J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum 22, Issue 4, winter 2026
Issn: 2821-0999
وبگاه مجله: www.civil-strj.maragheh.iau.ir
آنالیز سازه - زلزله
فصلنامه علمی
دوره ۲۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

Development of a Force-Based Pushover Analysis Method

Milad Farajnia
Department of Civil Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran
seyyed Arash Mousavi Ghasemi *
Department of Civil Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Reza Goli Ejlali
Department of Civil Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Adel Ferdousi
Department of Civil Engineering, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran
Amousavi2000@iau.ac.ir

Keywords:

Pushover analysis,
steel structure,
non-adaptive,
time-history analysis

Abstract

Nonlinear static pushover analysis is regarded as one of the effective tools for evaluating the seismic performance of structures. However, with increasing structural height, the accuracy of this method decreases considerably due to its inability to account for the influence of higher vibration modes and inelastic phenomena such as amplified lateral displacements. The primary objective of this study is to enhance the force-based pushover method in a way that provides dynamically accurate responses while retaining the simplicity of static computational procedures. Accordingly, the performance of the proposed force-based method is quantitatively evaluated and compared with common adaptive and non-adaptive pushover approaches. The estimated seismic demands are validated against the results of rigorous nonlinear time-history analyses (NLTHA) under a set of selected earthquake records.For the three-story frame, the non-adaptive methods with an inverted triangular load pattern demonstrated fully satisfactory performance, with an average error of less than 10% in predicting the maximum inter-story drift ratio compared to NLTHA. In contrast, for the 9- and 20-story frames, neglecting the contribution of higher modes in traditional methods led to a significant reduction in accuracy, resulting in errors of approximately 35–50% in estimating the upper-story bending moments and shear forces. The proposed force-based method was able to substantially reduce these inaccuracies in high-rise structures, lowering the average error to less than 15% relative to the NLTHA results.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

این نشریه تحت قانون بین‌المللی کپی‌رایت Creative Commons: BY-NC است.

* Corresponding Author

فصلنامه علمی
آمایش سازه - زلزله
دوره ۲۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴

توسعه روش تحلیل پوش‌آور مبتنی بر نیرو

میلاد فرج‌نیا
گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
سید آرش موسوی*
گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
رضا قلی اجلالی
گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
عادل فردوسی
گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
Amousavi2000@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۲ آذر ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: ۰۲ اسفند ۱۴۰۴

چکیده

تحلیل پوش‌آور استاتیکی غیرخطی (Pushover Analysis) یکی از ابزارهای مؤثر در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها محسوب می‌شود. بااین‌حال، با افزایش ارتفاع سازه، دقت این روش به دلیل ناتوانی در لحاظ نمودن اثر مودهای بالاتر ارتعاشی و پدیده‌های غیرارتجاعی نظیر تغییر مکان‌های جانبی افزایشی، به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. هدف اصلی این پژوهش، بهبود روش پوش‌آور لرزه‌ای مبتنی بر رویکرد نیرویی است، به‌گونه‌ای که بتواند پاسخی بادقت دینامیکی بالا و درعین‌حال با سادگی محاسبات استاتیکی ارائه دهد. در این راستا، عملکرد روش نیرویی توسعه‌یافته به‌صورت کمی و مقایسه‌ای با روش‌های تطبیقی و غیرتطبیقی متداول ارزیابی گردید. نتایج حاصل از تخمین تقاضای لرزه‌ای، با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی دقیق (NLTHA) تحت مجموعه‌ای از رکوردهای انتخابی زلزله، اعتبارسنجی شدند. برای قاب سه‌طبقه، روش‌های غیرتطبیقی با الگوی بار مثلثی وارونه عملکردی کاملاً رضایت‌بخش از خود نشان دادند؛ به‌گونه‌ای که خطای متوسط در برآورد حداکثر دریفت نسبی طبقات در مقایسه با NLTHA کمتر از ۱۰٪ بود. در مقابل، در قاب‌های ۹ و ۲۰ طبقه، عدم لحاظ سهم مودهای بالاتر در روش‌های سنتی منجر به کاهش چشمگیر دقت نتایج شد؛ به‌طوری که خطای برآورد لنگرهای خمشی در طبقات فوقانی و نیروهای برشی بین ۳۵ تا ۵۰ درصد مشاهده گردید. روش نیرویی پیشنهادی توانست میزان این خطا را در سازه‌های بلندمرتبه به طور قابل‌توجهی کاهش داده و میانگین خطا را به کمتر از ۱۵٪ نسبت به نتایج NLTHA برساند.

کلیدواژگان: تحلیل پوش‌آور، سازه فولادی، غیرتطبیقی، تحلیل تاریخچه زمانی

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

ایمنی و کارایی سازه‌ها در برابر پدیده‌های طبیعی مخرب، به ویژه زلزله‌های شدید، همواره یکی از اساسی‌ترین دغدغه‌های مهندسی سازه بوده است. ارزیابی عملکرد لرزه‌ای (Seismic Performance Assessment) برای پیشگیری از آسیب های گسترده و فروپاشی های احتمالی امری حیاتی است. در این میان، تحلیل پوش آور (Pushover Analysis) به عنوان یک ابزار قدرتمند، ساده و پرکاربرد در مهندسی لرزه‌ای، به منظور ارزیابی ظرفیت سازه تحت بارگذاری های استاتیکی افزایشی شناخته می‌شود. این روش، مبنای اصلی آیین‌نامه‌های ارزیابی لرزه‌ای مانند ASCE/SEI 41-17 [۱] بوده و به مهندسان کمک می‌کند تا نقاط ضعف و مراحل آسیب پذیری سازه را پیش بینی کنند. روش های اولیه و متداول تحلیل پوش آور از یک توزیع بار جانبی ثابت استفاده می‌کنند که معمولاً بر اساس فرض حاکمیت مود اول ارتعاش سازه بنا شده‌اند. در حالی که، تحقیقات صورت گرفته توسط محققانی همچون Chopra، نشان داد که این رویکرد در ساختمان‌های بلند، نامنظم یا دارای توزیع غیریکنواخت سختی، که اثر مودهای بالاتر ارتعاش در پاسخ دینامیکی سازه قابل توجه است، دچار خطای چشمگیری می‌شود[۲]. در مطالعات انجام شده هدف، پیشنهاد و ارائه روش پوش آوری بوده است که بتواند شبیه سازی دقیق تری از رفتار سازه داشته باشد. بدین منظور روش های گوناگونی معرفی شده اند که از اولین روش ها می توان به روش N2 [۳] اشاره نمود. در مطالعه ای که بر روی عملکرد لرزه ای ساختمان ها انجام شد نشان داده شد که در تحلیل های پوش آور نیاز به درنظر گرفتن اثر مودهای بالاتر وجود دارد [۴]. در ادامه بمنظور بهبود بخشیدن به عملکرد تحلیل پوش آور، روشی برای تحلیل پوش اور مبتنی بر نیرو پیشنهاد شد که بتواند اثرات مودهای بالاتر را در سازه‌ها در نظر بگیرد. در این روش با استفاده از شبیه سازی‌های عددی نشان داده شد که در ساختمان‌های بلند، پیچش طبقات نقش حیاتی در پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های لرزه‌ای دارد و مدل‌های معمول قادر به لحاظ کردن این اثرات نیستند [۵]. در سال های بعد با استفاده از روش های بهینه سازی اقدام به توسعه و بهبود بخشیدن به تحلیل پوش‌آور شد [۶]. تحقیقات بیشتر نشان دادند که روش های اولیه پوش آور قابلیت استفاده در ساختمان های میان مرتبه و بلند مرتبه را ندارند، بنابراین، در پاسخ به این نارسایی، تحقیقات گسترده‌ای بر روی روش‌های پوش آور تطبیقی و غیر تطبیقی متمرکز شدند. این روش‌ها، الگوی بار جانبی را بر اساس خواص مدل و سختی‌های لحظه‌ای سازه در طول فرآیند بارگذاری غیرخطی به‌روزرسانی می‌کنند. به عنوان مثال، روش هایی توسط محققان توسعه یافت که بار جانبی را متناسب با پاسخ مودال سازه بهنگام می‌سازند [۷]، [۸]و [۹]. این روش‌های تطبیقی به طور قابل توجهی دقت ارزیابی را به ویژه در تخمین پاسخ‌های جابجایی (Displacement Response) افزایش دادند. با این وجود، تمرکز عمده این روش‌های تطبیقی پیشرفته بر روی پاسخ های جابجایی بوده است و تخمین دقیق پاسخ‌های نیرویی (Force Response) مانند لنگرهای خمشی و برش‌های ایجاد شده در اعضای سازه، که مستقیماً برای طراحی و ارزیابی مقاطع بحرانی حیاتی هستند، همچنان نیازمند بهبود است.

