و بررسی انحراف معیار شتاب‌نگاشت‌ها و در نظر گرفتن تناوب اصلی و ضریب رفتار سازه به انتخاب بهینه‌ترین شتاب‌نگاشت‌ها متناسب با طرح موردنظر و مشخصات سازه می‌پردازد. بر اساس گزارش آی و آکار، روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین از دقت بالاتری در ناحیه‌ی رفتار غیرخطی برخوردار است، لیکن بررسی روش خود را برای قاب‌های کوتاه و بتنی انجام دادند و نتایج آن را با روش‌های نوین دیگر مانند CMS و MPS مقایسه نمودند. در این مقاله ضمن تشریح روش پیشنهادی آی و آکار، به بررسی دقت نتایج آن در سازه‌های فولادی کوتاه و بلند پرداخته شده است و همچنین مقایسه‌ای کاربردی بین نتایج این روش و روش آئین‌نامه‌ی لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) که مشابه با روش آئین‌نامه‌ی آمریکا [۱۰] می‌باشد، انجام شده است. در ادامه به تشریح روش پیشنهادی در زمینه‌ی انتخاب و مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها پرداخته می‌شود.

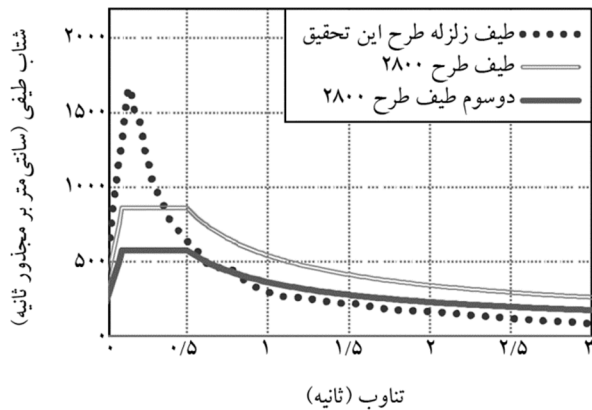
۳- مراحل روش استفاده شده در این تحقیق

۳-۱- زلزله طرح

به‌طور کلی انتخاب و مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها در همه‌ی روش‌ها بر اساس یک زلزله طرح انجام می‌شود که بیانگر زلزله‌ی مورد انتظار در یک ساختگاه است. انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به مشخصات لرزه‌ای زلزله طرح انجام

نظرگیری آن‌ها تأکید داشته‌اند. گام دوم مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده به منظور هماهنگ کردن آن‌ها با طرح موردنظر است. اولین مطالعات [۱] در این زمینه از پیشینه شتاب، سرعت و جابه‌جایی در شتاب‌نگاشت‌ها برای مقیاس‌سازی استفاده می‌کردند. مطالعات بعد نشان دادند که مقادیر پیشینه نمی‌توانند نمایانگر مقدار انرژی حاصل از یک زلزله باشند و استفاده از آن‌ها باعث پراکندگی زیاد در پاسخ‌های لرزه‌ای می‌شود، لذا استفاده از شدت طیفی که به صورت مساحت زیرمنحنی طیف پاسخ سرعت شتاب‌نگاشت‌ها تعریف می‌شود را با توجه به تناوب و مقاومت سازه، برای مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها و حداقل نمودن پراکندگی پاسخ‌های سازه‌ای پیشنهاد کردند [۲]. استفاده از شدت طیفی در ناحیه‌ی رفتار خطی، دقت قابل قبولی در پی داشت، لیکن با ورود سازه به ناحیه با رفتار غیرخطی از دقت آن کاسته می‌شد. به همین دلیل استفاده از شتاب طیفی حاصل از طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها در تناوب اصلی سازه با هدف بهبود دقت نتایج در ناحیه‌ی رفتار غیرخطی مطرح شد [۳]. استفاده از شتاب طیفی شتاب‌نگاشت‌ها مبنای بیشتر مطالعات بعدی قرار گرفت و تنها سعی شد با ارائه‌ی الگوریتم‌ها و روش‌های جدید و استفاده از شتاب طیفی در بازه‌های تناوبی مختلف و لحاظ نمودن مشخصات سازه‌ای به انتخاب شتاب‌نگاشت‌های بهینه و افزایش دقت پاسخ‌های لرزه‌ای و کاهش پراکندگی آن‌ها نسبت به طرح موردنظر به‌ویژه در ناحیه‌ی غیرخطی پرداخته شود. از این میان می‌توان به استفاده از الگوریتم ژنتیکی [۴]، انتخاب و مقیاس‌سازی نیمه‌خودکار [۵]، استفاده از طیف طرح CMS [۶] و یا روش مبتنی بر تحلیل بار افزون^۲ (MPA) [۷] اشاره نمود. با توجه به وقوع زلزله‌های شدید و اهمیت احداث سازه‌های شکل‌پذیر غیرخطی شدن رفتار سازه را بسیار محتمل می‌کند. در این مقاله با استفاده از یک روش احتمالاتی به انتخاب و مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها پرداخته شده است و میزان کارایی این روش در کاهش پراکندگی پاسخ‌های لرزه‌ای، به‌ویژه در سازه‌های بلند و ناحیه‌ی رفتار غیرخطی ارزیابی شده است. همچنین با توجه به لرزه‌خیزی

قابل ذکر است که شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این مقاله از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن [۱۱] تهیه شده‌اند. شکل (۱) نیز طیف زلزله طرح با میانگین بزرگای گشتاوری ۶/۵ و میانگین فاصله از رومرکز ۲۰ کیلومتر برای میرایی ۵ درصد را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ نیز آورده شده است.



شکل (۱): طیف زلزله طرح

در شکل (۱) مشاهده می‌شود که طیف زلزله طرح تعریف شده در این تحقیق، مطابقت خوبی با طیف کاهش یافته استاندارد ۲۸۰۰ در تناوب‌های بیش از ۰/۵ ثانیه دارد. قابل ذکر است که طیف استاندارد ۲۸۰۰ یک طیف عمومی بوده و مشخصات لرزه‌ای مانند بزرگای و فاصله از رومرکز در آن مبهم است و انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس آن با ابهام و عدم قطعیت همراه است.

۲-۳- انتخاب شتاب‌نگاشت‌های اولیه

روش احتمالاتی، انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها را طی دو مرحله انجام می‌دهد. در مرحله‌ی اول تعداد ۲۰ شتاب‌نگاشت اولیه با توجه به مشخصات زلزله طرح انتخاب می‌شود. بدین منظور، محدوده‌ی مجاز برای بزرگای و فاصله از رومرکز شتاب‌نگاشت‌ها مطابق با روابط ۱ و ۲ در نظر گرفته می‌شود.

