

ارائه‌ی یک روش پوش اور بهنگام شونده برای تحلیل لرزه‌ی ساختمان‌های با پلان نامتقارن

رضا عباس‌نیا (دانشیار)

فواد مهاجری‌ناو* (دانشجوی دکتری)

علیرضا تاجیک داوودی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۳۹-۳۹)
دوری ۲-۳۲، شماره ۱/۴، ص. ۳۹-۳۹

در این نوشتار، یک روش تحلیل پوش اور بهنگام شونده‌ی جدید برای تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی ساختمان‌های سه‌بعدی نامتقارن با در نظر گرفتن اثر پیچش ارائه شده است. روش معرفی شده، که با عنوان APAT شناخته می‌شود، روشی یک‌بار اجراست، که از یک الگوی بار معادل برای تحلیل پوش اور سازه استفاده می‌کند. الگوی بار APAT از طریق روش ترکیب مودال براساس جرم مؤثر مودی (EMMC) به دست می‌آید. اعتبار روش معرفی شده از طریق یک مطالعه‌ی پارامتریک روی مجموعه‌ی مدل‌های سه‌بعدی نامتقارن مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعه‌ی پارامتریک نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانایی بالایی در تخمین پاسخ‌های محلی تغییر مکان ساختمان‌های نامتقارن دارد.

واژگان کلیدی: تحلیل استاتیکی غیرخطی، پوش اور، پیچش، ساختمان با پلان نامتقارن، تحلیل لرزه‌ی.

abbasnia@iust.ac.ir
foadmohajeri@iust.ac.ir
a_tajik@civileng.iust.ac.ir

۱. مقدمه

نامتقارن گسترش داده شده است. همچنین برخی پژوهشگران در پژوهش خود (۲۰۱۰)^[۱۴] روش دوبعدی AMC^۲ را که در پژوهش دیگری^[۱۵] معرفی شده بود، برای ساختمان‌های با پلان نامتقارن توسعه دادند و برای در نظر گرفتن آثار پیچشی، یک نسخه‌ی سه‌بعدی از فرمول‌بندی مبتنی بر انرژی را برای تبدیل سازه‌ی چند درجه آزادی به مدل معادل یک درجه آزادی به کار گرفتند. پژوهشگران دیگری (۲۰۱۲)^[۱۶] نیز یک روش پوش اور بهنگام شونده‌ی یک‌بار اجرا را براساس برش و گشتاور مودال طبقات پیشنهاد داده‌اند، که الگوی بار از ترکیب برش و گشتاور مودال طبقات در هر گام حاصل شده است. در ادامه، در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۵^[۱۷] روش دیگری برای تحلیل لرزه‌ی سازه‌های نامتقارن تحت اثر زلزله‌ی دوجبهه ارائه شده است. و نیز برخی دیگر از پژوهشگران^[۱۸] روش مشهور پوش اور مودال (MPA) را برای تحلیل ساختمان‌های با پلان نامتقارن گسترش داده و تحت اثر هم‌زمان دو مؤلفه‌ی افقی زلزله مورد ارزیابی قرار داده‌اند. همچنین تلاش‌های بسیار دیگری در راستای گسترش روش‌های تحلیل پوش اور برای ساختمان‌های با پلان نامتقارن انجام شده است.^[۱۹-۲۲]

عمده‌ی روش‌های سه‌بعدی، روش‌هایی چند بار اجرا هستند که این موضوع کاربرد آن را به خصوص در مورد ساختمان‌های بزرگ دشوار می‌سازد. بنابراین، برای دنبال کردن این پژوهش‌ها و همچنین به منظور دست‌یابی به یک روش پوش اور دقیق، ساده و یک‌بار اجرا برای تحلیل سه‌بعدی ساختمان‌های نامنظم و نامتقارن، یک الگوریتم پوش اور بهنگام شونده با در نظر گرفتن آثار پیچشی (APAT)^۳، در این پژوهش توسعه داده شده و این نتیجه به دست آمده است که روش مذکور، توانایی

در طی سال‌های اخیر، توسعه‌ی طراحی سازه‌ی مبتنی بر عملکرد منجر به انجام مطالعات گسترده‌ی با موضوع تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی (پوش اور) شده است. از آنجایی که روش‌های دینامیکی غیرخطی، زمان‌بر و پرهزینه هستند و تفسیر نتایج حاصل نیز دشوار است و نیاز به تخصص بالایی دارد، روش‌های پوش اور به عنوان یک ابزار تحلیلی جایگزین روش‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی، موضوع اصلی پژوهش‌های بسیاری در طی سال‌های اخیر بوده‌اند.^[۲۰]

یکی از مسائلی که در گسترش روش‌های تحلیل پوش اور بسیار مورد توجه قرار دارد، اثرات تحلیل سه‌بعدی در روش‌های مذکور است. به منظور توسعه‌ی روش‌های پوش اور برای کاربردهای سه‌بعدی و در نظر گرفتن آثار پیچشی تلاش‌های زیادی انجام شده است.^[۲۱-۲۳] در یکی از مهم‌ترین مطالعات^[۲۴] روش N۲ برای مدل‌های سه‌بعدی توسعه داده شده و این نتیجه به دست آمده است که روش N۲ برای تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی سازه‌های سه‌بعدی محافظه‌کارانه است. در پژوهشی در سال ۲۰۰۰^[۲۱] نیز روشی پیشنهاد شده است که از یک تحلیل طیفی پاسخ کشسان سه‌بعدی و یک تحلیل پوش اور دوبعدی تشکیل شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های سه‌بعدی برای در نظر گرفتن آثار پیچشی در ساختمان‌های نامنظم در پژوهشی در سال ۲۰۰۲^[۲۲] توسعه داده شده و از یک تحلیل پوش اور سه‌بعدی براساس روش N۲ و یک تحلیل دینامیکی (طیفی) خطی تشکیل شده است. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۴^[۲۳] روش پوش اور مودال (MPA)^۱ برای تخمین ظرفیت لرزه‌ی ساختمان‌های با پلان

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۱۵.

۲. روش پیشنهادی APAT

۱.۲. کلیات

بالایی در پیش‌بینی پاسخ‌های لرزه‌ی ساختمان‌های با آثار پیچشی قابل ملاحظه دارد.

روش APAT در اصل توسعه‌ی از روش دوبعدی است، که قبلاً در پژوهشی در سال ۲۰۱۱، [۲۳] توسعه یافته است. در روش APAT، یک الگوی بارگذاری مبتنی بر جابه‌جایی با در نظر گرفتن آثار پیچشی معرفی شده است. الگوی بارگذاری در هر گام تحلیل براساس مشخصات جدید سازه بهنگام می‌شود. یک روش جدید ترکیب مودال براساس جرم مؤثر مودی (EMMC) [۲۴] که در پژوهش اخیر، [۲۳] معرفی شده است، برای ساختن الگوی بارگذاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساده بودن و کاربرد و درک آسان، مهم‌ترین مزیت روش پیشنهادی است.

براساس روش EMMC، یک ضریب C_n با استفاده از رابطه ۱ برای مود n م تعریف می‌شود:

$$C_n = \frac{\alpha_n}{\alpha_{\max}}, \quad \alpha_{\max} = \text{Max}(\alpha_1, \dots, \alpha_N) \quad (1)$$

که در آن، α_n ضریب جرم مودی متناظر مود n م، α_{\max} بیشترین مقدار بین ضرایب جرم مودال برای تمام مودها و N تعداد مودهایی است که در تحلیل بررسی می‌شوند. α_n از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\alpha_n = \frac{\left(\left\{ \phi_n^{(i)} \right\}^T [m] \{i\} \right)^2}{\left(\left\{ \phi_n^{(i)} \right\}^T [m] \left\{ \phi_n^{(i)} \right\} \right) \sum_n m_n} \quad (2)$$

که در آن، $\left\{ \phi_n^{(i)} \right\}$ بردار شکل مود n م، $[m]$ ماتریس جرم، و $\{i\}$ ماتریس تأثیر هستند. براساس آنچه که اشاره شده است، پاسخ مودهای مختلف با استفاده از ضرایب به دست آمده با هم ترکیب می‌شوند.

در روش APAT، یک بردار بارگذاری بهنگام‌شونده مبتنی بر جابه‌جایی با استفاده از روش ترکیب EMMC مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، [۲۴] بردارهای بارگذاری مبتنی بر نیرو و مبتنی بر جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه به دست آمده است که در الگوهای بهنگام‌شونده، بردارهای مبتنی بر جابه‌جایی نتایج دقیق‌تری به دست می‌دهند؛ در حالی که در الگوهای غیر بهنگام‌شونده، بردارهای مبتنی بر نیرو به جواب‌های بهتری منجر می‌شوند. [۲۵، ۲۴]

بنابراین در پژوهش حاضر، یک بردار بارگذاری بهنگام‌شونده مبتنی بر جابه‌جایی استفاده شده است.