بنابراین، شکاف پژوهشی در زمینه توسعه یک روش کارآمد وجود دارد که بتواند دقت بالای روش‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی را با سادگی محاسباتی روش‌های استاتیکی غیرخطی ترکیب کند، درحالی‌که تمرکز خود را بر تخمین دقیق پاسخ‌های نیرویی اعضای سازه قرار دهد. به طور خاص، یک الگوی بارگذاری که بتواند اثرات هم‌زمان مودهای بالاتر و پدیده‌هایی همچون پیچش (Torsion) ناشی از رفتار غیرخطی را در ساختمان‌های بلند و نامنظم لحاظ کند، می‌تواند ابزار بسیار ارزشمندی برای مهندسان سازه باشد.

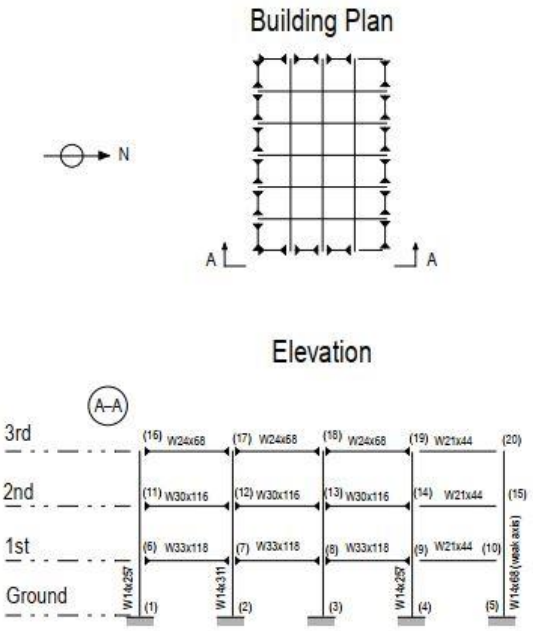
در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش حاضر باهدف بهبود تحلیل پوش‌آور لرزه‌ای، یک چارچوب تحلیلی پیشرفته را بر اساس رویکرد نیرویی (Force-Based Pushover) توسعه داده و اعتبارسنجی می‌کند. نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه یک الگوی بارگذاری چند مودی مبتنی بر نیرو است که با ترکیب ضرایب مشارکت مودی و روش‌های تحلیل پوش‌آور گوناگون، دقت تخمین پاسخ‌های نیرویی را به طور چشمگیری به نتایج تحلیل دینامیکی نزدیک می‌سازد.

هدف کلی این مقاله، ارائه و اعتبارسنجی الگوی بارگذاری و روش تحلیلی ارتقایافته است تا بتواند پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را با کمترین زمان و پیچیدگی، نسبت به تحلیل‌های پیچیده، تخمین بزند. در بخش‌هایی بعدی مقاله، ابتدا مبانی نظری روش‌های پوش‌آور و رویکرد نیرویی معرفی شده تشریح می‌شود. سپس، جزئیات الگوریتم روش پیشنهادی و الگوی بارگذاری توسعه‌یافته ارائه می‌گردد. در ادامه، نتایج حاصل از اعمال این روش بر روی سازه‌های نمونه مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد و در نهایت، نتایج با تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی مقایسه می‌شوند تا کارایی و دقت روش بهبودیافته اثبات گردد.

۲- مشخصات ساختمان های نمونه مورد تحقیق

سه قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۳، ۹ و ۲۰ طبقه که از پروژه SAC [۱۰] اقتباس شده‌اند، بعنوان مدل‌های مرجع در این تحقیق انتخاب گردیده‌اند. این قاب‌ها نمایانگر انواع متداول سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند مرتبه فولادی در نواحی با خطر لرزه‌ای بالا هستند. موقعیت مکانی انتخاب شده در طراحی این ساختمان شهر لس آنجلس ایالت کالیفرنیا بوده است که از نظر لرزه خیزی در رده مناطق با شدت خیلی زیاد می باشد. ساختمان سه طبقه دارای ابعاد ۳۶/۵۸ در ۵۴/۸۷ متر در پلان و ۱۱/۸۹

ارتفاع با سیستم قاب خمشی محیطی و قاب های داخلی از نوع ثقلی می باشد. فاصله مرکز به مرکز ستون ها برابر با ۹/۱۵ متر در هر دو جهت اصلی که در جهت شمال- جنوب دارای چهار دهنه و در جهت شرق- غرب شامل شش دهنه با ابعاد دهنه های ذکر شده است، شکل (۱).



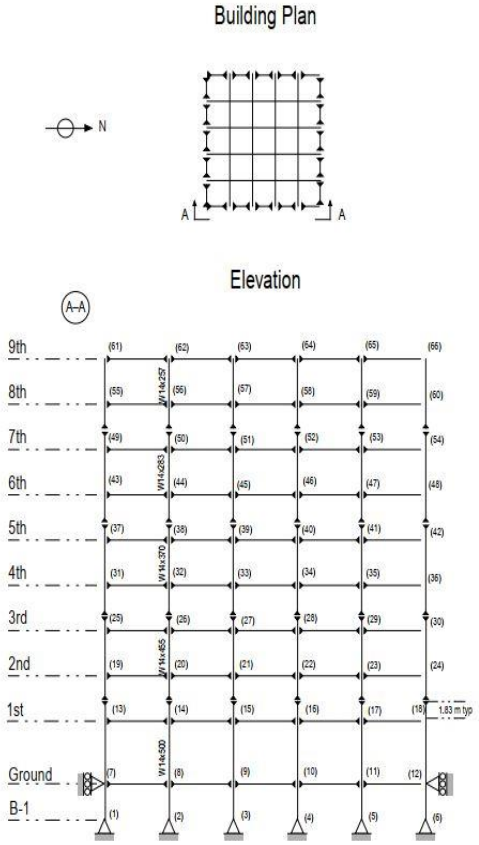
شکل ۱ – پلان و مقطع سازه ۳ طبقه [۱۰]

ساختمان نه طبقه دارای ابعاد ۴۵/۷۳ در ۴۵/۷۳ متر در پلان و ۳۷/۱۹ متر ارتفاع می باشد. فاصله محور به محور ستون ها برابر با ۹/۱۵ متر در هر دو جهت اصلی شمال- جنوب و شرق- غرب که در هر دو دارای پنج دهنه است. مقاومت در برابر بارهای جانبی توسط سیستم قاب های خمشی فولادی که در هر دو جهت در محیط سازه قرار گرفته اند تامین شده و قاب های داخلی تنها نقش باربری ثقلی را دارند که از قاب های فولادی با اتصالات مفصلی تشکیل شده اند، شکل (۲).