$$0.75M_{scenario} \leq M \leq 1.25M_{scenario} \quad (1)$$

$$d_{scenario} - 25km \leq d \leq d_{scenario} + 25km \quad (2)$$

در روابط فوق $M_{scenario}$ بزرگای گشتاوری زلزله طرح، M

می‌شود و همچنین مقیاس سازی شتاب‌نگاشت‌ها به منظور مطابقت با زلزله طرح صورت می‌پذیرد. در روش آی و آکار، زلزله طرح با استفاده از انجام تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی^۳ (PSHA) در محل احداث سازه تعیین می‌شود که منجر به تهیه‌ی طیف طراحی ویژه با بزرگای و فاصله از رومرکز مشخص خواهد شد. انجام تحلیل خطر نیازمند بررسی گسل‌های فعال در محدوده‌ی یک ساختگاه و همچنین موجود بودن داده‌های شتاب‌نگاشتی کافی در منطقه‌ی ساختگاه می‌باشد و معمولاً در سازه‌های خاص و با اهمیت بالا انجام می‌شود. لذا در این مقاله با توجه به بررسی سازه‌های ساختمانی متعارف و همچنین کافی نبودن داده‌های شتاب‌نگاشتی به دلیل محدود کردن تحقیق به استفاده از داده‌های لرزه‌ای ایران، از یک طیف میانگین حاصل از زلزله‌های نسبتاً شدید ثبت شده در ایران به عنوان زلزله طرح استفاده شده است. این طیف با استفاده از ۱۱ زوج شتاب‌نگاشت ثبت شده در خاک نوع ۲ با سرعت موج برشی بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه و حداقل بیشینه‌ی شتاب ۰/۳ شتاب ثقل و حداقل بزرگای گشتاوری^۴ ۵/۳ تهیه شده است. در جدول (۱) مشخصات زلزله‌های استفاده شده برای تعریف زلزله طرح آورده شده است.

جدول (۱): شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده برای تعریف زلزله طرح

زلزله	بزرگای گشتاوری	فاصله از رومرکز (کیلومتر)	بیشینه شتاب (سانتی‌متر بر مجذور ثانیه)
ناغان	۶/۲	۵	۸۷۲
طبس	۷/۲	۵۴	۸۹۸
آب بر	۷/۵	۴۱	۶۳۵
زنجیران	۵/۸	۱۲	۱۰۰۶
کریق	۶/۰	۱۱	۶۱۶
حاجی‌آباد	۵/۸	۳۷	۳۶۸
بم	۶/۹	۶	۷۹۹
قائمیه	۵/۸	۱۸	۳۳۵
ورزقان	۶/۱	۱۹	۴۲۷
ورزقان	۶/۲	۱۱	۵۳۲
ورزقان	۵/۳	۱۲	۳۳۱

این تحقیق برای محاسبه‌ی انحراف معیار هر یک از ترکیب‌ها ابتدا یک پارامتر با نام ε مطابق با رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود.

$$\varepsilon = \ln(P\hat{S}a_i) - \ln(P\hat{S}a_j) \quad (۴)$$

در این رابطه، $P\hat{S}a_i$ شتاب طیفی شتاب‌نگاشت i ام در تناوب اصلی سازه برای میرایی ۵ درصد است و $P\hat{S}a_j$ میانگین شتاب طیفی متناظر شتاب‌نگاشت j ام در تناوب اصلی سازه است که از معادلات GMPE به دست می‌آید. معادلات GMPE از تحلیل آماری تعداد زیادی شتاب‌نگاشت با بزرگ، فاصله از رومرکز، نوع خاک و سازوکار گسل مختلف در یک منطقه‌ی جغرافیایی به دست می‌آیند و برای تخمین مقادیر میانگین بیشینه شتاب، سرعت و جابه‌جایی و همچنین مقادیر پاسخ‌های طیفی و انجام تحلیل خطر لرزه‌ای در یک ساختگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش احتمالاتی از معادلات GMPE به منظور تعریف سطوح جداگانه برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها استفاده می‌شود تا از مقیاس‌سازی تمامی شتاب‌نگاشت‌ها به یک سطح مشترک اجتناب شده و ماهیت لرزه‌ای آن‌ها حفظ شود. معادلات استفاده شده در این مقاله توسط آکار و بومر [۱۲] به منظور تخمین شتاب طیفی و بیشینه سرعت در مناطق اروپا، مدیترانه و خاورمیانه پیشنهاد شده‌اند. پس از محاسبه‌ی ε برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها، انحراف معیار هر یک از ترکیب‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\varepsilon - \mu_\varepsilon)^2} \quad (۵)$$

در این رابطه، n تعداد شتاب‌نگاشت‌های بهینه و برابر با ۱۰ و μ_ε میانگین حسابی مقادیر ε در هر ترکیب است. رابطه‌ی (۵) برای تمامی ۱۸۴۷۵۶ ترکیب محتمل محاسبه شده و ترکیبی که کمترین مقدار انحراف معیار را نتیجه دهد، ترکیب بهینه و شامل شتاب‌نگاشت‌های مناسب برای تحلیل سازه خواهد بود. با توجه به تعداد بسیار زیاد ترکیب‌ها و زمان‌بر بودن محاسبات انحراف معیار، انتخاب ترکیب بهینه نیازمند استفاده از رایانه است. بدین منظور برنامه‌ای کاربردی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB [۱۳] نوشته شده است که با دریافت شتاب‌نگاشت‌های اولیه،

بزرگای گشتاوری شتاب‌نگاشت‌ها، $d_{scenario}$ فاصله از رومرکز زلزله طرح و d فاصله از رومرکز شتاب‌نگاشت‌ها می‌باشد. قابل ذکر است که تعداد ۲۰ داده بر اساس پایدار شدن پراکندگی و حداقل شدن زمان محاسبات انتخاب شده است. با توجه به این روابط، در این مقاله ۲۰ شتاب‌نگاشت ثبت شده در خاک نوع دو انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفته است. قابل ذکر است که در این مقاله از پارامتر سازوکار گسل با توجه به گزارش نشدن این پارامتر توسط شبکه شتاب‌نگاری ایران در فرآیند انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها استفاده نشده است.

۳-۳- انتخاب شتاب‌نگاشت‌های بهینه

در مرحله‌ی دوم انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها، تعداد ۱۰ شتاب‌نگاشت بهینه از میان ۲۰ شتاب‌نگاشت اولیه برای مقیاس‌سازی و انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی انتخاب می‌شوند. این تعداد با بررسی سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه و همچنین رعایت حداقل‌های آیین‌نامه‌ای انتخاب شده است. روش آی و آکار از یک ترکیب عددی برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های بهینه استفاده می‌کند. اگر تعداد شتاب‌نگاشت‌های اولیه را با k و تعداد شتاب‌نگاشت‌های بهینه را با n نشان دهیم، تعداد ترکیبات محتمل بین k و n که با C نشان داده می‌شود، بدون لحاظ کردن ترکیبات تکراری از رابطه‌ی (۳) به دست خواهد آمد.

$$C(k, n) = \frac{k!}{n!(k-n)!} \quad 0 \leq n \leq k \quad (۳)$$

با توجه به رابطه‌ی (۳)، تعداد ترکیبات محتمل بین شتاب‌نگاشت‌های اولیه و شتاب‌نگاشت‌های بهینه برابر با ۱۸۴۷۵۶ ترکیب خواهد بود؛ یعنی از میان ۲۰ شتاب‌نگاشت اولیه تعداد ۱۸۴۷۵۶ ترکیب شامل ۱۰ شتاب‌نگاشت بدون تکرار قابل جداسازی است. پس از محاسبه‌ی تعداد ترکیبات محتمل باید ترکیب بهینه شناسایی شده و شتاب‌نگاشت‌های موجود در آن به عنوان انتخاب نهایی مقیاس‌سازی شوند. ترکیب بهینه ترکیبی است که دارای حداقل انحراف معیار باشد. انحراف معیار نشان‌دهنده‌ی پراکندگی شتاب‌نگاشت‌های موجود در هر ترکیب است و حداقل بودن آن باعث کاهش خطا در پاسخ‌های سازه‌ای خواهد شد. در