در روش پیشنهادی، از سیستم یک درجه آزادی معادل سازه (ESDOF) [۵] استفاده می‌شود. به منظور تعیین سیستم معادل یک درجه آزادی، از رویکرد مبتنی بر انرژی استفاده می‌شود، که در ابتدا در پژوهشی در سال ۲۰۰۴، [۲۶] معرفی شده و سپس در پژوهش دیگری (۲۰۱۰)، [۱۴] برای ساختمان‌های نامنظم سه‌بعدی گسترش یافته است. براساس روش مذکور، افزایش کار انجام‌شده توسط نیروهای جابه‌جایی و دورانی در گام n م تحلیل با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شود:

$$\Delta E_F^{(i)} = \sum_{k=1}^K F_k^{(i)} \Delta d_k^{(i)} \quad (3)$$

$$\Delta E_T^{(i)} = \sum_{k=1}^K T_k^{(i)} \Delta \theta_k^{(i)} \quad (4)$$

که در آن‌ها، $\Delta E_F^{(i)}$ افزایش کار ناشی از نیروهای جانبی، $\Delta E_T^{(i)}$ افزایش کار ناشی از نیروهای دورانی، $F_k^{(i)}$ و $T_k^{(i)}$ نیروهای جانبی و دورانی در طبقه k م، $\Delta d_k^{(i)}$ و $\Delta \theta_k^{(i)}$ افزایش جابه‌جایی‌های جانبی و دورانی هستند. وقتی که افزایش کارها محاسبه شدند، جابه‌جایی افزایشی سیستم یک درجه آزادی معادل در گام n م تحلیل $(\Delta D^{(i)})$ ، از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$\Delta D^{(i)} = \frac{\Delta E^{(i)}}{V_b^{(i)}} = \frac{(\Delta E_F^{(i)} + \Delta E_T^{(i)})}{V_b^{(i)}} \quad (5)$$

که در آن، $V_b^{(i)}$ برش پایه برابر با مجموع نیروهای جانبی و $\Delta E^{(i)}$ افزایش کار انجام‌شده توسط نیروهای جانبی و دورانی اعمال شده در طی جابه‌جایی افزایشی در گام n م هستند. سرانجام، $S_d^{(i)}$ جابه‌جایی طیفی سیستم یک درجه آزادی معادل سازه در گام n م است، که از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$S_d^{(i)} = S_d^{(i-1)} + \sum \Delta D^{(i)} \quad (6)$$

در ادامه، $S_a^{(i)}$ شتاب طیفی در گام n م تحلیل با استفاده از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$S_a^{(i)} = \frac{V_b^{(i)}}{W} \quad (7)$$

که در آن، W وزن کل سازه است. در این روش، منحنی ظرفیت در فرمت طیف پاسخ شتاب - جابه‌جایی (ADRS) [۶] رسم می‌شود (یعنی شتاب طیفی در برابر جابه‌جایی طیفی براساس روابط ۶ و ۷).

۲.۲. روش کلی

مفاهیم اصلی روش پیشنهادشده APAT، شامل در نظر گرفتن مودهای پیچشی در الگوی بارگذاری و همچنین کار جانبی انجام‌شده توسط نیروهای دورانی است. برای مینا، یک فرایند گام به گام برای تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی یک ساختمان چندطبقه‌ی نامنظم، براساس روش APAT، به این صورت است:

۱. در گام n م تحلیل، یک تحلیل مقادیر ویژه براساس مشخصات موجود سازه انجام می‌شود، تا شکل‌های مودی $\left\{ \phi_n^{(i)} \right\}$ و بسامدهای طبیعی سازه $\left\{ \omega_n^{(i)} \right\}$ به دست آیند.

۲. براساس مشخصات مودال به دست آمده، الگوی بار جانبی بهنگام‌شونده‌ی معادل در گام n م تحلیل $\{S\}^{(i)}$ ، با استفاده از روابط ۸ الی ۱۰ به دست می‌آید:

$$SD_k^{(i)} = \sum_{m=1}^k C_n^{(i)} \Gamma_n^{(i)} (\phi_{k,n}^{(i)} - \phi_{k-1,n}^{(i)}) S_{d,n}^{(i)} \quad (8)$$

$$\bar{S}_k^{(i)} = \frac{SD_k^{(i)}}{\max(SD_1^{(i)}, SD_2^{(i)}, \dots, SD_K^{(i)})}, \quad k = 1, \dots, K \quad (9)$$

$$\{S^{(i)}\} = \left[\bar{S}_K^{(i)} \quad \dots \quad \bar{S}_2^{(i)} \quad \bar{S}_1^{(i)} \right]^T \quad (10)$$

که در آن‌ها، Γ_n ضریب مشارکت مودال متناظر n م، $\phi_{k,n}$ مقدار شکل مودی نرمال‌شده‌ی جرم برای طبقه k م و مود n م، N تعداد کل مودهای بررسی شده، $C_n^{(i)}$ ضریب ترکیب مودال براساس روش EMMC، $S_{d,n}^{(i)}$ جابه‌جایی طیفی سیستم معادل یک درجه آزادی در گام n م، و $\bar{S}_K^{(i)}$ بارگذاری معادل طبقه‌ی k م در گام n م هستند.

ابعاد سازه‌ی ۳ طبقه‌ی اصلی برابر ۲۷/۴۵ متر (۹۰ فوت) در ۲ جهت پلان، ۱۱/۸۹ متر (۳۹ فوت) در ارتفاع و با دهانه‌هایی به طول ۹/۱۵ متر (۳۰ فوت) است. سیستم باربر جانبی، قاب خمشی فولادی بوده و تیرها و ستون‌ها به ترتیب از فولادهایی با مقاومت ۲۴۸ مگاپاسکال (۳۶ ksi) و ۳۴۵ مگاپاسکال (۵۰ ksi) ساخته شده‌اند. ستون‌های قاب خمشی از نوع بال پهن هستند. طبقات ساختمان ۳ طبقه نسبت به زمین شماره‌گذاری شده و طبقه‌ی سوم، بام است. ارتفاع کف تا کف طبقات (این ارتفاع برای اهداف تحلیلی، مرکز تا مرکز تیرها در نظر گرفته شده است)، برابر ۳/۹۶ متر (۱۳ فوت) است. پایه‌های ستون‌ها نسبت به زمین گیردار در نظر گرفته شده‌اند و جرم لرزه‌یی کل سازه برابر $10^6 \times 2795$ کیلوگرم است.

قاب دوبعدی اصلی، که برای تولید یک سازه‌ی سه‌بعدی استفاده شده است، در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل سه‌بعدی برای ساختن ۴ مدل نامتقارن حول محور x و متقارن حول محور y تغییر یافته است. در حالی که مشخصات سختی سازه بدون تغییر مانده است، مرکز جرم Y سازه برای ایجاد عدم تقارن در سازه نسبت به مرکز سختی A سازه جابه‌جا شده است، تا در پلان سازه برون‌محوری ایجاد شود. با توجه به اینکه تحریک لرزه‌یی در جهت x بر سازه اعمال می‌شود، برون‌محوری در جهت عمود بر آن اعمال شده است تا منجر به ایجاد پیچش در ساختمان شود، چرا که برون‌محوری در راستای اعمال تحریک زلزله، باعث ایجاد پیچش نخواهد شد. علاوه بر این، اعمال تحریک زلزله در جهت عمود بر برون‌محوری، باعث ایجاد بیشینه‌ی آثار پیچشی در سازه می‌شود. شکل ۱، پلان کلی ساختمان‌های نامتقارن ذکرشده را نشان می‌دهد. با استفاده از روش اشاره‌شده، ۴ ساختمان با پلان نامتقارن به‌دست آمده است. توصیف مدل‌های مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. البته این تذکر لازم است که دوره‌ی تناوب ارتعاشات برای مدل‌های مختلف در جدول ۱، اختلاف اندکی با یکدیگر داشته‌اند، که از آن صرف‌نظر شده است. برای ارزیابی آثار مقادیر مختلف پیچش در پاسخ لرزه‌یی سازه‌ها، برون‌محوری‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش برون‌محوری، نقش پیچش بیشتر شده و در نتیجه، توانایی روش APAT در تخمین پاسخ لرزه‌یی سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

علاوه بر مدل‌های اشاره‌شده، به‌منظور بررسی قابلیت روش پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های لرزه‌یی ساختمان‌هایی با تعداد طبقات بیشتر، مدل ساختمانی نامتقارن ۹ طبقه، که قبلاً در پژوهشی در سال ۲۰۰۴^[۱۳] نیز استفاده شده است، در این پژوهش هم به‌کار گرفته شده است. مشابه آنچه در مورد ساختمان‌های ۳ طبقه بحث شده است، در اینجا نیز برای نامتقارن‌کردن مدل، مرکز جرم نسبت به مرکز سختی جابه‌جا شده است. پلان ساختمان ذکرشده در شکل ۲ نشان داده شده و جزئیات مدل‌سازی و تحلیل آن عیناً مشابه مدل‌های ۳ طبقه بوده است. مدل ساختمانی ۹ طبقه، به‌ازاء ۴ میزان برون‌محوری معادل ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بعد پلان و در جابه‌جایی کل معادل ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ارتفاع سازه تحلیل شده است.

جدول ۱. توصیف مدل‌های ۳ طبقه.