ساختمان ۲۰ طبقه دارای ابعاد ۳۰/۴۸ در ۳۶/۵۸ متر در پلان و ۸۰/۷۷ متر ارتفاع می باشد. فاصله محور به محور ستون ها برابر با ۶/۱۰ متر در هر دو جهت اصلی شمال- جنوب و شرق- غرب که در جهت شمال- جنوب دارای پنج دهنه و در جهت شرق- غرب دارای ۶ دهنه است. مقاومت در برابر بارهای جانبی توسط سیستم قاب های خمشی فولادی که در هر دو جهت در محیط سازه قرار گرفته اند تامین شده و قاب های داخلی تنها نقش باربری ثقلی را دارند که از قاب های فولادی با اتصالات مفصلی تشکیل شده اند، شکل(۳).

۲-۱- مصالح

تنش تسلیم مصالح فولاد در ستون‌ها برابر با Fy = 345 MPa و برای تیرها برابر با Fy=248 MPa در نظر گرفته شده است.
مدول الاستیسیته فولاد برابر با Es = 200 GPa است.
نسبت پواسون: ۰/۳
کرنش نهایی فولاد: ۰/۱۵



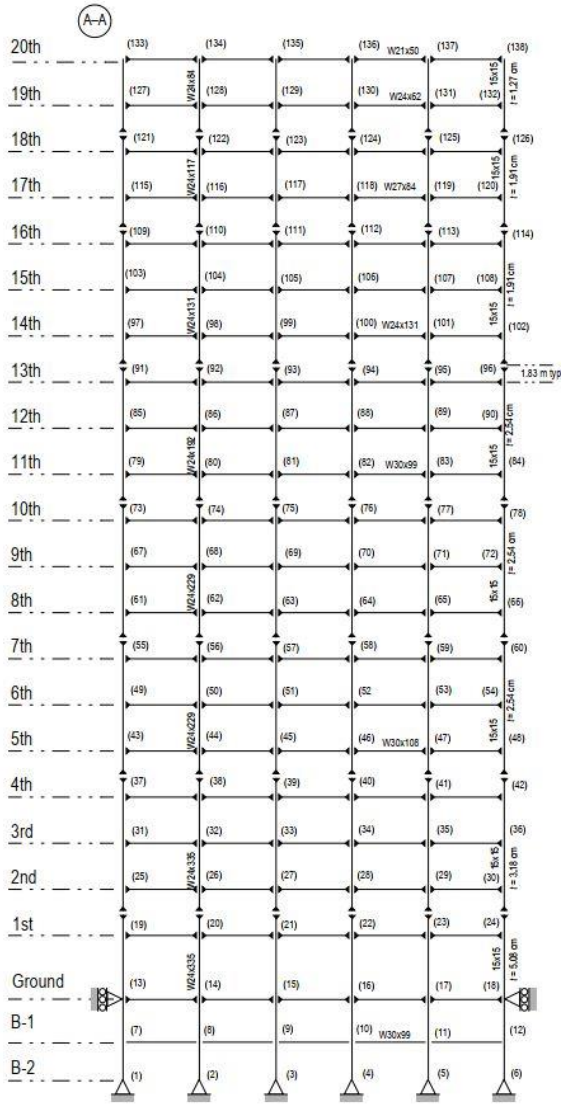
شکل ۲- پلان و مقطع سازه ۹ طبقه [۱۰]

۲-۲ مدلسازی و رفتار غیر خطی

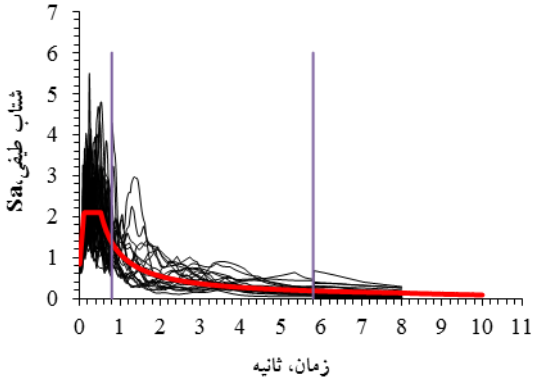
مدل‌سازی از مهم‌ترین مراحل انجام یک تحقیق است. بدین منظور باتوجه‌به ابعاد و اندازه سازه‌های نمونه و همچنین نوع تحلیل‌های انجام شده از نرم‌افزار اوپنسیس به‌منظور مدل‌سازی استفاده شده است. با علم به اینکه سازه‌های نمونه فولادی هستند، برای فولاد سازه‌ای از مدل رفتاری غیرخطی دوخطی با سخت‌شوندگی کرنشی استفاده شده است. بدین منظور در نرم‌افزار اوپنسیس از مصالح فولاد Steel 02 بهره گرفته شده است. در مدل‌سازی مفاصل پلاستیک از روش مفصل متمرکز که با رفتار دوخطی مبتنی بر مدل زوال اصلاح شده ایبارا-کراوینکلر مدل‌سازی شده‌اند.

۳- رکوردهای مورد استفاده

در این مقاله از مجموعه رکوردهای حوزه دور ارائه شده در FEMA P695 [۱۱] استفاده گردیده است. مجموعه رکوردهای حوزه دور شامل ۲۲ جفت مؤلفه افقی جنبش های زمین است که در ساختگاه با فاصله ای بزرگتر یا معادل با ۱۰ کیلومتر از گسل قرار گرفته اند. بمنظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی رکوردهای زلزله باید مقیاس سازی شوند. روش های گوناگونی برای مقیاس سازی رکوردها وجود دارند که در این تحقیق از روش مقیاس دامنه استاندارد ASCE 41-17 [۱] برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله استفاده شده است. در شکل (۴)، ۴۴ مؤلفه مجموعه رکوردها و همچنین طیف پاسخ حداکثر زلزله محتمل (MCE) برای سازه ۲۰ طبقه نشان داده شده است. در این شکل خطوط قائم نمایانگر محدوده 0.2T تا 1.50T می باشد.



شکل ۳- مقطع ارتفاعی سازه ۲۰ طبقه [۱۰]



شکل ۴- طیف پاسخ مجموعه رکوردهای مقیاس شده

٤- روش انجام تحلیل

در مقاله حاضر تلاش شده است تا با تکامل روش‌های استاتیکی غیرخطی یا به‌اختصار تحلیل پوش‌آور معایب این روش در برآورد عملکرد سازه‌های مختلف مرتفع گردد؛ بنابراین، برای نیل به این هدف نتایج روش پیشنهادی با نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه و نتایج ارائه شده‌اند. یکی از مهم‌ترین پارامترها در تحلیل پوش‌آور تعیین تغییر مکان هدف است. تعیین دقیق تغییر مکان هدف حیاتی است، چرا که مبنای اصلی قضاوت مهندسی در مورد کفایت مقاومت و شکل‌پذیری سازه در برابر زلزله‌های آتی است. اگر تغییر مکان هدف به‌درستی محاسبه نشود، ممکن است ارزیابی عملکرد سازه به خطا رفته و تصمیمات نادرستی در خصوص نیاز به بهسازی یا میزان آن اتخاذ گردد. تغییر مکان هدف با استفاده از روش ضرایب استاندارد ASCE 41-17 [۱] محاسبه و بدست آمده اند.