این نتیجه رسیدند که استفاده از بیشینه سرعت در شتاب‌نگاشت‌ها برای مقیاس‌سازی در ناحیه‌ی رفتار غیرخطی نتایج مطلوبی را به همراه داشته است، از این رو با تحلیل آماری ۲۶۰ شتاب‌نگاشت و استفاده از بیشینه سرعت پارامتری جدید مطابق با رابطه (۸) تعریف کردند که ترکیبی از رابطه‌ی (۴) و بیشینه سرعت می‌باشد.

$$\varepsilon_I = C1 * \varepsilon + C2 * \varepsilon_{PGV} + C3 \quad (۸)$$

در رابطه‌ی (۸)، ε_{PGV} اختلاف لگاریتمی بیشینه سرعت است و از رابطه‌ی (۹) حساب می‌شود.

$$\varepsilon_{PGV} = \ln(PGV_i) - \ln(\hat{PGV}_i) \quad (۹)$$

در رابطه‌ی (۹)، PGV_i بیشینه سرعت در شتاب‌نگاشت i ام و \hat{PGV}_i میانگین بیشینه سرعت برای شتاب‌نگاشت i ام است که از معادلات GMPE استخراج می‌شود. ضرایب $C1$ ، $C2$ و $C3$ تابع زمان تناوب اصلی و ضریب رفتار سازه بوده و از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{cases} C1 = 1 - 0.72 \ln(R) + 0.7T \ln(R) - 0.21T^2 \ln(R) \\ C2 = 0.81 \ln(R) - 0.78T \ln(R) + 0.23T^2 \ln(R) \\ C3 = 0.22 \ln(R) - 0.4T \ln(R) + 0.15T^2 \ln(R) \end{cases} \quad (۱۰)$$

در این روابط، T تناوب اصلی سازه برحسب ثانیه و R ضریب رفتار سازه است. با استفاده از رابطه‌ی (۸) به جای رابطه‌ی (۴)، می‌توان شتاب‌نگاشت‌ها و ضرایب مقیاس بهینه را برای رفتار غیرخطی به دست آورد. برنامه‌ی نوشته شده در محیط MATLAB محاسبات را به صورت کامل برای رفتار غیرخطی نیز مشابه با رفتار خطی انجام داده و شتاب‌نگاشت‌های بهینه با کمترین انحراف معیار و ضرایب مقیاس برای هر یک از آن‌ها را ارائه می‌دهد. قابل ذکر است که انجام محاسبات با این برنامه، در یک رایانه‌ی معمولی با ۴ گیگابایت حافظه حدود ۸۰ ثانیه زمان نیاز دارد.

۴- مدل‌های سازه‌ای

به منظور بررسی نتایج حاصل از روش آی و آکار و همچنین مقایسه با روش استاندارد ۲۸۰۰ ایران، قاب‌های خمشی فولادی در حالت دویعدی مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. با توجه به وابستگی

تمامی ترکیبات محتمل را تعیین کرده و انحراف معیار را برای هر ترکیب محاسبه نموده و در نهایت انحراف معیار حداقل و ترکیب بهینه را استخراج می‌کند.

۳-۴- محاسبه‌ی ضرایب مقیاس

پس از انتخاب ۱۰ شتاب‌نگاشت بهینه، ضرایب مقیاس برای هماهنگ کردن این شتاب‌نگاشت‌ها با زلزله طرح محاسبه می‌شوند. در روش آی و آکار برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌های بهینه ضریب مقیاس به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. برای ایجاد هماهنگی دقیق بین میانگین شتاب‌نگاشت‌ها و زلزله طرح ابتدا پارامتر θ که اساس مقیاس‌سازی نامیده می‌شود طبق رابطه‌ی (۶) تعریف می‌شود.

$$\theta = \ln(P\hat{S}a_{scenario}) - \ln\left(\sum_{i=1}^n \exp(\varepsilon_i) + \ln(n)\right) \quad (۶)$$

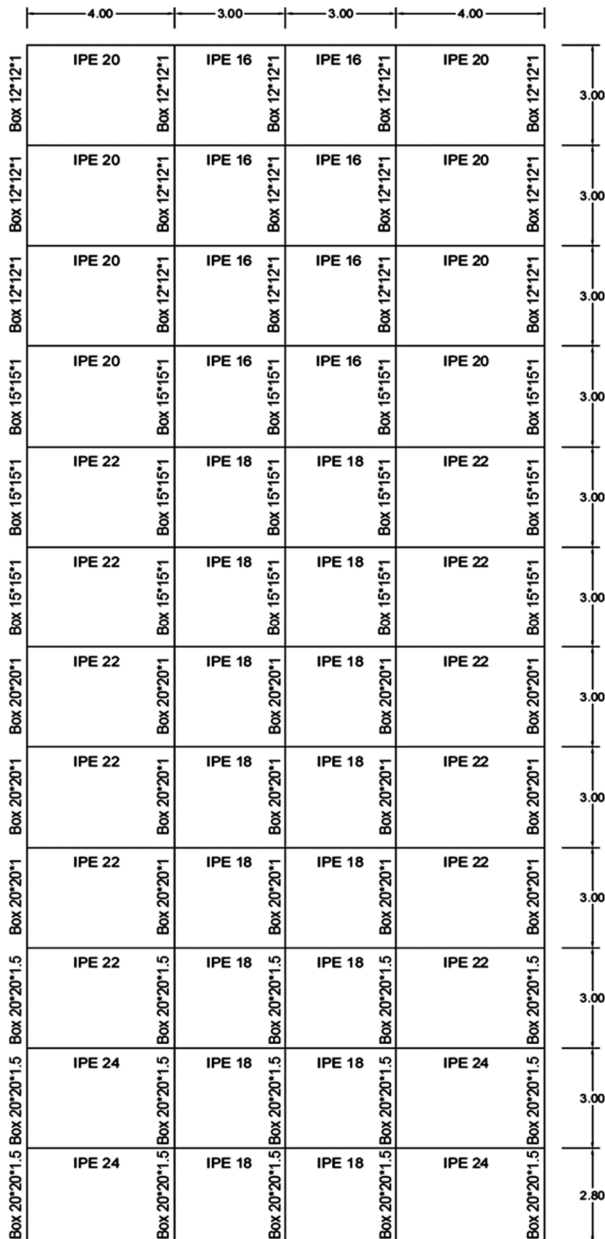
در رابطه (۶)، n تعداد شتاب‌نگاشت‌های بهینه و برابر با ۱۰ است. $P\hat{S}a_{scenario}$ شتاب طیفی زلزله طرح در زمان تناوب اصلی سازه است و از طیف زلزله طرح استخراج می‌شود و ε از رابطه‌ی (۴) قابل محاسبه می‌باشد. پس از محاسبه پارامتر θ ضرایب مقیاس برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شوند.

$$\lambda_i = \frac{\exp(\theta + \varepsilon_i)}{PSa_i} \quad (۷)$$

در این رابطه، PSa_i شتاب طیفی شتاب‌نگاشت i ام در تناوب اصلی سازه و برای میرایی ۵ درصد است و ε از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید. برنامه‌ی نوشته شده در MATLAB علاوه بر انتخاب شتاب‌نگاشت‌های بهینه، ضرایب مقیاس را نیز برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌های بهینه محاسبه می‌کند. این ضرایب مقیاس باید در هر یک از دو مؤلفه‌ی افقی شتاب‌نگاشت‌ها ضرب شده و در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گیرند.