مدل	برون‌محوری (e) (%)	دوره‌ی تناوب ارتعاش سازه (ثانیه)		
		مود اول	مود دوم	مود سوم
M۱	۵			
M۲	۱۰	۱,۵۲۴	۱,۱۷۷	۰,۵۸۸
M۳	۱۵			
M۴	۲۰			

۳. با استفاده از الگوی بارگذاری به‌دست‌آمده، تحلیل استاتیکی غیرخطی در این گام انجام می‌شود.

۴. گام افزایشی بعدی، سیستم یک درجه آزادی معادل $\Delta D^{(i)}$ ، با استفاده از رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید.

۵. جابه‌جایی طیفی $S_d^{(i)}$ و شتاب طیفی $S_a^{(i)}$ ، متناظر با گام Δ تحلیل با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شوند.

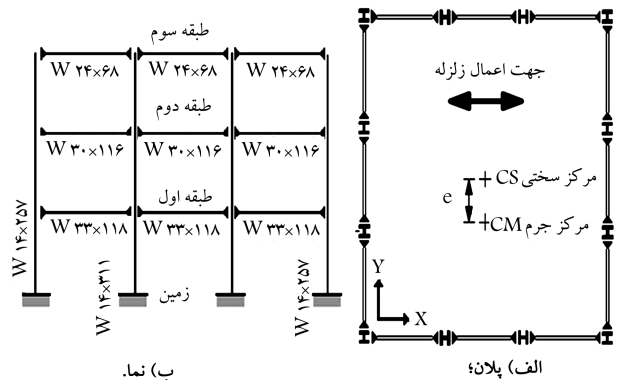
۶. منحنی ظرفیت سازه در گام فعلی، با استفاده از جابه‌جایی طیفی و شتاب طیفی محاسبه‌شده در گام ۵ رسم می‌شود.

این فرایند تا رسیدن به یک شرایط از پیش تعیین‌شده و یا انهدام سازه ادامه می‌یابد. منحنی ظرفیت ترسیم‌شده را می‌توان برای به‌دست‌آوردن این شرایط از پیش تعیین‌شده (که با عنوان نقطه‌ی عملکرد یا نقطه‌ی هدف در ادبیات فنی شناخته می‌شود) به‌کار گرفت، که این نکته فراتر از موضوع این نوشتار است. در این پژوهش، پروفیل‌های جابه‌جایی (جابه‌جایی بین طبقه‌یی)، به‌عنوان نماینده‌های پاسخ‌های محلی سازه در برابر زلزله در ۵ مرحله‌ی مختلف (جابه‌جایی کل معادل: ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ ارتفاع سازه) بررسی شده‌اند. عموماً جابه‌جایی کل معادل ۵٪ ارتفاع سازه، نشان‌گر رفتار کشسان (یا پیش از تسلیم) ساختمان‌هاست؛ جابه‌جایی کل معادل ۱۰٪، معرف نقطه‌ی تسلیم کلی است که مشخصات سختی سازه به‌طور قابل ملاحظه‌یی تغییر می‌کند و توزیع بارگذاری به سرعت به روز می‌شود؛ و جابه‌جایی‌های معادل ۲۰٪ و ۳۰٪، تعریف‌کننده‌ی مرحله‌ی غیرکشسان هستند.^[۲۴] به عبارت بهتر، هدف از بررسی ۵ نقطه‌ی ذکرشده، ارزیابی رفتاری سازه و توانایی روش پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های لرزه‌یی ساختمان‌های نامتقارن در کلیه‌ی محدوده‌های رفتار سازه‌یی، از مرحله‌ی رفتار کشسان تا محدوده‌ی رفتار خمیری کامل است.

۳. مطالعه‌ی اعتبارسنجی

۳.۱. تحلیل‌ها و مدل‌های عددی

برای بررسی اعتبار روش پیشنهادی، در ابتدا مجموعه‌یی از ساختمان‌های با پلان نامتقارن مورد تحلیل قرار گرفته‌اند، که از یک ساختمان ۳ طبقه به نام SAC-۳ اقتباس شده‌اند. ساختمان ۳ طبقه‌ی اصلی، که مدل‌های این مطالعه از آن اقتباس شده‌اند، برای فاز دوم پروژه‌ی SAC طراحی شده است (شکل ۱).^[۲۷] اگرچه این ساختمان‌ها ساخته نشده‌اند، اما شرایط آیین‌نامه‌ی لرزه‌یی را برآورده کرده و معرف ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه‌ی طراحی‌شده برای منطقه‌ی لس‌آنجلس کالیفرنیا هستند.

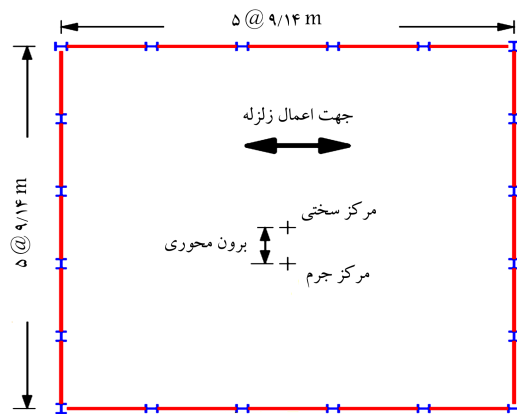


شکل ۱. قاب ۳ طبقه.

جدول ۳. مشخصات رکوردهای نزدیک گسل.

PGA (g)	فاصله* (km)	ایستگاه ثبت	سال	رکورد
۰٫۴۵۵	۷٫۱	Newhall	۱۹۹۴	Northridge
۰٫۲۳۵	۷٫۶	EC C. Center FF	۱۹۷۹	Imperial Valley
۰٫۸۵۲	۳٫۰	Tabas	۱۹۷۸	Tabas
۱٫۲۲۶	۲٫۸	Pacoima Dam	۱۹۷۱	San Fernando
۰٫۶۱۱	۰٫۳	Takatori	۱۹۹۵	Kobe
۰٫۵۶۳	۶٫۱	LGPC	۱۹۸۹	Loma Prieta
۰٫۷۱۱	۰٫۱	Co. Lake Dam	۱۹۸۴	Morgan Hill

* نزدیک‌ترین فاصله تا گسل (منبع: <http://peer.berkeley.edu/smcat/>).

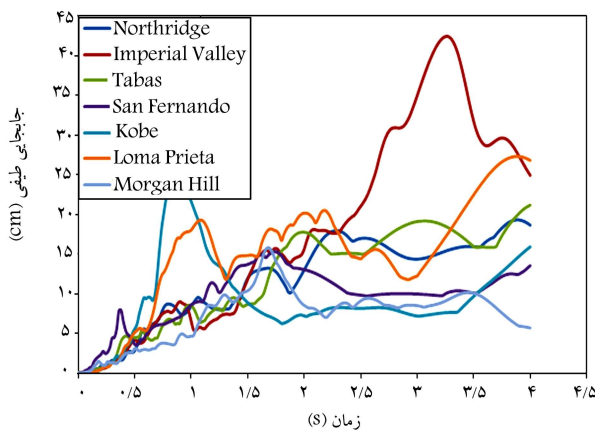


شکل ۲. پلان قاب ساختمانی ۹ طبقه.

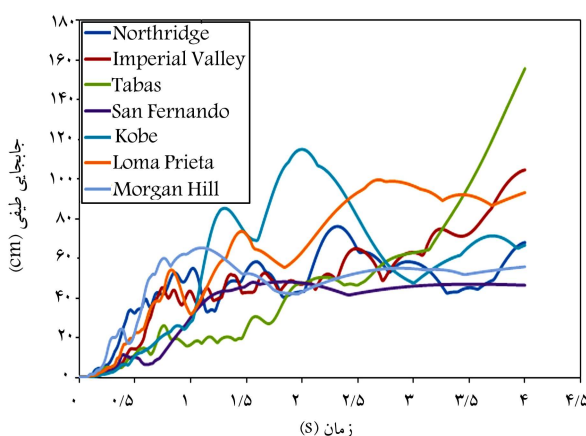
جدول ۲. مشخصات رکوردهای دور از گسل.

PGA (g)	فاصله* (km)	ایستگاه ثبت	سال	رکورد
۰٫۲۹۰	۱۹٫۳	Santa Susana Gr.	۱۹۹۴	Northridge
۰٫۱۹۵	۲۶٫۰	Superstition M.C.	۱۹۷۹	Imperial Valley
۰٫۴۰۶	۱۷٫۰	Dayhook	۱۹۷۸	Tabas
۰٫۱۴۵	۲۵٫۸	Lake Hughes	۱۹۷۱	San Fernando
۰٫۰۷۵	۵۷٫۹	TOT	۱۹۹۵	Kobe
۰٫۰۷۳	۳۴٫۷	SAGO	۱۹۸۹	Loma Prieta
۰٫۱۱۸	۳۲٫۵	H. City Hall	۱۹۸۴	Morgan Hill

* نزدیک‌ترین فاصله تا گسل (منبع: <http://peer.berkeley.edu/smcat/>).



الف) رکوردهای دور از گسل؛



ب) رکوردهای نزدیک گسل.

شکل ۳. طیف پاسخ رکوردهای زلزله.

موردشان تحقق نیافته است، حذف شده و در نهایت، مجموعه رکوردهای ارائه شده در جدول‌های ۲ و ۳ به دست آمده‌اند.