٤-۱- تحلیل پوش آور

برای درنظرگرفتن اثر مودهای بالا در تحلیل‌های پوش‌آور در برخی روش‌های ارتقایافته مانند تحلیل پوش‌آور مودی (MPA)و مودی اصلاح شده (MMPA)اثر مودهای مختلف به‌صورت مستقل فرض شده است و نتایج به‌صورت ترکیبی از نتایج این مودها حاصل شده‌اند. در این تحقیق نیز از تحلیل پوش‌آور چند مودی منتها با رویکردی جدید استفاده خواهد شد. در تحلیل پوش‌آور تطبیقی مودی، در هر مرحله از تحلیل بارگذاری جانبی وارد بر سازه باتوجه‌به سختی و شکل مود سازه بهنگام شده و این بهنگام سازی بارگذاری تا رسیدن به تغییر مکان هدف ادامه خواهد داشت؛ بنابراین، این روش یک راه برای غلبه بر محدودیت‌های تحلیل پوش‌آور متداول که بر اساس مود غالب اول بوده‌اند است. بااین‌وجود این روش باتوجه‌به هزینه محاسباتی بالا و زمان بالای تحلیل و همچنین امکان واگرایی در حین تحلیل کاربرد آن را

برای سازه‌های با پیچیدگی و طبقات زیاد با مشکل مواجه می‌کند. ازآنجایی‌که بارگذاری خارجی در معادله دینامیکی حرکت می‌تواند به‌صورت تابعی از زمان و تابعی از توزیع مکان نیروهای مؤثر زلزله در ارتفاع ساختمان باشد که این نیز می‌تواند به‌صورت توزیع نیروهای اینرسی مودی توسعه داده شود، و همچنین مناسب‌ترین روش اعمال بارگذاری زلزله در یک تحلیل استاتیکی لرزه‌ای به‌کارگیری طیف پاسخ زلزله است، بنابراین توزیع نیروی جانبی مودی در یک تحلیل پوش‌آور می‌تواند به‌صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شود:

$$f_n = \Gamma_n \, m \, \phi_n \, S_a \, (T_n, \zeta_n) \qquad (۱)$$

طبق تحقیقات گذشته ضریب وزنی S_a (شبه شتابی است که تابعی از زمان تناوب ارتعاش T_n و نسبت میرایی ζ_n مود n است بیان می‌شود) برای درنظرگرفتن اثر محتوای فرکانس زلزله در پاسخ سازه در رابطه فوق وارد شده است که با درنظرگرفتن این پارامتر در محاسبه نیروهای جانبی می‌توان اثر مودها را لحاظ نموده و در نتیجه امید داشت نتایج تحلیل پوش‌آور را بهبود بخشد. در تحقیق حاضر از یک توزیع نیروی جانبی مودی نوین به‌منظور توزیع نیروی جانبی مود n ام بهره برده شده است که بر اساس آن توزیع نیرو به ضریبی از نسبت مشارکت جرم مؤثر مودی که توسعه داده شده روابط پیشین است و جایگزین ضریب مشارکت مودی در رابطه (۱) شده است، استفاده شده است. در نتیجه توزیع نیروی جانبی برای مود n ام از رابطه (۲) حاصل می‌شود

$$F_n = \alpha_n \, m \, \phi_n \, S_a \, (T_n, \zeta_n) \qquad (۲)$$

ازآنجاکه ضریب نسبت مشارکت جرم مودی برای همهٔ مودها برابر واحد است، انتظار می‌رود این نسبت بهتر بتواند مشارکت هر مود در توزیع نیروی جانبی را نشان بدهد. در تحقیقات گذشته برای ترکیب نیروهای مودی و محاسبه یک الگوی بارگذاری ثابت از قواعد ترکیب مودی مربعی مانند قاعده (SRSS) استفاده شده است. محدودیت اصلی استفاده از این قواعد آن است که اثر تغییر علامت نیرو در مودهای بالا در الگوی بار اعمالی منعکس نمی‌شود. در پژوهش حاضر قاعده جمع جبری برای ترکیب نیروهای مودی مورداستفاده قرار گرفته است که جمع جبری برای ترکیب نیروهای مودی و ایجاد یک الگوی بارگذاری برای انجام تحلیل پوش‌آور بکار گرفته شده است، بنابراین برای محاسبه نیروهای جانبی طبقات از رابطه‌های پیشنهادی (۳) تا (۵) استفاده نموده‌ایم:

$$F_k = \sum_{i=1}^{N} f_i = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i m \phi_i S_{ai}(T_i, \xi_i) \qquad (۳)$$

(۴)

$$F_2 = f_1+f_2 = \alpha_1 \, m \, \phi_1 \, Sa_1(T_1, \zeta_1)+\alpha_2 \, m \, \phi_2 \, Sa_2(T_2, \zeta_2)$$

$$F_3 = f_1+f_2 = \alpha_1 \, m \, \phi_1 \, Sa_1(T_1, \zeta_1)+\alpha_2 \, m \, \phi_2 \, Sa_2(T_2, \zeta_2) + \alpha_3 \, m \, \phi_3 \, Sa_3(T_3, \zeta_3) \qquad (۵)$$

در این روش اثر مودهای بالا و نیز اثر محتوای فرکانس طیف پاسخ زلزله در الگوی بار جانبی در نظر گرفته خواهد شد. روند تعیین الگوی ارتجاعی در تحلیل پوش‌آور، ارائه روش تحلیل پوش‌آور چند مودی است؛ بنابراین، ابتدا می‌بایست یک تحلیل مقدار ویژه برای تعیین شکل مودی ارتعاشی سازه انجام شود سپس نیروی مودی طبقات با استفاده از الگوی بارگذاری بالا برای انجام تحلیل پوش‌آور به دست بیایند.

٤-۲- تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

در این مقاله از نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به‌عنوان مرجع مقایسه نتایج بهره گرفته شده است؛ بنابراین، پس از مقیاس‌سازی مجموعه ۴۴ مولفه افقی رکوردها، تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه های نمونه انجام و میانگین نتایج بدست آمده برای هر طبقه بعنوان نتیجه نهایی ارائه شده است.

۵- نتایج

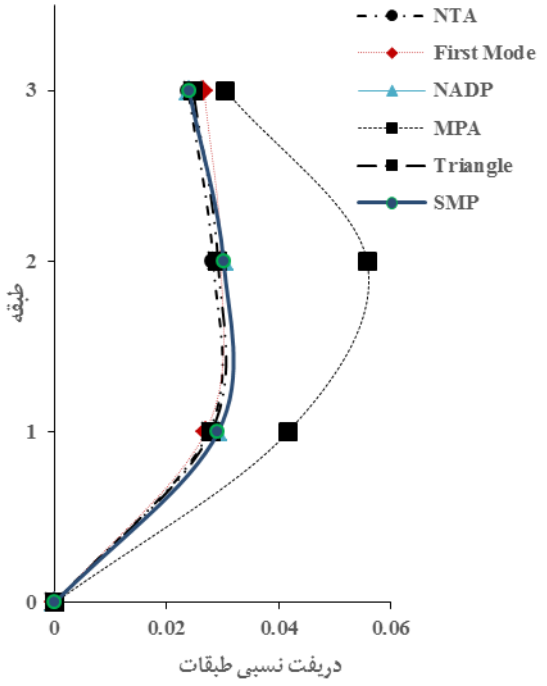
در این بخش نتایج مربوط به روش پوش‌آور پیشنهادی و سایر روش‌های پوش‌آور ارائه و با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی به‌عنوان مرجع، مقایسه و مورد بحث قرار گرفته‌اند. سازه‌های نمونه شامل سه سازه ۳، ۹ و ۲۰ طبقه هستند که بترتیب نمایانگر سازه های کوتاه، میان و بلند مرتبه می باشند. نتایج بترتیب برای هر یک از سازه ها که شامل تغییر مکان هدف، دریفت نسبی طبقات و لنگر خمشی ایجاد شده در تیرها و ستون ها است ارائه شده اند.