۳-۵- توسعه روش برای رفتار غیرخطی

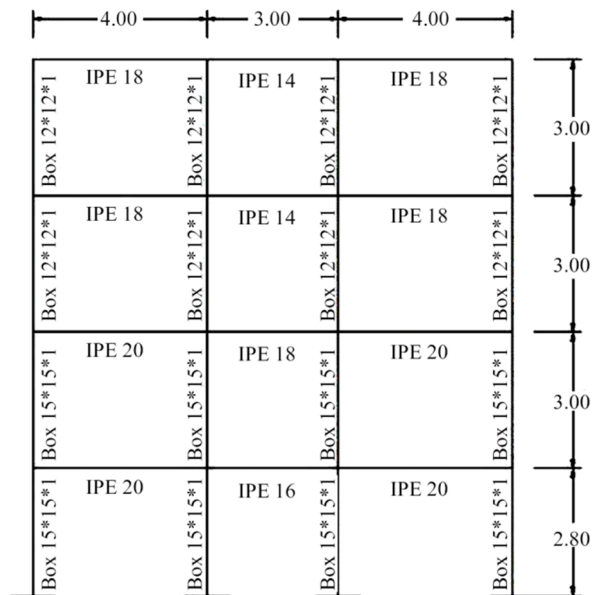
آی و آکار بیان کردند که استفاده از رابطه (۴) فقط در ناحیه رفتار خطی کارایی دارد و با ورود سازه به ناحیه رفتار غیرخطی از دقت آن کاسته شده و باعث افزایش پراکندگی در پاسخ‌های حاصل از شتاب‌نگاشت‌ها می‌گردد. لذا با بررسی مطالعات پیشین به



شکل (۳): قاب دوازده طبقه و چهار دهانه

در جدول (۲) مشاهده می شود که در قاب چهار طبقه ۸۹ درصد از جرم در مود ارتعاشی اول مشارکت دارد و می توان قاب را کوتاه در نظر گرفت، اما در قاب دوازده طبقه تنها ۷۰ درصد از جرم در مود ارتعاشی اول مشارکت دارد و اثر مشارکت موده های ارتعاشی بالا نیز به چشم می خورد و می توان قاب را بلند فرض نمود. انتخاب و مقیاس سازی شتاب نگاشت ها با استفاده از روش احتمالاتی و همچنین روش استاندارد ۲۸۰۰ ایران برای هر دو قاب انجام شده و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قاب ها صورت گرفته و نتایج مورد

روش آی و آکار به ضریب رفتار، با انجام تحلیل بار افزون ضریب رفتار قاب ها تعیین شده و در انتخاب شتاب نگاشت های بهینه مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل بار افزون و همچنین تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از نرم افزار تحلیل غیر خطی SeismoStruct [۱۴] انجام شده و مدل منگوتوپیتو^۵ برای توصیف رفتار غیر خطی مصالح فولادی به کار برده شده است. از دو قاب خمشی فولادی با حد شکل پذیری متوسط و تعداد طبقات ۴ و ۱۲ طبقه به منظور بررسی سازه های کوتاه و بلند استفاده شده است. طراحی قاب ها با استفاده از نرم افزار ETABS [۱۵]، آئین نامه UBC97 [۱۶]، روش تنش مجاز و طیف زلزله طرح تعریف شده در بخش های قبل انجام شده است. شکل های (۲) و (۳) نتایج طراحی قاب ها را نشان می دهند. با توجه به نتایج طراحی و تحلیل بار افزون، زمان تناوب اصلی، ضریب مشارکت جرم در مود ارتعاشی اول و ضریب رفتار قاب های ۴ و ۱۲ طبقه به دست آمده و در جدول (۲) آورده شده اند.



شکل (۲): قاب چهار طبقه و سه دهانه

جدول (۲): مشخصات قاب های چهار طبقه و دوازده طبقه

قاب	زمان تناوب اصلی (ثانیه)	ضریب مشارکت جرم در مود اول (%)	ضریب رفتار
قاب ۴ طبقه	۱/۲	۸۹	۷/۱۲
قاب ۱۲ طبقه	۲/۷۵	۷۰	۶/۵۱

شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب حداکثر جابه‌جایی طبقات حاصل از روش‌های احتمالاتی و استاندارد ۲۸۰۰ ایران نشان شده است.

۵- تحلیل نتایج

به منظور بررسی نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی قاب‌ها با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده و مقیاس شده با دو روش مذکور، مقادیر پاسخ‌های سازه‌ای شامل حداکثر و متوسط جابه‌جایی طبقات، جابه‌جایی نسبی میان طبقه‌ای، برش پایه و همچنین پراکندگی آن‌ها نسبت به پاسخ متوسط، معیار ارزیابی و مقایسه‌ی بین روش‌ها قرار گرفته است. در جداول (۳) و (۴) به ترتیب شتاب‌نگاشت‌ها و ضرایب مقیاس حاصل از روش‌های احتمالاتی و استاندارد ۲۸۰۰ ایران آورده شده است.

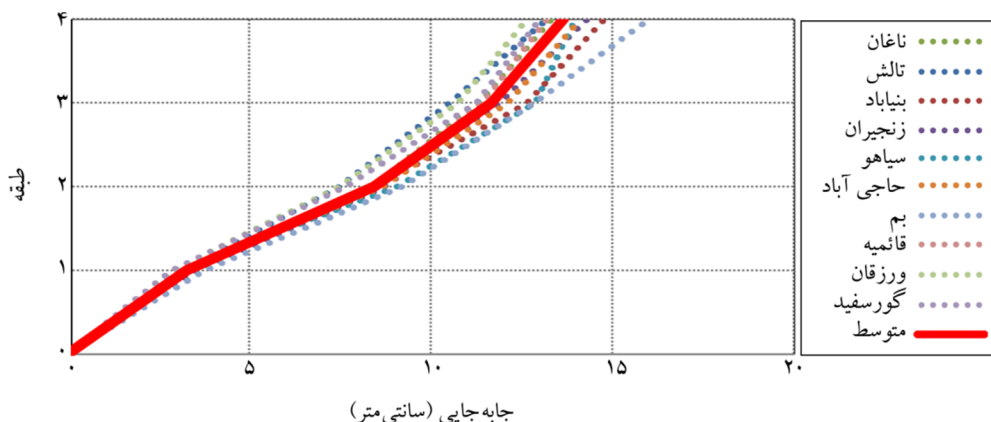
در جداول (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که روش احتمالاتی از ۱۰ شتاب‌نگاشت و روش استاندارد ۲۸۰۰ از هفت شتاب‌نگاشت برای تعیین پاسخ متوسط استفاده می‌کنند. انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها در روش احتمالاتی طی دو مرحله و بر اساس انحراف معیار، زمان تناوب و ضریب رفتار سازه انجام می‌شود. در مقابل، روش استاندارد ۲۸۰۰ انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها را در یک مرحله و تنها بر اساس زمان حرکت شدید و به صورت کاملاً تصادفی انجام می‌دهد. قابل ذکر است که ضابطه‌ی زمان حرکت شدید در استاندارد ۲۸۰۰ به انتخاب نشدن زلزله‌های شدید مثل زلزله‌ی بم منجر می‌شود، زیرا این زلزله دارای زمان حرکت شدید کوتاهی است اما دامنه‌ی طیفی شدید و انرژی بسیار زیادی دارد که به دلیل فاصله‌ی کم از رومرکز است. در

