



Analytical Extension of Higher Modes Participation in The Estimation of Seismic Response of Tall Hybrid Framed Tube Structures comprising Mega Zipper Elements

M. Aboutalebi, A. Meshkat-Dini*, J. Keyvani-Ghamsari

Faculty of Engineering , Kharazmi University , Tehran , Iran

ABSTRACT: This paper presents a computational approach to the analytical performance of the modal pushover method (MPA) in predicting nonlinear response parameters of tall buildings comprising hybrid framed tube with large-scale zipper elements. The accuracy of the results based on MPA is evaluated by comparing the benchmark responses obtained through conducting two sets of nonlinear time history analyses (NLRHA). Also, the effects of higher modes on the structural response parameters are measured by considering three computational vectors of the ordered lateral loading prepared according to the participation of the basic mode, as well as the first 3 and 5 transitional modes, separately. In this study, the determination of the target displacement in MPA was set based on the results of NLRHA under two groups of near and far-field records. The variation range of response parameters of the three high-rise 30-story studied structures was evaluated based on conducting a series of MPA as well as NLRHA analyses. The structural system of the first studied model is a combined framed tube structure. The second and third introduced studied models contain a multi-story arrangement of large-scale zipper elements on the basic skeleton by connecting the aforementioned zipper elements to the columns on the ground floor. The multi-story arrangement of large-scale zipper elements has been aimed at preventing the formation of an intensive expanded plastic mechanism and avoiding the possible buckling mode in the columns of the lower floors. The computational outputs of the MPA are compared with the results of the NLRHA (as exact values) and the standard error percentage is estimated. Evaluation of the results presented in this study demonstrates the relatively desirable computational capability of the MPA method in predicting the behavior characteristics of tall building structures with a symmetric and regular rigid skeleton at plan and height. Moreover, it was observed that the presence of large-scale zipper elements in the resistant system could reduce the seismic response parameters and also relatively increases the overall dynamic stability of the high-rise structural skeleton.

Review History:

Received: May. 10, 2020

Revised: Aug. 10, 2020

Accepted: Aug. 17, 2020

Available Online: Oct. 27, 2020

Keywords:

Nonlinear Analysis

Modal Pushover

Higher Modes

Tall Building

Near and Far-field Records

1. INTRODUCTION

Accurate evaluation of seismic demand parameters is one of the key pillars of the evolution of performance-based design methods. Nonlinear response history analysis (NLRHA) is a robust tool for calculating seismic demands, as well as for identifying plastic hinge mechanisms in structure [1]. However, the convergence trend of this analysis is affected by structural modeling parameters and input earthquake characteristics such as frequency content, intensity, and duration of the strong ground motion [2]. Therefore, it is inevitable to select a comprehensive set of earthquake records to fully describe the dynamic behavior of the site. This method will increase the computational efforts [3]. On the other hand, the pushover analysis, unlike nonlinear dynamic analysis, can provide valuable information about structural weaknesses and possible failure mechanisms in the inelastic range without the need for complex modeling and with less computational effort [4]. The pushover analysis method

is useful in predicting seismic demands and evaluating the behavior of low-rise structures (the first mode is dominant). This has led to the development of analytical aspects of this method [5, 6].

Recently, extensive studies have been carried out on the assumptions and limitations of the pushover analysis method. An example of these studies is the proposed adaptive lateral force distribution that attempts to follow the time-variant distributions of inertia forces which is also considered more than the fundamental vibration mode to add higher mode effects [7]. These efforts have led to the development of nonlinear static analysis methods and computational techniques. Rooted in structural dynamics theory, the modal pushover analysis (MPA) has been developed to include the contributions of all modes of vibration that contribute significantly to seismic demands by Chopra and Goel [8].

This research investigates the analytical capability and effectiveness of the modal pushover method (MPA) in predicting the important responses of high-rise steel buildings

*Corresponding author's email: meshkat@khu.ac.ir



subjected to both far and near-field earthquake records. This was performed based on the comparison of the predicted values by MPA with the corresponding parameters obtained through comprehensive non-linear dynamic time-history analyses (NLRHA).

2. METHODOLOGY

In this research, three 30 story structural models with rigid castled tube resistant skeleton were selected and designed. The first studied model is classified as the basic structure with a castled tube structural system and is identified by the CT symbol. The second and third studied models are introduced by setting two different multi-level configurations of large-scale zipper elements in the structure of the basic model. The large-scale zipper elements are connected to one or two perimeter columns at the first story level and introduced with the symbols MZCT-1C and MZCT-2C, respectively.

The reason for setting a multi-story arrangement of large-scale zipper elements is preventing the formation of expanded plastic mechanism and block the occurrence of possible lateral-torsional buckling in the columns of lower stories. The connection of the large-scale zipper elements to the columns is considered flexurally rigid. The plan and configuration of the studied structures are shown in Figure 1. The studied structures were loaded and designed based on the Iranian national building codes (issues six and ten) as well as the standard 2800 (fourth edition) [9-11]. The assigned performance profiles of plastic hinges for the description of the non-linear behavior of structural elements have been adapted from the report FEMA 356 [12]. All of the nonlinear

analyses were conducted through SAP2000 software [13]. The seismic tremors were selected in an ensemble of twelve earthquake records, including six far-field and six near-field ground motions which contain forward directivity effects. The main criterion in choosing these records is the existence of coherent pulses and high-amplitude spikes in the velocity time history caused by the powerful rupture directivity process [14, 15].