در جدول (۱) نتایج مربوط به محاسبه تغییر مکان هدف برای سازه های نمونه با استفاده از روش ضرایب استاندارد ASCE 41-17 [۱] نشان داده شده است که تغییر مکان های هدف محاسبه شده مبنای استخراج دریفت ها و لنگرهای خمشی در تحلیل های پوش اور بوده اند.

جدول ۱- نتایج تغییر مکان هدف سازه های نمونه

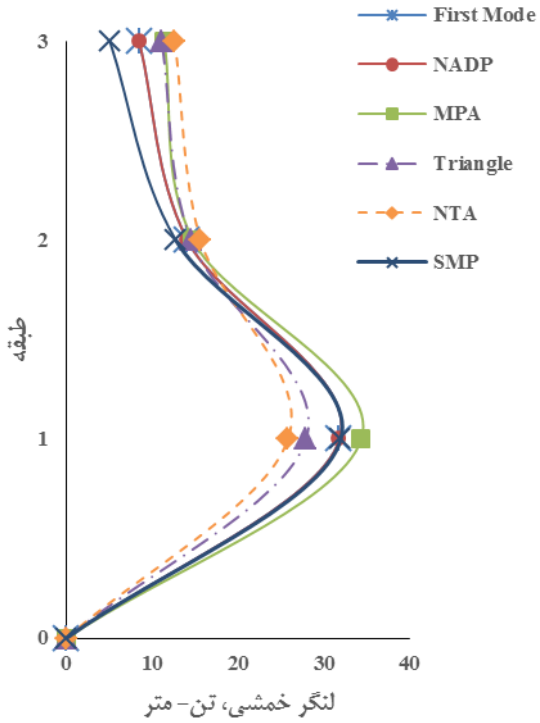
سازه	T_e (sec)		C_0	C_1	C_2	S_a	δ_t (cm)
۳	T_1	۱/۰۱	۱/۲	۱	۱	۱/۰۸٤	۳۲/۹۷
۹	T_1	۲/۲۵۷	۱/۲۸	۱	۱	۰/٤۸۵	۷۸/۵٦
	T_2	۰/۸۸۲	۱/٤۸	۱/۱	۱	۱/۱۹۱	۳۷/٤۷
	T_3	۰/۵۳	۱/٤۸	۱/۵	۱/۰٤	۲/۰۷	۳۳/۳۵
۲۰	T_1	۳/۸۳۱	۱/۳	۱	۱	۰/۲۸٦	۱۳۵/۵٦
	T_2	۱/۳۵٦	۱/۵	۱	۱	۰/۸۰۸	۵۵/۳٦
	T_3	۰/۷۹۸	۱/۵	۱/۱۳	۱	۱/۳۷۲	۳٦/۷۹

در ادامه نتایج سازه نمونه سه‌طبقه در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده شده اند. در شکل (۵) نتایج مربوط به دریفت نسبی طبقات سازه سه طبقه و در شکل (۶) لنگر خمشی بوجود آمده در ستون گوشه و در شکل (۷) نیز لنگر خمشی بوجود آمده در تیر متصل به این ستون نشان داده شده است.

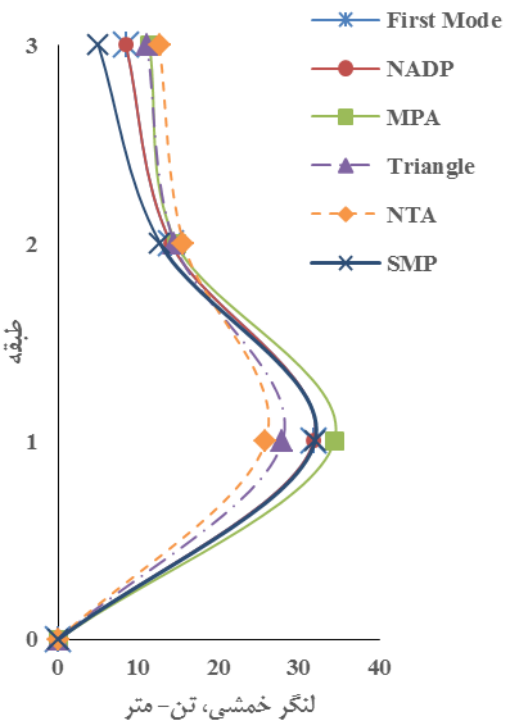


شکل ۵- نمودار دریفت نسبی طبقات سازه سه طبقه

بادقت در نتایج ارائه شده در شکل (۵) مشاهده می شود زمانی که محاسبات براساس تغییر مکان هدف بدست آمده از روش ASCE 41-17 [۱] انجام شود، نتایج بدست آمده برای دریفت نسبی طبقات با نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی در مطابقت خوبی خواهند بود. بنابراین، باتوجه به اینکه یکی از اهداف تحقیق معرفی روش پوش اوری ساده و سریع بوده است، روش پوش اور براساس الگوی بارگذاری مثلث وارونه پیشنهاد می شود. در نتیجه، باتوجه به حجم محاسباتی کمتر روش الگوی مثلث وارونه نسبت به سایر روش ها که خود این روش یکی از روش های پیشنهادی برای استفاده در سازه های کوتاه مرتبه نیز بود، استفاده از این روش باتوجه به نتایج ارائه شده در شکل (۵) پیشنهاد می شود. در ادامه نتایج مربوط به لنگر خمشی بوجود آمده در یک ستون و تیر متصل به آن ارائه شده است.



شکل ۶- توزیع ارتفاعی لنگر خمشی در ستون گوشه سازه سه طبقه



شکل ۷- نمودار توزیع ارتفاعی لنگر خمشی در تیر کناری سازه سه طبقه

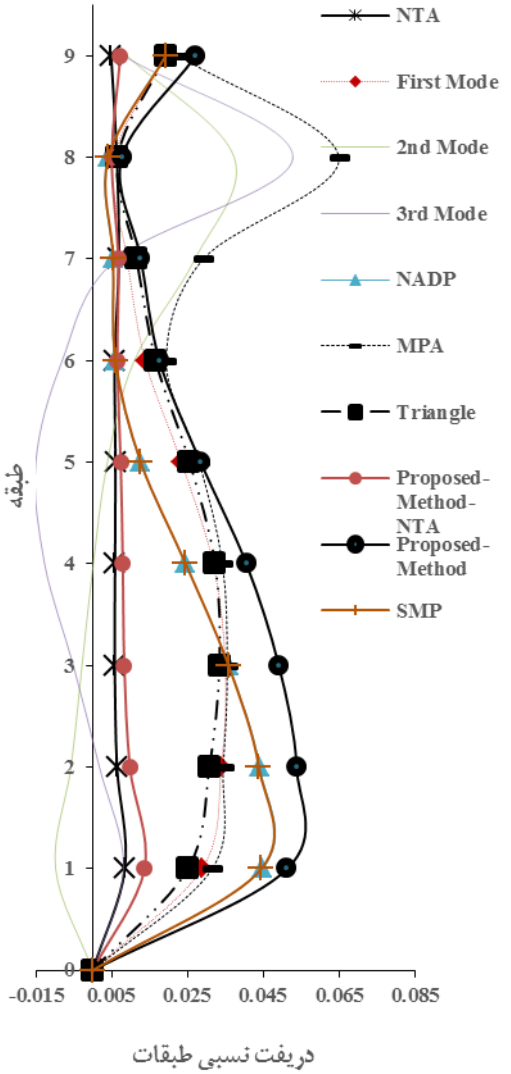
بادقت در نتایج نشان‌داده‌شده در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می گردد که نتایج تحلیل پوش اور با الگوی بارگذاری مثلثی وارونه بیشترین نزدیکی را به نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی دارد و توانسته است نسبت به سایر روش های تحلیل پوش اور با دقت بهتری لنگر خمشی بوجود آمده در تیرها و ستون ها را محاسبه کند. بنابراین، بعنوان نتیجه کلی می توان اینگونه بیان نمود که برای سازه های کوتاه مرتبه می توان از الگوی بارگذاری مثلث وارونه یا الگوی بارگذاری براساس مود اول سازه در تحلیل های پوش اور استفاده نمود.