جدول (۳): نتایج انتخاب و مقیاس سازی برای قاب چهار طبقه با استفاده از روش احتمالاتی

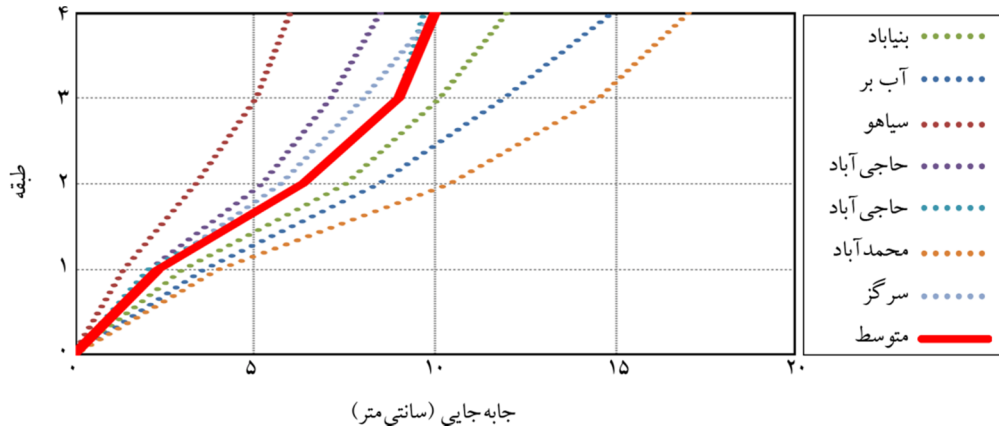
زلزله	بزرگای گشتاوری	فاصله از رومرکز (کیلومتر)	ضریب مقیاس
ناغان	۶/۲	۵	۱/۱۳
تالش	۶/۱	۱۴	۲/۸۹
بنیاباد	۶/۲	۸	۱/۹۰
زنجیران	۵/۸	۱۲	۳/۶۵
سیاهو	۵/۴	۳۷	۲۱/۱۵
حاجی‌آباد	۶/۰	۲۷	۳/۵۸
بم	۶/۹	۶	۰/۳۹
قائمیه	۵/۸	۱۸	۴/۵۶
ورزقان	۶/۲	۱۱	۱/۴۳
گورسفید	۵/۷	۳۰	۸/۱۶

جدول (۴): نتایج انتخاب و مقیاس سازی برای قاب چهار طبقه با استفاده از روش استاندارد ۲۸۰۰ ایران

زلزله	بزرگای گشتاوری	فاصله از رومرکز (کیلومتر)	ضریب مقیاس
بنیاباد	۶/۲	۸	۲/۷۰
آب بر	۷/۵	۴۱	۱/۱۰
سیاهو	۵/۴	۳۷	۳/۲۰
حاجی‌آباد	۵/۸	۳۷	۱/۹۰
حاجی‌آباد	۶/۰	۲۷	۵/۳۰
محمدآباد	۶/۹	۴۵	۷/۲۰
سرگز	۵/۷	۴۳	۵/۱۰



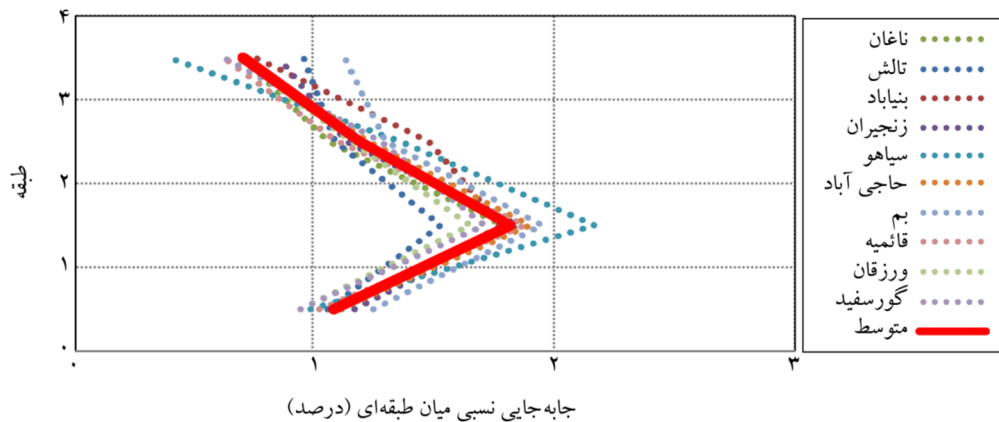
شکل (۴): جابه‌جایی قاب چهار طبقه (روش احتمالاتی)



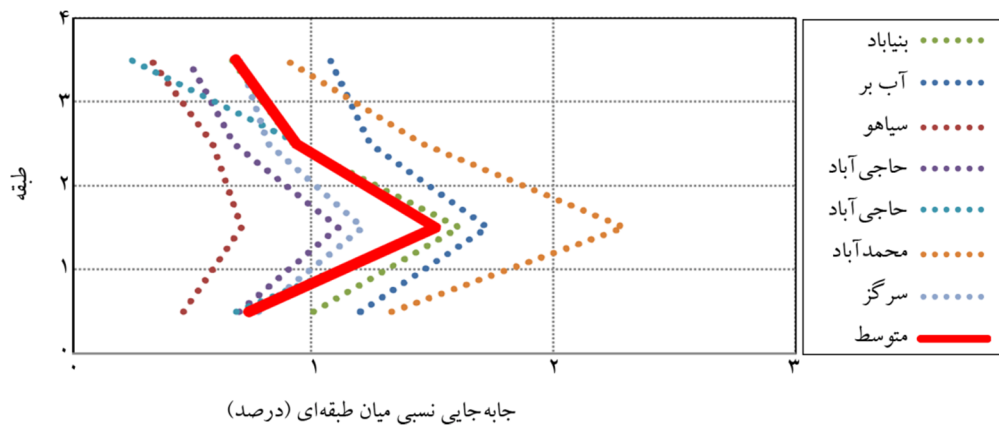
شکل (۵): جابه جایی قاب چهار طبقه (روش استاندارد ۲۸۰۰)

پراکندگی نتایج حاصل از روش احتمالاتی است و نشان دهنده دقت بسیار پایین روش استاندارد ۲۸۰۰ است که نتایج تحلیل تاریخچه زمانی را با عدم قطعیت زیادی همراه می سازد. در شکل های (۶) و (۷) به ترتیب حداکثر جابه جایی نسبی میان طبقه ای حاصل از روش های احتمالاتی و استاندارد ۲۸۰۰ ایران نشان شده است.