همچنین این تذکر لازم است که برای بررسی اثر مسافت گسل تا سازه در پاسخ لرزه‌یی سازه‌های با آثار پیچشی قابل توجه، رکوردهای دور از گسل و نزدیک گسل جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. رکوردهای نزدیک گسل بیشینه‌ی شتابی بیشتر از $g/5$ و رکوردهای دور از گسل بیشینه‌ی شتابی کمتر از $g/5$ داشته‌اند.

شکل ۳، طیف پاسخ زلزله‌های ذکر شده را به صورت جداگانه برای رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل نشان می‌دهد.

است. مشخصات سازه‌یی این مدل در پژوهش انجام شده‌یی در سال ۲۰۰۴، [۱۳] در دسترس است.

نتایج روش APAT با نتایج به دست آمده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخی زمانی^۹ به عنوان روش مرجع مقایسه شده‌اند. همچنین روش‌های پوش‌اور مودال برای ساختمان‌های با پلان نامتقارن، [۱۳] و پوش‌اور سنتی با الگوی بارگذاری ثابت با روش پیشنهادی مقایسه شده‌اند، تا امکان دست‌یابی به یک ارزیابی جامع‌تر فراهم شود. نتایج گزارش شده در این نوشتار، با استفاده از بسته‌ی نرم‌افزاری اجزاء محدود OpenSees، [۲۸]، در ترکیب با MATLAB، [۲۹] حاصل شده‌اند. مدل‌ها با استفاده از المان‌های غیرخطی تیر-ستون با مقطع فایبر، که خاصیت خمیری را به صورت گسترده در سرتاسر المان و مقطع در نظر می‌گیرد، ساخته و دیافراگم طبقات نیز صلب فرض شده‌اند. ایترسی دورانی طبقات نیز ثابت و مساوی مقادیر متناظر مدل متقارن در نظر گرفته شده‌اند.

۲.۳. زلزله‌های بررسی شده

تحلیل‌ها با استفاده از رکوردهای زلزله‌ی نزدیک گسل و دور از گسل انجام شده‌اند. جزئیات رکوردهای زلزله‌های بررسی شده در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. القای تغییرمکان غیرکسیان کافی در ساختمان‌های مورد بررسی، به گونه‌یی که ساختمان حتماً به تغییرمکان جانبی معادل ۳٪ ارتفاع سازه برسد، و تحریک آثار موده‌های پیچشی از جمله دلایل اصلی برای انتخاب این رکوردهای زلزله بوده است. بر این مبنای، در ابتدا مجموعه‌یی از رکوردهای زلزله انتخاب شده‌اند و پس انجام تحلیل‌های لرزه‌یی با استفاده از همه‌ی آن‌ها، رکوردهایی که شرایط فوق در

۳.۳. نتایج

$$\text{Error}(\%) = 100 \times \frac{1}{n} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta_{i-P} - \Delta_{i-NTHA}}{\Delta_{i-NTHA}} \right)^2} \quad (11)$$

که در آن، Δ_{i-NTHA} بیشینه جابه‌جایی طبقه‌ی i ام به دست آمده از روش NTHA، Δ_{i-P} جابه‌جایی طبقه‌ی مورد نظر به دست آمده از روش پوش اور و n تعداد کل طبقات ساختمان است.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، خطای کلی به دست آمده از روش APAT در بیشتر حالت‌ها در حدود ۵٪ قرار دارد. این مقدار خطا نشان می‌دهد که حتی با افزایش پیچش در سازه‌ها، روش پیشنهادی می‌تواند جابه‌جایی‌های کل را با دقتی قابل قبول پیش‌بینی کند.

مطابق شکل‌های ۶ و ۷، روش پیشنهادی در مقایسه با روش پوش اور مودال نیز دقت بهتری دارد، چرا که میانگین خطاهای به دست آمده در روش پوش اور مودال در مقایسه با روش پیشنهادی بیشتر است. وضعیتی مشابه برای روش پوش اور سنتی نیز وجود دارد.

یکی از پارامترهای اساسی که نقشی تعیین‌کننده در میزان خسارت‌های ناشی از زلزله دارد، جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ی است. به همین دلیل، در این مطالعه هم توجه ویژه‌ی به جابه‌جایی بین طبقات شده است. در ادامه، شکل‌های ۸ و ۹، نشان‌دهنده‌ی نتایج جابه‌جایی بین طبقات متناظر با جابه‌جایی‌های کلی جانبی ۱۰٪ و ۲۰٪، ارتفاع سازه‌ی به دست آمده از تحلیل‌های انجام شده هستند. مشابه پروفیل جابه‌جایی کلی، در اینجا هم میانگین نتایج گزارش شده است.

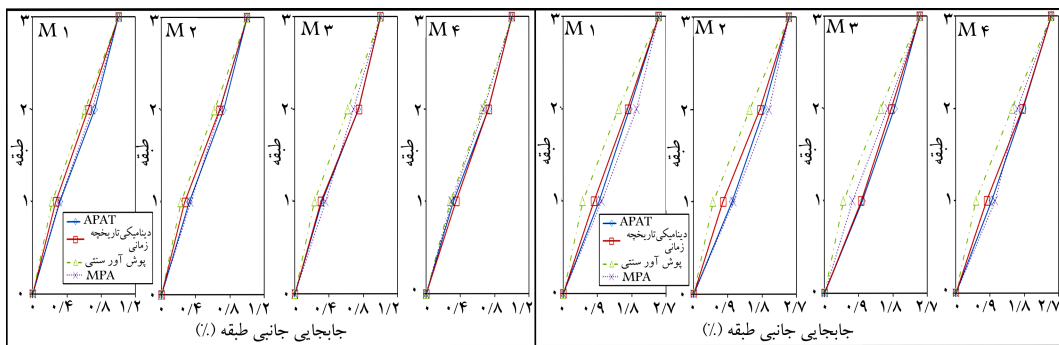
همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش APAT جابه‌جایی بین طبقات را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند. برای اینکه بتوان میزان دقت حاصل را به صورت کمی ارزیابی کرد، برای این قسمت نیز شاخص خطای معرفی شده در رابطه‌ی ۱۱ مورد

در استخراج نتایج، مرکز جرم هر طبقه به عنوان نقطه‌ی مرجع برای ثبت پاسخ‌های لرزه‌ی مدل‌های سازه‌ی در نظر گرفته شده است. البته از آنجایی که در ساختمان‌های سه‌بعدی با آثار پیچشی قابل توجه، نقاط مختلف در پلان، جابه‌جایی‌های مختلفی خواهند داشت و بنابراین، باید به آن‌ها توجه شود. اما چون تمرکز مطالعه‌ی حاضر روی مقایسه‌ی پاسخ‌های لرزه‌ی در مقدار جابه‌جایی‌های کلی متفاوتی (۵ نقطه‌ی مختلف جابه‌جایی کل بر حسب ارتفاع سازه) قرار دارد، در اینجا فقط روی پاسخ‌های لرزه‌ی ثبت شده در مرکز جرم صحبت شده است.

۱.۳.۳. نتایج مدل‌های ساختمانی ۳ طبقه

تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش APAT، جابه‌جایی‌های جانبی طبقات را به صورت محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. در بیشتر حالت‌ها، جابه‌جایی‌های به دست آمده از طریق روش APAT، از موارد به دست آمده از تحلیل NTHA بیشتر است. این موضوع در درصد‌های مختلف جابه‌جایی کلی مشاهده شده است، که در شکل‌های ۴ و ۵ نیز برای هر دو نوع رکورد زلزله‌ی دور از گسل و نزدیک گسل مشاهده می‌شود. این تذکر لازم است که پروفیل جابه‌جایی معادل ۲ جابه‌جایی کلی سازه (۱۰٪ و ۲۰٪) به عنوان نمونه ذکر شده است. علاوه بر این، برای فراهم شدن امکان مقایسه‌ی نتایج، میانگین مقادیر به دست آمده از رکوردهای مختلف زلزله برای مقایسه با نتایج روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است.