در ادامه نتایج مربوط به سازه ۹ طبقه ارائه و مورد بحث قرار گرفته است. نتایج ارائه شده برای سازه ۹ طبقه بترتیب نتایج نشان داده شده برای سازه سه طبقه آورده شده اند. در شکل (۸) نتایج مربوط به دریفت نسبی طبقات ارائه شده است. در این شکل نیز بمنظور مقایسه هر چه بیشتر نتایج، نتایج هر سه مود اول سازه و سایر روش های تحلیل پوش اور و ترکیب آنها و تحلیل پوش اور پیشنهادی و نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی نیز قابل مشاهده است. براساس روش پوش اور پیشنهاد شده در بخش پیشین برای سازه های میان و بلند مرتبه، ابتدا شکل تغییر شکل یافته سه مود اول سازه محاسبه، سپس مقادیر هر سه مود برای هر طبقه جمع جبری شده تا یک عدد برای هر طبقه حاصل شود. در ادامه اعداد بدست آمده برای هر طبقه بصورت یک الگوی بارگذاری با توجه به روابط ارائه شده به سازه اعمال شده است.

همچنین، یک تحلیل پوش اور براساس الگوی بارگذاری مثلثی وارونه نیز انجام شده است. در نهایت از ترکیب نتایج هر دو تحلیل، روش تحلیل پوش اور پیشنهادی برای سازه های میان و بلند مرتبه معرفی شده است.

به‌منظور محاسبه دریفت‌های به وجود آمده در سازه نمونه نتایج دو تحلیل فوق‌الذکر با هم ترکیب شده‌اند. در ترکیب نتایج از روش SRSS استفاده شده است. همانند سازه ۳ طبقه نتایج دریفت ها با استفاده از تغییر مکان هدفی که براساس استاندارد ASCE 41-17 [۱] و میانگین تغییر مکان بام تحلیل تاریخچه زمانی حاصل شده است، محاسبه گردیده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۸) مشاهده می گردد زمانی که در تحلیل پوش اور پیشنهادی (Proposed- Method- NTA) دریفت ها در تغییر مکان هدف متناظر با میانگین تغییر مکان بام حاصل از تحلیل های تاریخچه زمانی غیر خطی قرائت شوند، مقادیر این دریفت ها در مطابقت بسیار نزدیکی به دریفت های حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی خواهند بود. ذکر این نکته ضروری است که اگر تغییر مکان هدف محاسبه شده براساس استاندارد ASCE 41-17 [۱] در عدد ۰/۲۵ ضرب گردد با تقریب بسیار خوبی نتایج به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی نزدیک خواهد شد. همچنین در این شکل مشاهده می شود که سایر روش های پوش اور پیشنهاد شده پیشین نتوانسته اند دریفت های ایجاد شده در طبقات را به درستی محاسبه کنند و مقادیر آنها در طبقات پایین بسیار بیشتر از دریفت های ایجاد شده در نتیجه تحلیل تاریخچه زمانی بوده است.

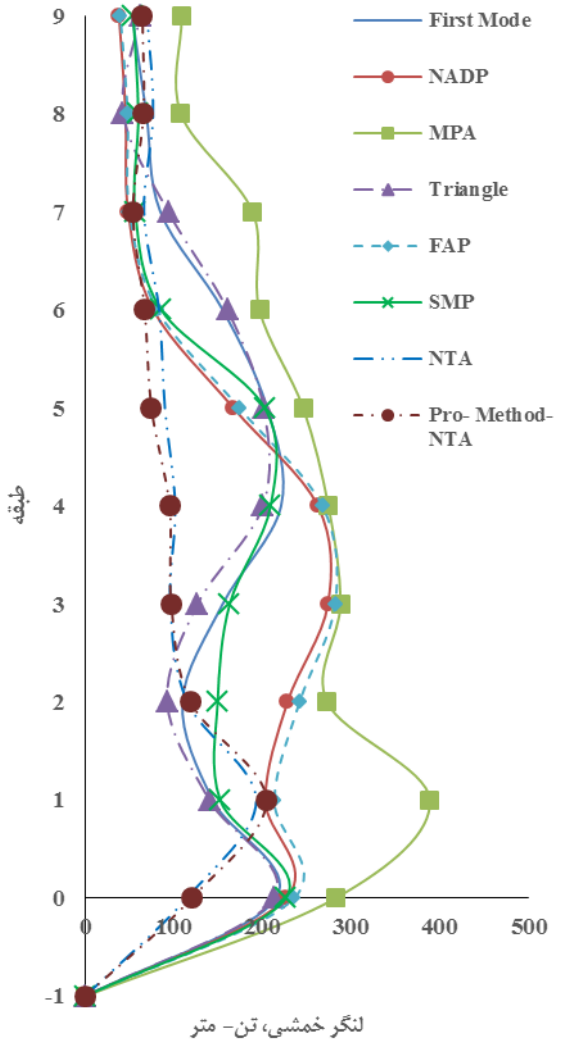
بنابراین، به‌عنوان یک نتیجه می‌توان بیان نمود که روش پوش‌آور پیشنهادی زمانی که تغییر مکان هدف برابر ۲۵ درصد تغییر مکان هدف محاسبه شده براساس روش ضرایب استاندارد ASCE 41-17[۱]در نظر گرفته شود، دریفت های بوجود آمده در طبقات مختلف سازه به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی مطابقت عالی خواهد داشت.



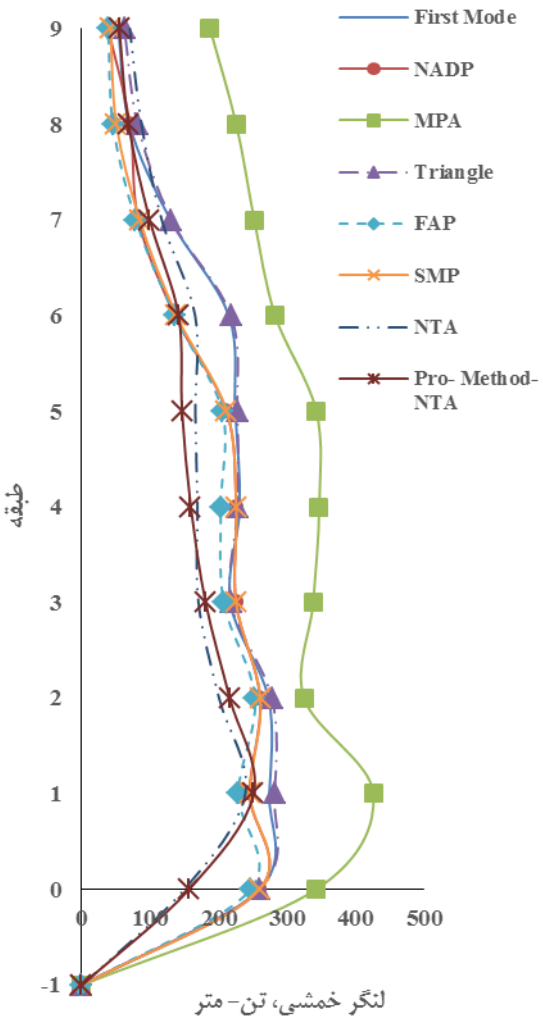
شکل ۸- نمودار دریفت نسبی طبقات سازه ۹ طبقه