مقدار جابه جایی متوسط حاصل از روش احتمالاتی ۳۵ درصد بیشتر از روش استاندارد ۲۸۰۰ است و با توجه به جابه جایی حاصل از زلزله ی محمدآباد در روش استاندارد ۲۸۰۰، به نظر می رسد که متوسط پاسخ حاصل از این روش بسیار دست پایین است. پراکندگی نتایج حاصل از روش استاندارد ۲۸۰۰ تقریباً چهار برابر



شکل (۶): جابه جایی نسبی قاب چهار طبقه (روش احتمالاتی)



شکل (۷): جابه جایی نسبی قاب چهار طبقه (روش استاندارد ۲۸۰۰)

اختلاف برش پایه حاصل از زلزله‌ی بم و متوسط برش پایه حدود ۱۳ درصد است. همچنین مقدار پراکندگی برش پایه در روش استاندارد ۲۸۰۰ حدوداً چهار برابر روش احتمالاتی است. مشابه با قاب چهار طبقه، در ادامه نتایج تحلیل قاب دوازده طبقه نیز آورده شده است. در جداول (۵) و (۶) به ترتیب شتاب‌نگاشت‌ها و ضرایب مقیاس حاصل از روش‌های احتمالاتی و استاندارد ۲۸۰۰ ایران آورده شده است.

جدول (۵): نتایج انتخاب و مقیاس‌سازی برای قاب دوازده طبقه با استفاده از روش احتمالاتی

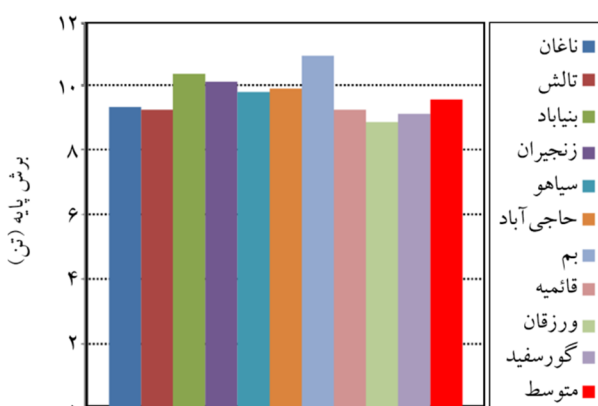
ضریب مقیاس	فاصله از رومرکز (کیلومتر)	بزرگای گشتاوری	زلزله
۰/۹۷	۵	۶/۲	ناغان
۳/۶۰	۱۴	۶/۱	تالش
۱/۷۲	۸	۶/۲	بنياباد
۴/۳۶	۱۲	۵/۸	زنجران
۱۲/۷۴	۳۷	۵/۸	حاجی‌آباد
۰/۲۹	۶	۶/۹	بم
۱۳/۳۸	۴۳	۵/۷	سرگز
۱/۲۵	۱۱	۶/۲	ورزقان
۶/۱۴	۱۲	۵/۳	ورزقان
۷/۹۳	۳۰	۵/۷	گورسفید

جدول (۶): نتایج انتخاب و مقیاس‌سازی برای قاب دوازده طبقه با استفاده از روش استاندارد ۲۸۰۰ ایران

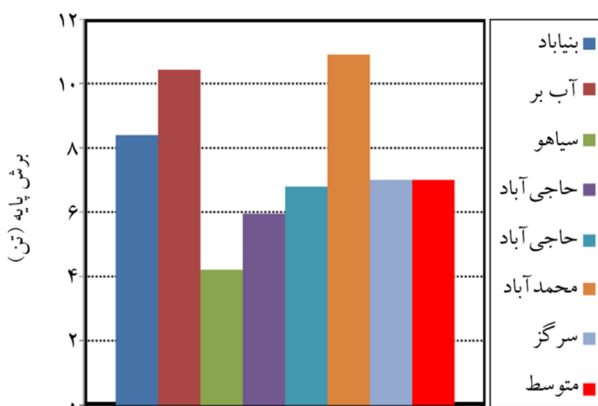
ضریب مقیاس	فاصله از رومرکز (کیلومتر)	بزرگای گشتاوری	زلزله
۲/۹۰	۸	۶/۲	بنياباد
۱/۲۰	۴۱	۷/۵	آب بر
۳/۵۰	۳۷	۵/۴	سیاهو
۲/۱۰	۳۷	۵/۸	حاجی‌آباد
۵/۶۰	۲۷	۶/۰	حاجی‌آباد
۷/۶۰	۴۵	۶/۹	محمدآباد
۵/۴۰	۴۳	۵/۷	سرگز

مشاهده می‌شود که در روش احتمالاتی، شتاب‌نگاشت‌ها و ضرایب مقیاس تغییر کرده و بهینه شده‌اند. لیکن در روش استاندارد ۲۸۰۰ شتاب‌نگاشت‌ها نسبت به قاب چهار طبقه تغییری

روش احتمالاتی جابه‌جایی نسبی را حدود ۲۰ درصد بیش‌تر از استاندارد ۲۸۰۰ برآورد می‌کند. با مقایسه‌ی حداکثر جابه‌جایی نسبی حاصل از زلزله‌ی محمودآباد در روش استاندارد ۲۸۰۰ و متوسط جابه‌جایی نسبی، مشاهده می‌شود اختلاف زیادی به‌ویژه در طبقه‌ی دوم وجود دارد. پراکندگی در نتایج روش استاندارد ۲۸۰۰ تقریباً سه برابر پراکندگی در نتایج روش احتمالاتی است. شکل‌های (۸) و (۹) حداکثر برش پایه حاصل از روش‌های این مقاله و استاندارد ۲۸۰۰ را نشان می‌دهند.



شکل (۸): برش پایه قاب چهار طبقه (روش احتمالاتی)



شکل (۹): برش پایه قاب چهار طبقه (روش استاندارد ۲۸۰۰)

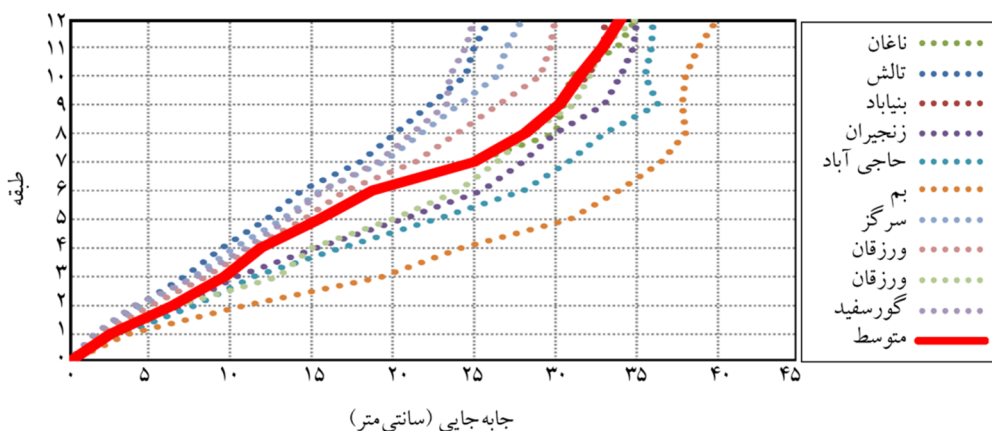
برش پایه متوسط حاصل از روش احتمالاتی ۳۷ درصد بیش‌تر از روش استاندارد ۲۸۰۰ است که اختلاف قابل توجهی است. در روش استاندارد ۲۸۰۰ حداکثر برش پایه حاصل از زلزله‌ی محمدآباد، اختلاف ۵۵ درصدی با متوسط برش پایه حاصل از این روش دارد که نشان‌دهنده‌ی خطای بالای این روش در تعیین برش پایه است. لیکن در روش احتمالاتی

حداکثر جابه‌جایی نسبی میان طبقه‌ای را نشان می‌دهند. استفاده از روش احتمالاتی باعث کاهش پراکندگی در مقادیر جابه‌جایی نسبی تا دو برابر نسبت به روش استاندارد ۲۸۰۰ شده است. حداکثر جابه‌جایی نسبی در روش استاندارد ۲۸۰۰ حاصل از زلزله بنیاباد است و اختلافی حدود سه برابر با پاسخ متوسط دارد. در روش احتمالاتی بین حداکثر جابه‌جایی نسبی حاصل از زلزله ورزقان و متوسط پاسخ، اختلافی حدود ۵۰ درصد به چشم می‌خورد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) حداکثر برش پایه را نشان می‌دهند.