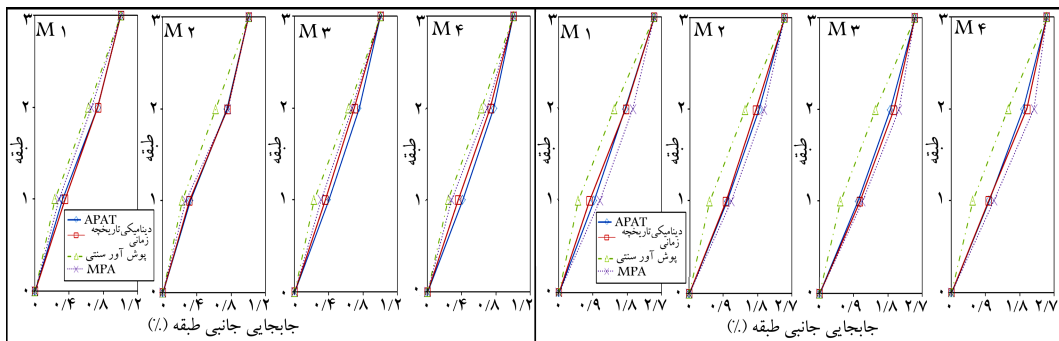
به منظور ارزیابی دقت روش پوش اور معرفی شده در تخمین جابه‌جایی طبقات، یک شاخص خطا بر اساس رابطه‌ی ۱۱ مورد استفاده قرار گرفته است: [۱۶]



الف) جابه‌جایی کلی معادل ۱۰٪

ب) جابه‌جایی کلی معادل ۲۰٪

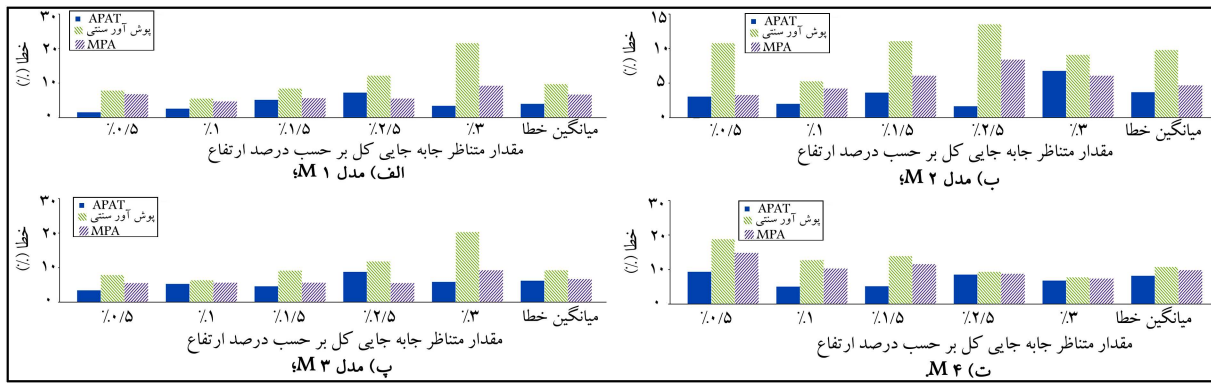
شکل ۴. پروفیل جابه‌جایی کلی طبقات رکوردهای نزدیک گسل.



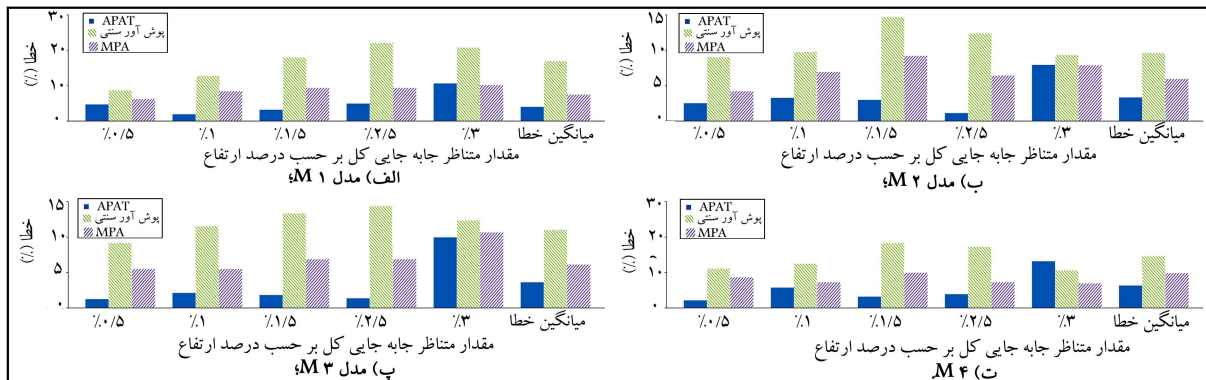
الف) جابه‌جایی کلی معادل ۱۰٪

ب) جابه‌جایی کلی معادل ۲۰٪

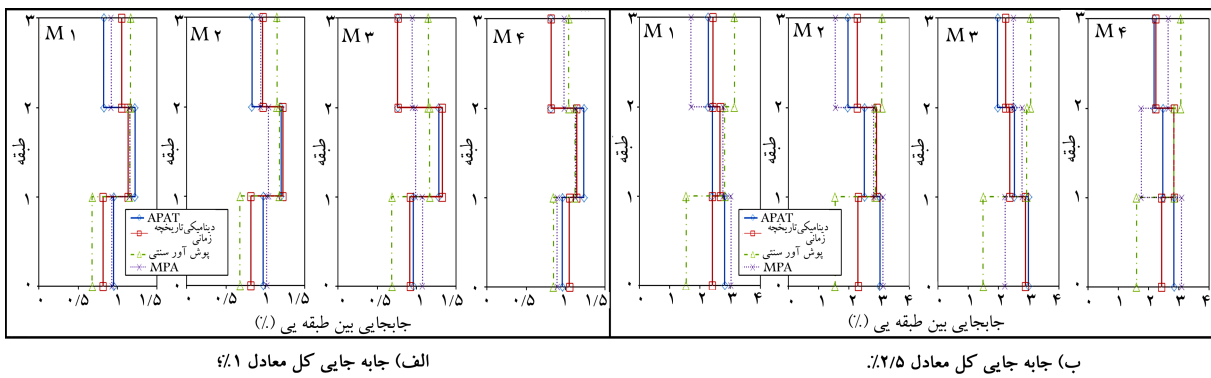
شکل ۵. پروفیل جابه‌جایی کلی طبقات رکوردهای دور از گسل.



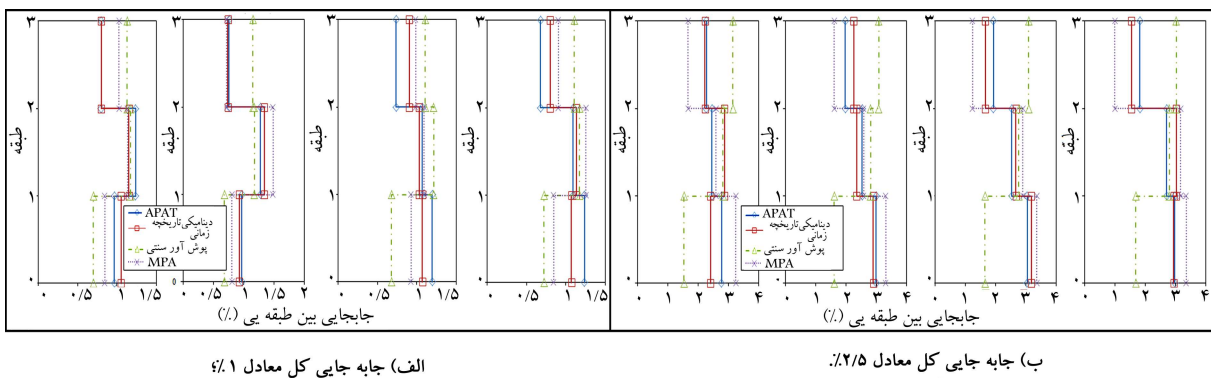
شکل ۶. خطای کل پروفیل جابه‌جایی کلی برای رکوردهای نزدیک گسل.



شکل ۷. خطای کل پروفیل جابه‌جایی کلی برای رکوردهای دور از گسل.



شکل ۸. پروفیل جابه‌جایی بین طبقه‌های رکوردهای نزدیک گسل.



شکل ۹. پروفیل جابه‌جایی بین طبقه‌های رکوردهای دور از گسل.

روش پوش اور مودال، برای مدل های M1 تا M4 به ترتیب برابر ۸/۹۲٪، ۱۲/۷۷٪، ۱۱/۸۵٪ و ۱۴/۶۶٪ برای رکوردهای نزدیک گسل و همچنین برابر ۱۷/۵۴٪، ۱۳/۷۱٪، ۱۵/۴۲٪ و ۱۳/۸۸٪ برای رکوردهای دور از گسل به دست آمده است. مقادیر خطای نتایج روش پوش اور سنتی هم در محدوده ۱۸٪ و بالاتر قرار دارد. این مقادیر نشان دهنده توانایی قابل قبول روش پیشنهادی در تخمین جابه جایی های بین طبقه بی مدل های با پلان نامتقارن است، در حالی که روش پوش اور مودال و به خصوص روش سنتی در تخمین این مقادیر فاقد دقت لازم هستند.

بر اساس مطالب عنوان شده، میانگین کلی به دست آمده برای رکوردهای نزدیک گسل، ۴/۹۴٪ و برای رکوردهای دور از گسل برابر ۶/۸۵٪ است. برخلاف پروفیل جابه جایی کل، در پروفیل جابه جایی بین طبقه بی تحلیل های انجام شده با استفاده از رکوردهای نزدیک گسل به نتایج بهتری منجر شده اند. آثار ناشی از پیچش در رکوردهای نزدیک گسل، به دلیل ماهیت ویژه آنها در انتقال شتاب بیشتری به سازه، اهمیت و اثر بیشتری خواهد داشت. بر این اساس، با توجه به اینکه در روش پیشنهادی، مشخصات پیچشی سازه و آثار ناشی از آن در حین تحلیل در نظر گرفته شده است، این لحاظ کردن آثار در هنگامی که اهمیت و تأثیر بیشتری دارند، منجر به نتایج بهتر و محدوده خطای کمتری در پاسخ های جابه جایی بین طبقه بی شده است، که می توان این موضوع را از نقاط قوت روش پیشنهادی برشمرد.