In this research, the response parameters of the studied structures CT and MZCT-1C and 2C (Figure 1) were obtained and assessed analytically through conducting NLRHA analyses. The other phase of this study was accomplished via performing modal pushover analyses subjected to assigned lateral load patterns corresponding to three separate participations of the essential mode (load case 1), the first three lateral modes (load case 2) and the first five lateral modes (load case 3). To investigate the accuracy of the MPA method in estimating seismic demands of the studied structures, the nonlinear dynamic responses were calculated under two sets of near and far-field records. These results were considered as the exact values. Then, MPA analyses were conducted for the studied structures under assigned lateral load patterns explained above. The target displacement value was set equal to the maximum lateral movement of the mass center CM at the top level (i.e., $z=H$) subjected to each record which is calculated through NLRHA analysis. Then, the mean value of the response parameters obtained via MPA was compared with the corresponding ones calculated through NLRHA analyses. The evaluation of the higher modes effects was investigated by assessing the calculated values related to the maximum lateral displacement of CM, the inter-story drift ratio and the maximum rotation of the plastic hinges formed in beam-columns, which all have been obtained via performing MPA and NLRHA analyses.

3. RESULTS AND DISCUSSION

One of the most important response parameters which control and evaluate the seismic behavior of tall buildings is the lateral drift. Figure 2 shows the drift ratios obtained from MPA using the different number of modes in addition to the NLRHA results for all three models subjected to selected near and far-field ground motion records. The computational results are for CT, MZCT-1C and MZCT-2C models, respectively. With the presence of zipper elements in the lower four floors of the structures, the relative lateral displacement ratio (lateral drift) in this section has decreased significantly by an average of 47%. There was also an average drop of 6% in the overall height of the resistant skeleton. The maximum value of the drift also decreased from 0.033 to 0.03, indicating an 8% drop. It is observed that in most cases, the estimated values obtained based on the assigned lateral load patterns are very close to the exact values and also close to each other. Comparison of the results of the three case studies shows that the presence of large-scale zipper configuration may reduce the need to consider the effect of modes above 3 without losing so much accuracy.

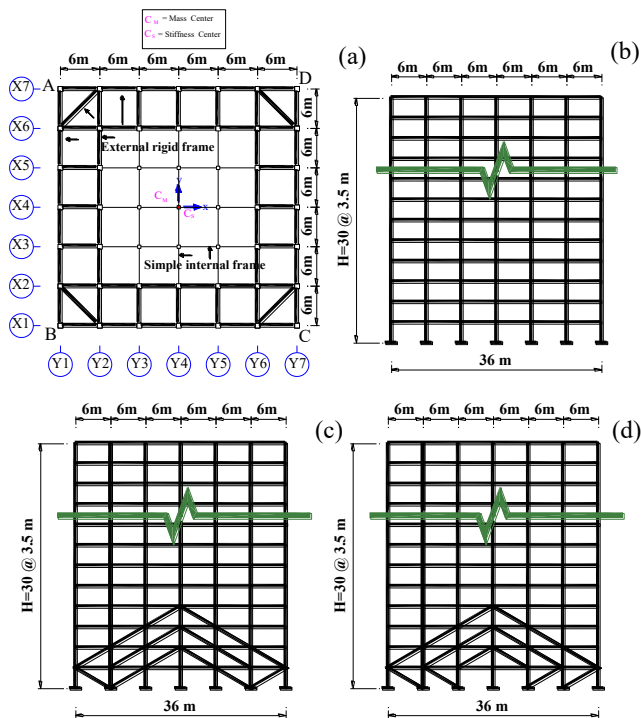


Fig. 1. The structural configuration of the studied models: (a) The plan of the castled tube skeleton; (b) The CT model; (c) The MZCT-1C model; (d) The MZCT-2C model