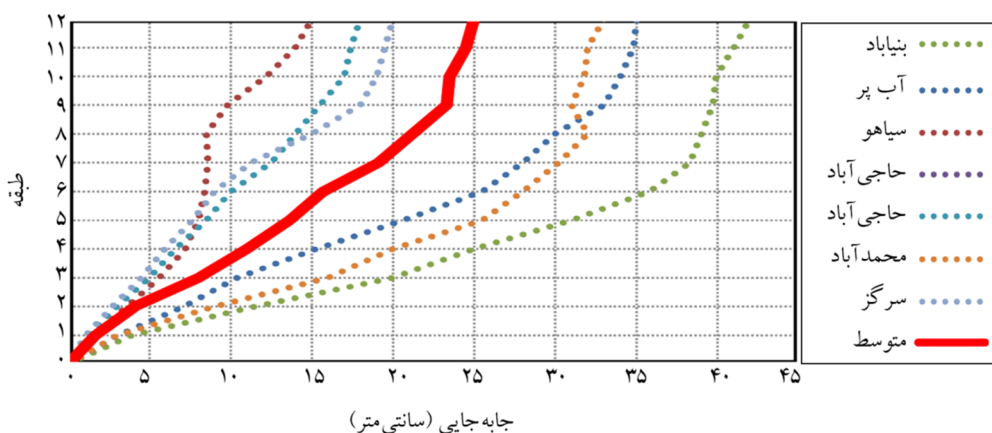
برش پایه‌ی متوسط حاصل از روش احتمالاتی ۲۸ درصد بیشتر از برش پایه متوسط حاصل از روش استاندارد ۲۸۰۰ است. در روش استاندارد ۲۸۰۰ حداکثر برش پایه حاصل از زلزله بنیاباد، اختلاف ۳۱ درصدی با متوسط برش پایه حاصل از این روش دارد که نشان‌دهنده‌ی خطای این روش در تعیین برش پایه است؛

نکرده‌اند و تنها ضرایب مقیاس کمی افزایش یافته‌اند که دلیل آن وابسته نبودن روش ۲۸۰۰ به مشخصات سازه‌ای مثل تناوب و ضریب رفتار و همچنین محاسبه ضریب مقیاس از مقایسه‌ی زلزله طرح و متوسط همه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) حداکثر جابه‌جایی طبقات را در قاب دوازده طبقه نشان می‌دهند.

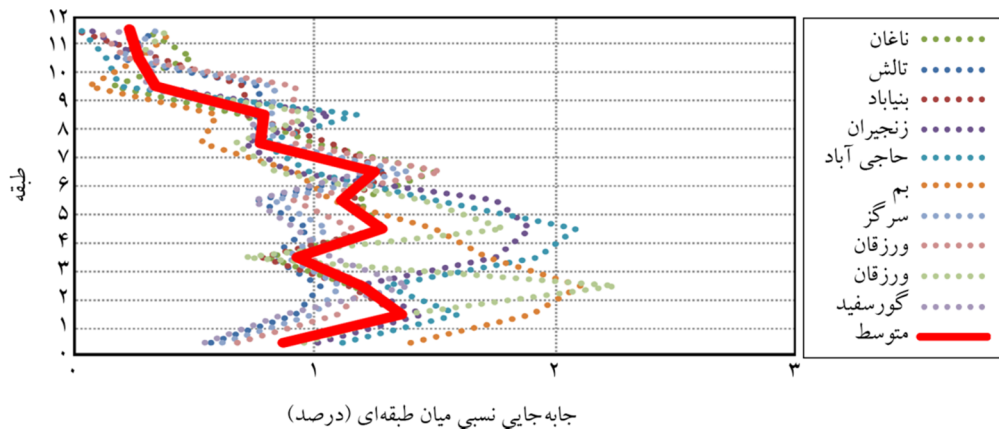
پراکندگی نتایج روش استاندارد ۲۸۰۰ حدود دو برابر پراکندگی نتایج روش احتمالاتی است. همچنین متوسط جابه‌جایی حاصل از روش احتمالاتی ۳۵ درصد بیشتر از روش استاندارد ۲۸۰۰ است و نشان‌دهنده برآورد پایین این استاندارد می‌باشد که با توجه به حداکثر جابه‌جایی حاصل از زلزله بنیاباد، اختلاف ۶۸ درصدی بین این زلزله و جابه‌جایی متوسط مشاهده می‌گردد و در مورد روش احتمالاتی اختلاف زلزله بم و جابه‌جایی متوسط ۱۸ درصد است. شکل‌های (۱۲) و (۱۳)



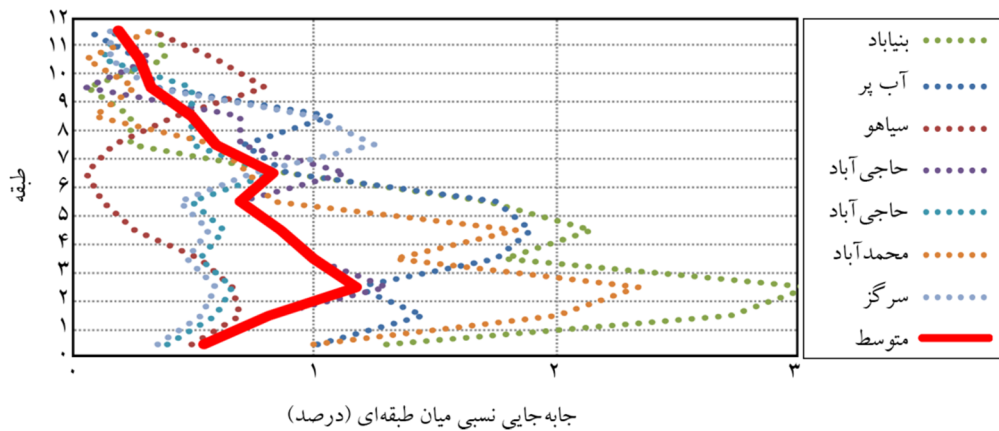
شکل (۱۰): جابه‌جایی قاب دوازده طبقه (روش احتمالاتی)



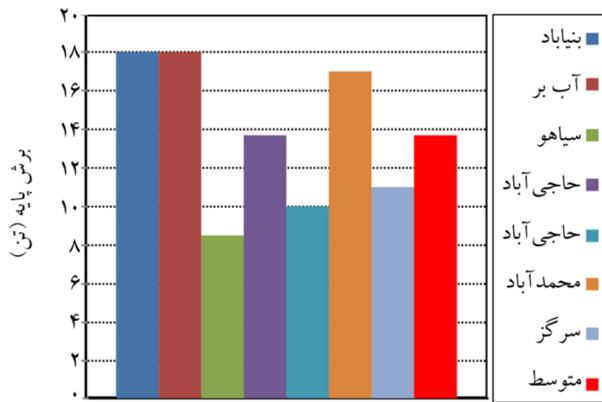
شکل (۱۱): جابه‌جایی قاب دوازده طبقه (روش استاندارد ۲۸۰۰)