همان طور که قبلاً اشاره شده است، نتایج ارائه شده برای ساختمان های ۳ طبقه، در ۵ نقطه ی مختلف جابه جایی جانبی ساختمان ها، معادل ۰/۵٪، ۱/۱٪، ۱/۵٪، ۲/۵٪ و ۳/۰٪ ارتفاع سازه، استخراج و بررسی شده اند. در تحلیل های انجام شده تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل، پروفیل های جابه جایی کلی به دست آمده در مقادیر ۲/۵٪ و ۳/۰٪ ارتفاع سازه، بیشترین خطای مشاهده شده را دارند، اما با توجه به اینکه پیشینه ی خطای مشاهده شده در حدود ۹٪ است، می توان ادعا کرد که روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، توانایی بالایی در پیش بینی پاسخ های لرزه یی در محدوده های مختلف رفتار سازه ها، از رفتار کشسان گرفته تا رفتار خمیری دارد.

در پروفیل های جابه جایی بین طبقه بی مدل های ۳ طبقه، در حالی که مقدار خطای مشاهده شده در مدل های M1 و M2 تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل، بالای ۱۰٪ قرار دارد، با افزایش مقدار برون محوری در مدل های M3 و M4 و در نتیجه افزایش آثار پیچشی، مقدار خطای مشاهده شده به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و عمدتاً به زیر ۵٪ رسیده است. این موضوع هم دلیل دیگری بر کارآبودن روش پیشنهادی در هنگامی است که آثار پیچش قابل توجه باشد.

در ادامه، پروفیل های جابه جایی کلی به دست آمده بر اساس تحلیل های انجام شده با استفاده از رکوردهای دور از گسل، نشان دهنده درصد خطای بالایی برای نتایج معادل نقطه ی ۳/۰٪ ارتفاع سازه، در مقایسه با سایر نقاط هستند. در حالی که در بقیه ی نقاط، درصد خطا عمدتاً زیر ۳٪ قرار دارد، نتایج معادل ۳٪ جابه جایی جانبی سازه، درصد خطایی در حدود ۸٪ را نشان می دهند. در مورد پروفیل های جابه جایی بین طبقه بی هم روند مشابهی مشاهده می شود. البته با توجه به اینکه مدل های سازه یی مورد بررسی در مطالعه ی حاضر، مدل های کوتاه مرتبه ی ۳ طبقه هستند و احتمال رسیدن به جابه جایی جانبی معادل ۳٪ ارتفاع سازه برای این قبیل ساختمان ها در هنگام وقوع زلزله، بسیار ضعیف است؛ بنابراین، می توان با قطعیت کافی استدلال کرد که روش پیشنهادی، در تخمین پاسخ های لرزه یی سازه های کوتاه مرتبه با آثار پیچشی قابل توجه، در هر محدوده یی از رفتار (از رفتار کشسان یا خمیری)، توانایی بالایی دارد.

علاوه بر ساختمان های کوتاه مرتبه ی ذکر شده، نتایج تحلیل های انجام شده روی ساختمان ۹ طبقه به ازاء برون محوری های مختلف نیز نشان از تخمین قابل

استفاده قرار گرفته است، که نتایج آن در شکل های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می شود. بر این اساس، دقت بهتر روش پیشنهادی در مقایسه با روش پوش اور مودال و روش سنتی قابل رؤیت است.

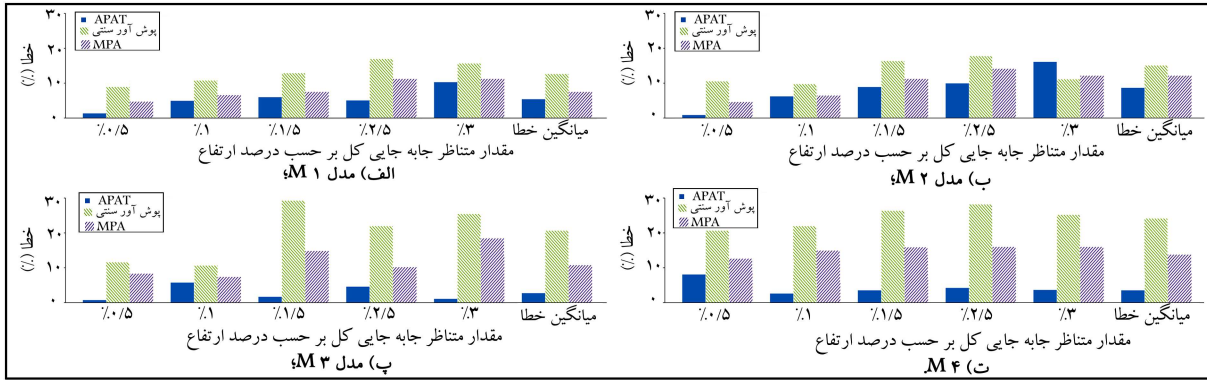
۲.۳.۳. نتایج مدل های ساختمانی ۹ طبقه

پاسخ های لرزه یی مدل های ۹ طبقه به ازاء جابه جایی معادل ۲/۵٪ ارتفاع سازه، که به عنوان نمونه انتخاب شده اند، در شکل ۱۲ ارائه شده است. شکل ۱۲ الف، پروفیل جابه جایی کلی طبقات و شکل ۱۲ ب، پروفیل جابه جایی بین طبقه یی را به ازاء برون محوری های مختلف برابر با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بعد پلان ساختمان نشان می دهند. طبق نتایج ارائه شده، روش پیشنهادی توانسته است پاسخ های لرزه یی را با دقت مناسبی در مقایسه با روش مودال پوش اور و همچنین پوش اور سنتی ارائه دهد. علاوه بر این، مقایسه ی کمی نتایج بر مبنای شاخص خطای معرفی شده در رابطه ی ۱۱ نیز مطابق شکل ۱۳ ارائه شده است. بر این اساس مشاهده می شود که روش پیشنهادی دقت کافی برای تخمین پاسخ های لرزه یی ساختمان های نامتقارن با تعداد طبقات بیشتر نیز دارد و در مقایسه با روش پوش اور مودال و روش پوش اور سنتی (به خصوص در مقادیر بیشتر برون محوری که باعث آثار پیچشی بیشتری می شود)، نتایج بهتری ارائه داده است.

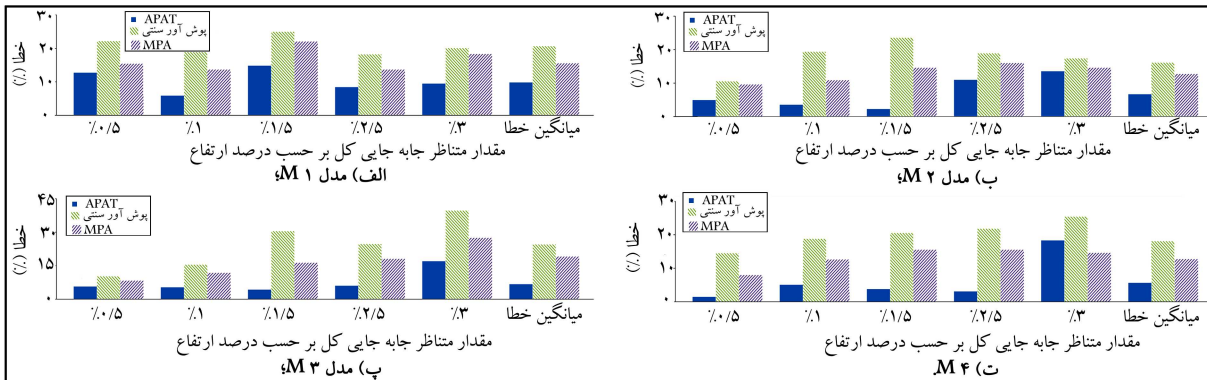
۴.۳. بحث در نتایج

در این قسمت ابتدا نتایج مدل های ساختمانی ۳ طبقه مورد بحث قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود، میانگین خطاهای به دست آمده در تخمین پروفیل جابه جایی کلی بر اساس روش پیشنهادی، در حدود ۵٪ قرار دارد. خطای میانگین به دست آمده برای مدل های M1، M2، M3 و M4 به ترتیب برابر ۳/۷۸٪، ۴/۳۷٪، ۴/۹۴٪ و ۵/۸۸٪ بر اساس رکوردهای نزدیک گسل است. مقادیر مشابهی برای رکوردهای دور از گسل، به ترتیب عبارت اند از: ۷/۱۹٪، ۳/۲۵٪، ۱/۸۶٪ و ۳/۷۴٪. بر این اساس، میانگین کلی به دست آمده برای رکوردهای نزدیک گسل، ۴/۷۴٪ و برای رکوردهای دور از گسل برابر ۴/۰۱٪ است. علاوه بر این، مطابق شکل های ۶ و ۷، میانگین خطاهای به دست آمده در روش پوش اور مودال بر اساس رکوردهای نزدیک گسل، در حدود ۸/۱۲٪، ۵/۲۲٪، ۷/۶۴٪ و ۱۰/۱۱٪ برای مدل های M1، M2، M3 و M4 به دست آمده است، که نشان دهنده دقت روش پیشنهادی در مقایسه با روش مودال است. علت این موضوع را می توان در این نکته دانست که در روش پوش اور مودال، فقط اثرات مودهای پیچشی در وضعیت ارتعاش سازه در نظر گرفته می شود؛ اما در روش پیشنهادی، با استفاده از انرژی اضافی ذخیره شده در سازه، آثار پیچش با تأثیر بیشتری منظور می شود. روند مشابهی در نتایج رکوردهای دور از گسل به دست آمده است، به گونه یی که میانگین خطای روش پوش اور مودال برای مدل های M1، M2، M3 و M4 به ترتیب برابر ۹/۳۳٪، ۷/۴۸٪، ۷/۲۶٪ و ۱۰/۲۵٪ حاصل شده است. علاوه بر مطالب فوق مشاهده می شود که در هر دو مجموعه تحلیل ها تحت اثر رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل، می توان روند کلی افزایش خطاها را با افزایش پیچش مشاهده کرد، به طوری که در مدل M4، که بیشترین برون محوری را دارد، بیشترین خطا نیز مشاهده می شود.