در ادامه به‌منظور ارزیابی بیشتر در خصوص کارایی روش پوش‌آور پیشنهادی لنگر خمشی ایجاد شده در ستون گوشه و تیر متصل به این ستون در طبقات مختلف سازه ۹ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی بترتیب در شکل های (۹) و (۱۰) برای ستون و تیر نشان داده شده است. همانند نتایج ارائه شده در بخش های قبل نتایج روش های متفاوت پوش اور و تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی بمنظور مقایسه نتایج ارائه شده است. در شکل های (۹) و (۱۰) روش پوش اور پیشنهادی با علامت (Pro-Method-NTA) نشان داده شده است. روش پوش اور پیشنهادی در بخش مربوط به نتایج دریفت سازه ۹ طبقه معرفی شده است و در این بخش بمنظور جلوگیری از تکرار از توضیح آن صرف نظر شده است. نتایج نشان دادند زمانی که لنگرهای بوجود آمده در ستون ها و تیرها در تغییر مکان هدف متناظر با ۲۵ درصد تغییر مکان هدف براساس روش ضرایب استاندارد ASCE 41-17 [۱] استخراج شوند و با استفاده از قاعده SRSS جمع شوند به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی نزدیک بوده و در تطابق خوبی با آن خواهند بود.

به‌عنوان نتیجه این بخش می‌توان این‌گونه بیان نمود در حالتی که لنگرهای ایجاد شده در المان‌های سازه‌ای در هر دو روش پوش‌آور استفاده شده در روش پوش‌آور پیشنهادی، در تغییر مکانی برابر با ۲۵ درصد تغییر مکان هدف محاسبه شده با استفاده از روش ضرایب استاندارد ASCE 41-17 [۱] قرائت شوند مقادیر آنها با استفاده از قاعده SRSS جمع گردند، این لنگرها با مقادیر لنگرهای ایجاد شده تحت تحلیل های تاریخچه زمانی در مطابقت خواهند بود.