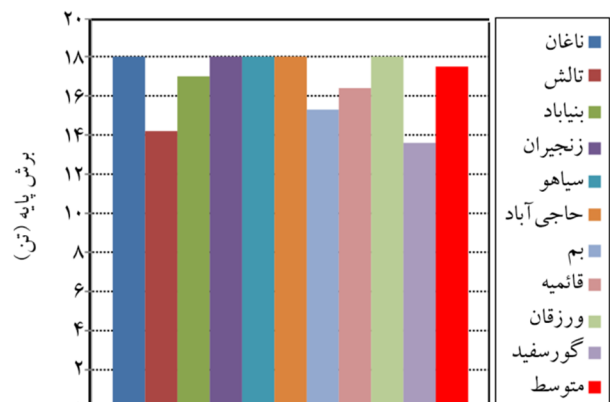
شکل (۱۲): جابه‌جایی نسبی قاب دوازده طبقه (روش احتمالاتی)



شکل (۱۳): جابه‌جایی نسبی قاب دوازده طبقه (روش استاندارد ۲۸۰۰)



شکل (۱۵): برش پایه قاب دوازده طبقه (روش استاندارد ۲۸۰۰)



شکل (۱۴): برش پایه قاب دوازده طبقه (روش احتمالاتی)

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که در هر دو قاب کوتاه و بلند، نتایج حاصل از روش احتمالاتی نسبت به روش استاندارد ۲۸۰۰ دارای پراکندگی کمتر و قابلیت اطمینان بیشتری

لیکن در روش احتمالاتی اختلاف برش پایه حاصل از زلزله ب.م و متوسط برش پایه حدود ۳ درصد است. همچنین مقدار پراکندگی برش پایه در روش استاندارد ۲۸۰۰ حدوداً دو برابر روش احتمالاتی است.

تشکر و قدردانی

از همکاری و مساعدت کارکنان محترم مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان و شبکه شتاب‌نگاری ایران که اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این تحقیق را در اختیار نویسندگان مقاله قرار دادند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Newmark, N.M. and Hall, W.J. (1973) 'Procedures and Criteria for Earthquake Resistant Design.' In: *Building Practices for Disaster Mitigation, Building Science Series No. 46*, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 209-236.
2. Martinez-Rueda, J.E. (1998) Scaling procedure for natural accelerograms based on a system of spectrum intensity scales. *Earthquake Spectra*, **14**(1), 135-152.
3. Shome, N., Cornell, C.A., Bazzurro, P., and Carballo, J.E. (1998) Earthquakes, records, and nonlinear responses. *Earthquake Spectra*, **14**(3), 469-500.
4. Naeim, F., Alimoradi, A., and Pezeshk, S. (2004) Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms. *Earthquake Spectra*, **20**(2), 413-426.
5. Kottke, A. and Rathje, E.M. (2008) A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis. *Earthquake Spectra*, **24**(4), 911-932.
6. Baker, J.W. (2011) Conditional mean spectrum: tool for ground-motion selection. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **137**(3), 322-331.
7. Kalkan, E., Chopra, A.K. (2011) Modal-pushover-based ground motion scaling procedure. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **137**(3), 298-310.
8. Building and Housing Research Center (2006) Iranian Seismic regulations, Standard 2800, 3rd, Publication 253.
9. Ay, B.Ö. and Akkar, S. (2012) A procedure on ground motion selection and scaling for nonlinear response of simple structural systems. *Earthquake*

است و متوسط پاسخ بیشتری نیز ارائه می‌دهد که در طراحی و ارزیابی لرزه‌ای بسیار مؤثر است. اختلاف زیاد بین پاسخ حداکثر و پاسخ متوسط در روش استاندارد ۲۸۰۰ که ناشی از پراکندگی بالای پاسخ‌ها است، تحلیل نتایج این روش را تا حدودی دشوار می‌سازد. در قاب بلند، به دلیل اثر مودهای ارتعاشی بالا، مقدار پراکندگی در پاسخ‌های حاصل از روش احتمالاتی نیز افزایش می‌یابد لیکن همچنان نسبت به روش استاندارد ۲۸۰۰ برتری نسبی دارد. نتایج کلی به دست آمده از این مقاله به شرح زیر می‌باشند:

۱. طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ یک طیف عمومی بوده و انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس آن دشوار است، لیکن طیف طرح تعریف شده در این مقاله یک طیف ویژه بوده و منجر به انتخاب دقیق‌تر شتاب‌نگاشت‌ها می‌گردد.
۲. انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ تنها بر اساس حرکت شدید زلزله است، در حالی که روش احتمالاتی انتخاب را بر اساس حداقل شدن انحراف معیار و با توجه به مشخصات سازه‌ای انجام می‌دهد، در نتیجه انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها بهینه خواهد بود.
۳. در استاندارد ۲۸۰۰ ضرایب مقیاس از مقایسه زلزله طرح و متوسط تمام زلزله‌ها به دست می‌آیند، لیکن روش بکار رفته در این مقاله ضرایب مقیاس را به صورت جداگانه برای هر زلزله و با حفظ ماهیت لرزه‌ای محاسبه می‌کند که باعث کاهش پراکندگی در پاسخ‌ها می‌شود.
۴. با در نظر گرفتن قاب‌های مورد مطالعه در این تحقیق، متوسط پاسخ حاصل از روش استاندارد ۲۸۰۰ حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد کمتر از روش احتمالاتی است و با توجه به اختلاف زیاد پاسخ حداکثر و پاسخ متوسط و پراکندگی بالا در روش استاندارد ۲۸۰۰، استفاده از پاسخ متوسط به درستی گویای اثر واقعی زلزله بر سازه نمی‌باشد.
۵. دقت روش احتمالاتی با افزایش مشارکت مودهای ارتعاشی بالا تا حدودی کاهش پیدا می‌کند. لیکن همچنان نسبت به روش استاندارد ۲۸۰۰ برتری نسبی دارد. هر چند ایراد اساسی روش احتمالاتی پیچیدگی نسبی آن در عمل می‌باشد.

Engineering and Structural Dynamics, **41**(12), 1693-1707.

10. ASCE (2005) *Minimum Design Loads For Buildings*. ASCE/SEI 7-05, Reston, VA.
11. Building and Housing Research Center (2015) *Basic Data of Accelerograms in Iran*. Strong Motion Center.
12. Akkar, S. and Bommer, J.J. (2010) Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, **81**(2), 195-206.
13. MATLAB (2012) The MathWorks Inc., Natick, MA, USA.
14. SeismoStruct (2010) A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Seismosoft.
15. ETABS (2011) Extended 3D analysis of building systems. *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley University.
16. UBC (1997) 'Structural engineering design provisions.' In: *Uniform Building Code, International Conference of Building Officials*, 2.

اصطلاحات فنی

- | | |
|--|--------------------------------|
| Epicenter | ۱- رومرکز |
| Modal Push-Over Analysis (MPA) | ۲- تحلیل بار افزون |
| Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) | ۳- تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالاتی |
| Moment Magnitude | ۴- بزرگای گشتاوری |
| Menegotto-Pinto | ۵- منگو تو پینتو |