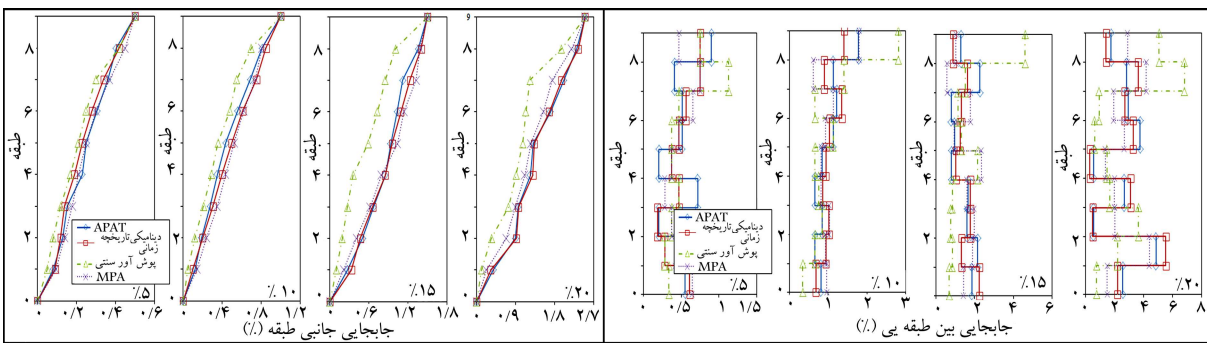
در مورد پروفیل های جابه جایی بین طبقه یی در ساختمان های ۳ طبقه نیز میانگین خطاهای مشاهده شده برای مدل های M1 تا M4 به ترتیب برابر ۸/۴۷٪، ۲/۹۶٪ و ۳/۲۲٪ بر اساس تحلیل های انجام شده با استفاده از رکوردهای نزدیک گسل و برابر ۹/۸۲٪، ۶/۳۴٪، ۷/۱۲٪ و ۴/۱۳٪ بر اساس تحلیل های انجام شده با استفاده از رکوردهای دور از گسل هستند. مقادیر متناظر خطای به دست آمده برای



شکل ۱۰. خطای کل پروفیل جابه‌جایی بین‌طبقه‌یی برای رکوردهای نزدیک گسل.

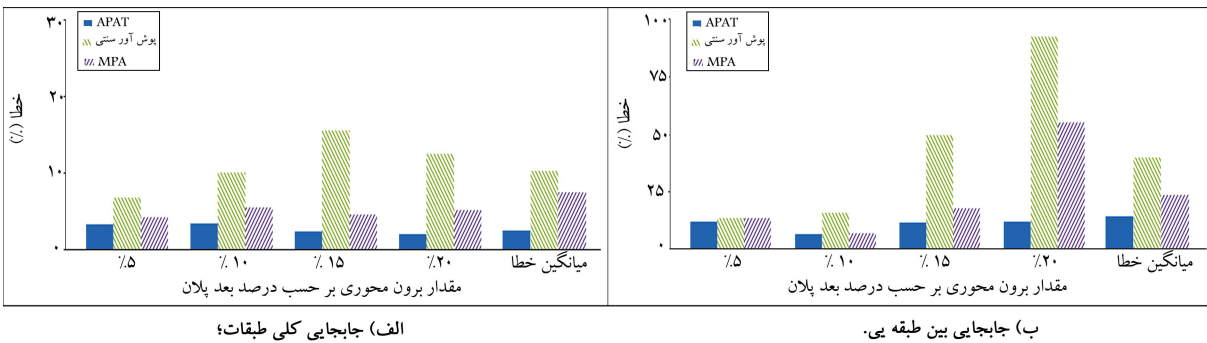


شکل ۱۱. خطای کل پروفیل جابه‌جایی بین‌طبقه‌یی برای رکوردهای دور از گسل.



شکل ۱۲. نتایج مدل ۹ طبقه به ازاء جابه‌جایی معادل ۲/۵٪ ارتفاع سازه. (الف) پروفیل جابه‌جایی کلی طبقات؛ (ب) پروفیل جابه‌جایی بین طبقه‌یی.

شکل ۱۳. خطای کلی مدل ۹ طبقه به ازاء جابه‌جایی معادل ۲/۵٪ ارتفاع سازه.



شکل ۱۴. خطای کلی مدل ۹ طبقه به ازاء جابه‌جایی معادل ۲/۵٪ ارتفاع سازه.

عددی روی مجموعه‌ی از ساختمان‌های سه بعدی با پلان نامتقارن انجام شده است. علاوه بر این، برای ارزیابی بهتر روش برای ساختمان‌های با تعداد طبقات بیشتر، یک مدل ساختمانی ۹ طبقه نیز به اِزاء برون‌محوری‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است. برای اعتبارسنجی نتایج روش پیشنهادی، از روش تحلیل دینامیکی افزایشی (NTHA) به‌عنوان مرجع استفاده و علاوه بر این، نتایج روش پیشنهادی با روش پوش‌اور مودال (برای ساختمان‌های با پلان نامتقارن) و روش پوش‌اور سنتی نیز مقایسه شده و این نتایج به‌دست آمده است:

- روش پیشنهادی توانایی بالایی در تخمین پروفیل جابه‌جایی کلی طبقات و پروفیل جابه‌جایی بین‌طبقه‌ی دارد، به گونه‌ی که تمامی خطاهای مشاهده‌شده در محدوده‌ی ۱۰٪ یا کمتر از آن بوده است؛
- با افزایش برون‌محوری و تشدید آثار پیچشی در ساختمان، همچنان دقت روش پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی قابل قبول است؛
- توانایی روش پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی، با افزایش تعداد طبقات نیز برقرار است. علت اصلی این موضوع در نظر گرفتن آثار مودهای بالاتر، به خصوص مودهای پیچشی است؛
- تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی براساس روش پیشنهادی، در مقایسه با تحلیل دینامیکی غیرخطی بر مبنای هر دو نوع رکوردهای نزدیک گسل و دور از گسل، دقت قابل قبولی دارد؛
- روش پیشنهادی، در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی با آثار پیچشی قابل توجه، در هر محدوده‌ی رفتار (از رفتار کشسان گرفته تا ناحیه‌ی خمیری)، توانایی بالایی دارد. علت اصلی این موضوع، در نظر گرفتن انرژی ناشی از پیچش و همچنین مودهای پیچشی در روش معرفی شده است؛
- روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های پوش‌اور مودال و پوش‌اور سنتی، توانایی بالاتری در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی ساختمان‌های با پلان نامتقارن دارد؛
- روش APAT، به علت سادگی مفهوم و آسانی گام‌های اجرایی، امکان به‌کارگیری آن را برای هر نوع ساختمانی، اعم از ساده یا پیچیده، کوتاه‌مرتبه یا بلندمرتبه فراهم می‌سازد.

در مطالعه‌ی حاضر، کارایی روش پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های لرزه‌ی ساختمان‌های با پلان نامتقارن مورد ارزیابی قرار گرفته است. واضح است که به منظور یک ارزیابی کارآمد از توانایی روش پیشنهادی، باید مطالعه‌ی وسیع‌تری صورت گیرد. از جمله مواردی که باید مورد توجه قرار گیرد، بررسی پاسخ‌های به‌دست‌آمده از نقاط مختلف در پلان است، که به علت وجود پیچش، تحت مقادیر جابه‌جایی‌های مختلفی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، ساختمان‌هایی که پلان آنها از نظر هندسی نیز پیچیدگی‌ها و نامنظمی‌های بیشتری دارد، از موضوعات دیگری خواهد بود که باید مورد بررسی قرار گیرند.