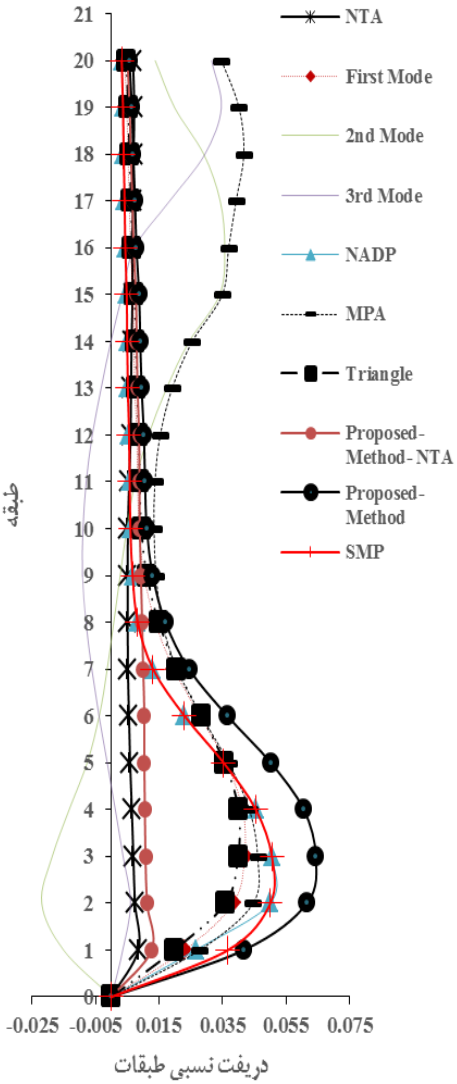


شکل ۹- نمودار توزیع ارتفاعی لنگر خمشی در ستون گوشه سازه ۹ طبقه

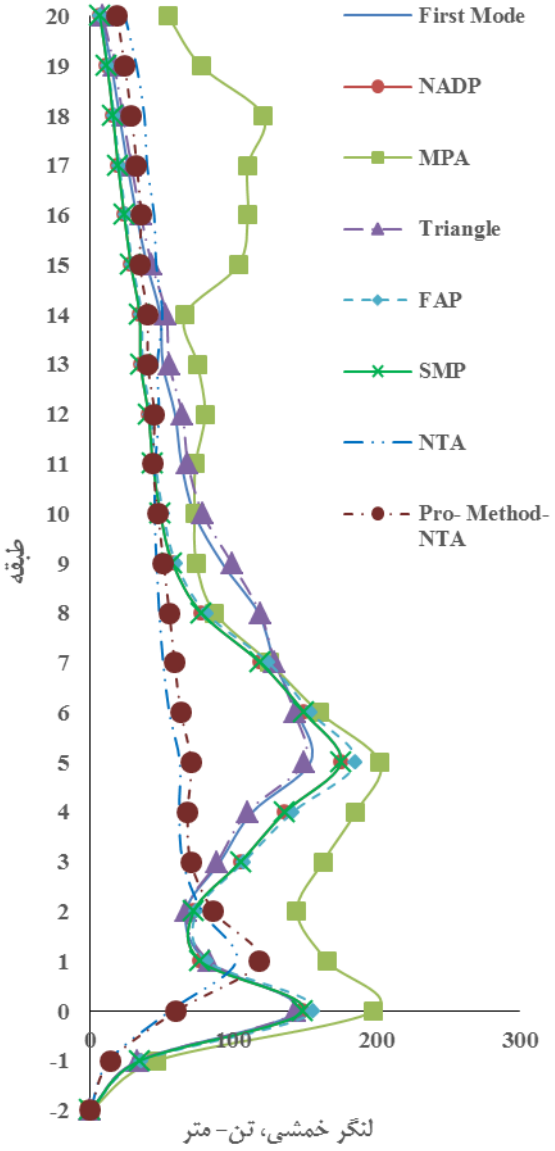


شکل ۱۰- نمودار توزیع ارتفاعی لنگر خمشی تیر کناری در سازه ۹ طبقه

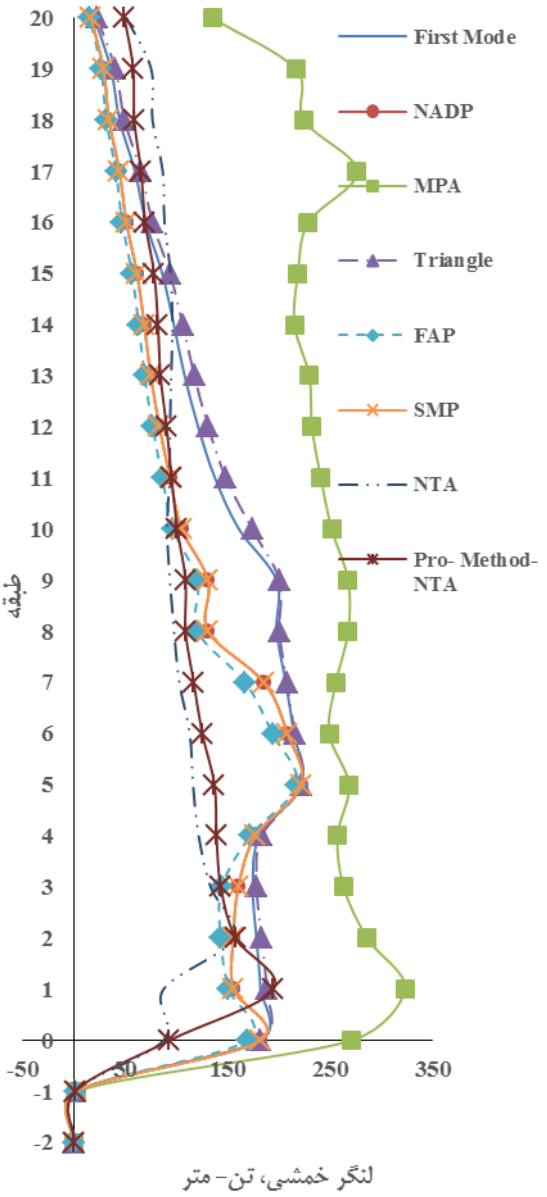
نتایج مربوط به سازه ۲۰ طبقه در ادامه نتایج ارائه شده است. دریفت نسبی طبقات در شکل (۱۱) و لنگر خمشی ایجاد شده در طبقات ستون گوشه و تیر متصل به آن بترتیب در شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. نتایج نشان دادند، اگر از الگوی بارگذاری و روش جمع نتایج مشابه سازه ۹ طبقه برای سازه ۲۰ طبقه نیز استفاده شود نتایج روش پوش اور و پیشنهادی در تطابق خوبی با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی خواهد بود. بنابراین، می توان اینگونه بیان نمود که روش پوش اور و پیشنهادی برای سازه های بلند مرتبه در حدود سازه های مورد تحقیق در این مقاله کاربردی و نتایج قابل قبولی را ارائه خواهد داد. همچنین بعنوان یک نتیجه می توان بیان نمود که: با توجه به نتایج تغییر مکان هدف نشان داده شده در جدول (۱)، مشاهده می گردد که در مودهای بالا تغییر مکان هدف بصورت تقریبی در حدود ۲۵ درصد تغییر مکان هدف محاسبه شده براساس مود اول خواهد بود و همچنین باتوجه به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی تغییر مکان بام حاصل از این نوع تحلیل نیز در حدود ۲۵ درصد تغییر مکان محاسبه شده براساس روش ضرایب استاندارد ASCE 41-17 [۱] بدست آمد. بنابراین، در روش پوش اور پیشنهاد شده فرض در نظر گرفتن تغییر مکان هدف متناظر با تغییر مکان محاسبه شده براساس استاندارد ASCE 41-17 [۱] فرضی درست و قابل قبول بوده است.



شکل ۱۱- نمودار دریفت نسبی طبقات سازه ۲۰ طبقه



شکل ۱۲- نمودار توزیع ارتفاعی لنگر خمشی ستون گوشه در سازه ۲۰ طبقه



شکل ۱۳- نمودار توزیع ارتفاعی لنگر خمشی تیر کناری در سازه ۲۰ طبقه

٦- نتیجه گیری

۱- دریفت های بوجود آمده ناشی از تحلیل های پوش اور متفاوت و مقایسه آنها با دریفت های بوجود آمده ناشی از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی نشان دادند که برای سازه های کوتاه مرتبه در حدود سازه نمونه مورد بررسی در این رساله روش تحلیل پوش اور با الگوی بارگذاری مثلث وارونه به دلیل سادگی و سرعت در اجرا مناسب و کاربردی بوده و نتایج آن به نتایج تحلیل تاریخچه زمانی نزدیک می باشد، به‌طوری‌که خطای متوسط در برآورد حداکثر

دریفت نسبی طبقات در مقایسه با NLTHA، کمتر از ۱۰٪ اندازه‌گیری شد.

۲- لنگرهای خمشی تیرها و ستون ها در طبقات مختلف سازه ۳ طبقه نمونه تحت روش های تحلیل پوش اور و متفاوت و مقایسه نتایج آنها با روش تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی، مشاهده گردید روش پوش اور پیشنهاد شده عملکرد قابل قبول تری را نسبت به سایر روش ها دارد. بنابراین، روش تحلیل پوش اور براساس الگوی بارگذاری مثلث وارونه براس سازه های کوتاه مرتبه در حدود مورد تحقیق در این رساله بعنوان روش پوش اور پیشنهادی معرفی و ارائه گردید.

۳- نتایج نشان دادند برای سازه های میان و بلند مرتبه ترکیب دو روش تحلیل پوش اور می تواند عملکرد خوبی را در پیش بینی و گزارش دریفت ها، لنگرهای خمشی ایجاد شده در المان های سازه ای از خود نشان دهد. بنابراین، برای این گونه سازه ها از دو روش تحلیل پوش اور با الگوی بارگذاری مثلثی وارونه و الگوی بارگذاری حاصل جمع جبری مقادیر شکل تغییر شکل یافته سه مود اول سازه (mode shape) معرفی شده است. ترکیب نتایج دو روش پوش اور اشاره شده برای دریفت ها و لنگرهای خمشی حاصل ترکیب نتایج این دو روش براساس قاعده SRSS مقادیر بدست آمده از هر تحلیل بوده است.

۴- برای سازه های میان و بلند مرتبه مشاهده گردید اگر تغییر مکان هدف برابر ۲۵ درصد تغییر مکان هدف محاسبه شده براساس استاندارد ASCE 41-17 [۱] در نظر گرفته شود، نتایج تحلیل پوش اور پیشنهادی در تطابق بسیار خوبی با نتایج تحلیل تاریخچه زمانی خواهد بود. بنابراین، برای تعیین مقادیر دریفت ها، لنگرهای خمشی در این سازه ها روش پوش اور پیشنهادی براساس قاعده فوق پیشنهاد می شود.

۸- منابع

[1] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Reston, VA: ASCE, 2017.

[2] Chopra A K, Goel R K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2002; 31(3): 561-582. https://doi.org/10.1002/eqe.144

[3] Fajfar P, Gaspersic P. The N2 method for seismic damage analysis of buildings. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 1996; 25(1): 31-46. https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V

[4] Krawinkler H, Seneviratna G D. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. Engineering Structures 1998. 20(4):452-464. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8

[5] Fajfar P. A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design. Earthquake Spectra 2000; 16: 573-592. https://doi.org/10.1193/1.1586128

[6] Ramos D, Perez M. Application of Reliability-Based Structural Optimization: A Case Study in Structural Engineering. Structural Safety 2016; 58: 35–45. https://doi:10.1016/j.strusafe.2015.10.004

[7] Daei A, Poursha M. A multi-mode displacement-based pushover (MDP) procedure to account for higher-mode effects in tall buildings. Engineering Structures 2021 https://doi:10.1016/j.engstruct.2021.112345

[8] Amini M A, Poursha M. Adaptive force-based multimode pushover analysis for seismic evaluation of mid-rise buildings. ASCE Journal of Structural Engineering 2018 https://doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002070

[9] Birzhandi M S. Modified modal pushover design for asymmetric-plan RC structures considering higher-mode effects. Mathematical Problems in Engineering 2023 https://doi:10.1155/2023/5627191

[10] Ohtori Y, Christenson R E, Spencer B F, Dyke S J. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. Journal of Engineering Mechanic 2004; 130(4):366-385. https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339399(2004)130:4(366)

[11] FEMA (2009). Quantification of building seismic performance factors.FEMA P695, Washington, DC.