قبول پاسخ‌های لرزه‌ی ساختمان‌های با تعداد طبقات بیشتر با استفاده از روش پیشنهادی داشته است. در مورد تخمین پروفیل‌های جابه‌جایی کلی طبقات براساس روش پیشنهادی، مطابق شکل ۱۳ الف، میانگین خطاهای مشاهده‌شده برای برون‌محوری‌های معادل ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بعد پلان، به ترتیب برابر ۳/۳۶٪، ۴۷/۳٪، ۲/۴۲٪ و ۱/۹۷٪ بوده است. مقادیر متناظر براساس روش پوش‌اور مودال به ترتیب برابر با ۴/۵۹٪، ۵/۹۳٪، ۴/۹۱٪ و ۵/۸۹٪ و براساس روش پوش‌اور سنتی به ترتیب برابر با ۶/۷۹٪، ۱۰/۱۲٪، ۱۵/۵۴٪ و ۱۲/۵۷٪ هستند. بر این اساس، میانگین خطاها براساس روش پیشنهادی زیر ۵٪ (۲/۸۱٪) قرار دارد، در حالی که میانگین خطاها براساس روش پوش‌اور مودال بالای ۵٪ (۵/۳۳٪) و براساس روش پوش‌اور سنتی بالای ۱۰٪ (۱۱/۲۶٪) به‌دست آمده است. در نظر گرفتن مودهای پیچشی به همراه انرژی اضافی ذخیره‌شده ناشی از پیچش در سازه، منجر به نتایج بهتری برای روش پیشنهادی شده است.

در مورد تخمین پروفیل‌های جابه‌جایی بین‌طبقه‌ی نیز در مدل ساختمانی ۹ طبقه، مطابق شکل ۱۳ ب، میانگین خطاهای مشاهده‌شده برای برون‌محوری‌های معادل ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بعد پلان، به ترتیب برابر ۱۰/۳۹٪، ۶/۸۲٪، ۱۰/۳۹٪ و ۱۰/۹۱٪ بوده است. مقادیر متناظر به اِزاء روش‌های پوش‌اور مودال به ترتیب برابر ۱۳/۴۱٪، ۸/۱۲٪، ۱۷/۹۱٪ و ۵۵/۲۰٪ و همچنین به اِزاء روش پوش‌اور سنتی به ترتیب برابر با ۱۴/۱۱٪، ۱۶/۵۱٪، ۴۹/۵۸٪ و ۹۲/۴۰٪ به‌دست آمده است. بر این مبنای، میانگین خطای مشاهده‌شده براساس روش‌های پیشنهادی، روش پوش‌اور مودال و روش پوش‌اور سنتی به ترتیب برابر با ۹/۹۷٪، ۲۳/۶۶٪ و ۴۳/۱۵٪ بوده است. همان‌طور که اشاره شده است، پروفیل جابه‌جایی بین‌طبقه‌ی، به علت اثرگذاری مستقیم در ایجاد خرابی در ساختمان، اهمیت بیشتری دارد. بر این مبنای، روش پیشنهادی توانسته است با میانگین خطایی کمتر از ۱۰٪ پاسخ‌های مدل‌های ساختمانی را پیش‌بینی کند، در حالی که روش‌های پوش‌اور مودال و به‌خصوص روش پوش‌اور سنتی، خطای قابل توجهی داشته‌اند. مجموعه‌ی نتایج به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب و قابل قبول روش پیشنهادی در تخمین پاسخ‌های جابه‌جایی بین‌طبقه‌ی ساختمان‌ها با تعداد طبقات بیشتر است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک روش پوش‌اور به‌نگام‌شونده با در نظر گرفتن اثر پیچش (APAT) به‌عنوان روشی جدید برای تحلیل لرزه‌ی سه‌بعدی ساختمان‌های نامتقارن معرفی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش پیشنهادی، به‌عنوان یک روش یک‌بار اجرا، از یک الگوی بار معادل استفاده می‌کند، که براساس روش ترکیب جرم مؤثر مودی (EMMC) به‌دست می‌آید. سادگی کاربرد و درک آسان روش معرفی شده، در عین منظور کردن پیچش، مودهای پیچشی و آثار ناشی از آنها، از جمله مهم‌ترین مزیتهای روش معرفی شده هستند. برای بررسی اعتبار روش معرفی شده، یک مطالعه‌ی

پانویس‌ها

1. modal pushover analysis (MPA)
2. adaptive modal combination (AMC) procedure

3. an adaptive pushover algorithm considering torsional effects (APAT)
4. effective modal mass combination (EMMC) rule
5. equivalent single degree of freedom (ESDOF)

6. acceleration-displacement response spectrum (ADRS)
7. center of mass (CM)
8. center of stiffness (CS)
9. nonlinear time history analysis (NTHA)

منابع (References)

1. ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, **1**, Redwood City, Calif. (1996).
2. FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (2000).
3. Tso, W.K. and Moghadam, A.S., "Seismic response of asymmetrical buildings using push-over analysis", In: *Proceedings of Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Rotterdam (1997).
4. Kilar, V. and Fajfar, P. "Simple push-over analysis of asymmetric buildings", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **26**(2), pp. 233-249 (1997).
5. Faella, G. and Kilar, V. "Asymmetric multi-storey RC frame structures: Push-over versus nonlinear dynamic analysis", In: *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering* (1998).
6. De Stefano, M. and Rutenberg, A. "Predicting the dynamic response of asymmetric multi-storey wall-frame structures by pushover analysis: Two case studies", In: *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering* (1998).
7. Ayala, A.G. and Tavera, E.A. "A new approach for the evaluation of the seismic performance of asymmetric buildings", In: *Proc. of the 7th National Conference on Earthquake Engineering* (2002).
8. Penelis, Gr.G. and Kappos, A.J. "Inelastic torsion effects in 3D pushover analysis of buildings", In: *Proceedings of the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki (2005).
9. Barros, R.C. and Almeida, R. "Pushover analysis of asymmetric three-dimensional building frames", *J. Civil Eng. Manag.*, **11**(1), pp. 3-12 (2005).
10. Fajfar, P., Magliulo, G., Marušić, D. and Peruš, I. "Simplified non-linear analysis of asymmetric buildings", In: *Proceedings of the 3rd European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Florence (2002).
11. Moghadam, A.S. and Tso, W.K. "Pushover analysis for asymmetric and set-back multi-storey buildings", In: *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1093 (2000).
12. Fajfar, P., Marušić, D. and Peruš, I. "The extension of the N2 method to asymmetric buildings", In: *Proceedings of the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki (2002).
13. Chopra, A.K. and Goel, R.K. "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **33**(8), pp. 903-927 (2004).
14. Tabatabaei, R. and Saffari, H. "Energy-based approach to estimate seismic demands for asymmetric buildings", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **4**(3), pp. 215-230 (2010).
15. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. "Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures", *J. Earthquake Eng.*, **132**(11), pp. 1721-1731 (2006).
16. Shakeri, K., Tarbali, K. and Mohebbi, M. "An adaptive modal pushover procedure for asymmetric-plan buildings", *Engineering Structures*, **36**, pp. 160-172 (March 2012).
17. Shakeri, K. and Ghorbani, S. "A pushover procedure for seismic assessment of buildings with bi-axial eccentricity under bi-directional seismic excitation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **69**, pp. 1-15 (February 2015).
18. Reyes, J.C. and Chopra, A.K. "Three-dimensional modal pushover analysis of buildings subjected to two components of ground motion including its evaluation for tall buildings", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **40**(7), pp. 789-806 (2011).
19. Kaatsız, K. and Sucuoğlu, H. "Generalized force vectors for multi-mode pushover analysis of torsionally coupled systems", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **43**(13), pp. 2015-2033 (2014).
20. Bhatt, C. and Bento, R. "The extended adaptive capacity spectrum method for the seismic assessment of plan asymmetric buildings", *Earthquake Spectra*, **30**(2), pp. 683-703 (2014).
21. Manoukas, G. and Avramidis, I. "Improved multimode pushover procedure for asymmetric in plan buildings under biaxial seismic excitation- application to tall buildings", *Struct. Des. Tall Special Build.*, **24**(6), pp. 397-420 (2014).
22. Poursha, M., Khoshnoudian, F. and Moghadam, A.S. "The extended consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of two-way unsymmetric-plan tall buildings under influence of two horizontal components of ground motions", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **63**, pp. 162-173 (2014).
23. Abbasnia, R. and Zahedifar, S. "Adaptive modal pushover analysis considering modal interaction effects", A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Civil Engineering Department, Iran University of Science and Technology (2011).

24. Antonio, S. and Pinho, R. "Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures", *Journal of Earthquake Engineering*, **8**(4), pp. 497-522 (2004).
25. Antonio, S. and Pinho, R. "Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure", *J. Earthquake Eng.*, **8**(5), pp. 643-661 (2004).
26. Hernandez-Montes, E., Kwon, O.S. and Aschheim, M.A. "An energy-based formulation for first- and multiple-mode nonlinear static (Pushover) analyses", *Journal of Earthquake Engineering*, **8**(1), pp. 69-88 (2004).
27. Gupta, A. and Krawinkler, H. "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resistance frame structures", Stanford University, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Report No. 132 (1999).
28. OpenSees, *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, (2008). (<http://opensees.berkeley.edu>)
29. The MathWorks Inc., *MATLAB-Version 6.1*, Natick, Mass. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Design Example and Commentary for the Calculation of Response and Limit Strength (2007).