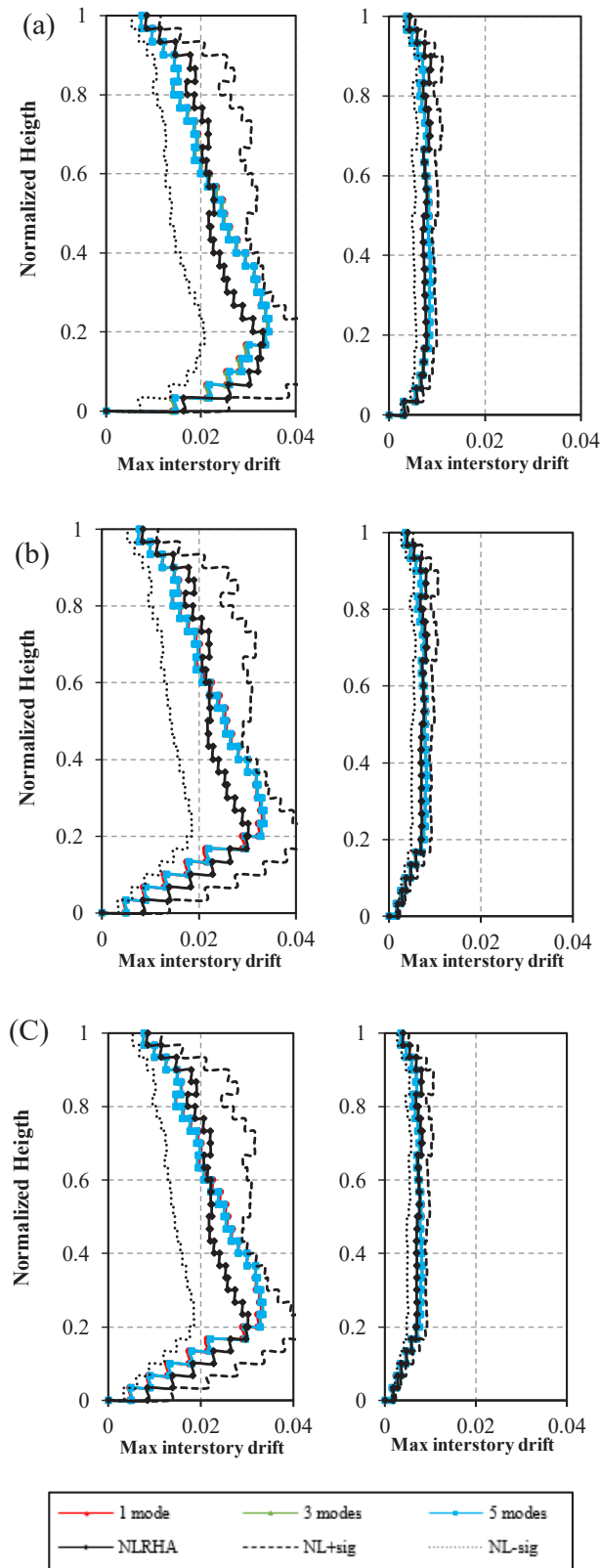


Fig. 2. The mean values of the maximum inter-story drift ratio related to the floor mass center (C_M) in the y-direction of the plan under near and far-field records respectively; (a) The CT model; (b) The MZCT-1C model; (c) The MZCT-2C model, (all of the above left and right diagrams are corresponding to the near and far-field records respectively)

4. CONCLUSIONS

This paper presents a computational approach to the analytical performance of the modal pushover method (MPA) in predicting nonlinear response parameters of tall buildings comprising hybrid framed tube with large-scale zipper elements. The accuracy of the results based on MPA is evaluated by comparing the benchmark responses obtained through conducting two sets of nonlinear time history analyses (NLRHA).

Evaluation of the results demonstrates the relatively desirable computational capability of the MPA method in predicting the behavior characteristics of tall building structures with symmetric and regular rigid skeleton at plan and height. Moreover, it was observed that the presence of large-scale zipper elements in the resistant system could reduce the seismic response parameters and it also relatively increases the overall dynamic stability of the high-rise structural skeleton.

Comparison of the results related to the three studied models shows that the presence of large-scale zipper elements relatively reduces the effects of higher modes in the analytical process of modal pushover procedure. Furthermore, the difference in the geometric arrangement of the mentioned elements would have little effect on the structural response parameters.

REFERENCES

- [1] Kerawinkler, H., 2006. "Importance of good nonlinear analysis", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 15(5), pp. 515-531.
- [2] Tenchini, A., D'Aniello, M., Rebelo, C., Landolfo, R., Dasilva, L.S., Lima, L., 2014. "Seismic performance of dual-steel moment resisting frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 101, pp. 437-454.
- [3] Vafaei, M.H., Saffari, H., 2017. "A modal shear-based pushover procedure for estimating the seismic demands of tall building structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, pp. 95-108.
- [4] Poursha, M., Khoshnoudian, F., Moghadam, A.S., 2008. "Assessment of modal pushover analysis and conventional nonlinear static procedure with load distributions of federal emergency management agency for high-rise buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19, pp. 291-308.
- [5] Vafaei, M.H., Saffari, H., 2016. "Evaluation of the higher modes contribution in the seismic demands of buildings subjected to far-field and near-field ground motions", *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)* 18(5), pp. 719-746.
- [6] Kalkan, E., Kunnath, S.K., 2007. "Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings", *Engineering Structures*, 29(3), pp. 305-316.
- [7] Ferraioli, M., 2017. "Multi-mode pushover procedure for deformation demand estimates of steel moment-resisting frames", *International Journal of Steel Structures*, 17(2), pp. 653-676.
- [8] Chopra, A.K., Goel, R.K., 2004. "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for

- unsymmetric-plan buildings”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(8), pp. 903-927.
- [9] Building and Housing Research Center (BHRC), Iranian National Building Code, Issue 6, Design Loads for Buildings, 2015. (in Persian)
- [10] Building and Housing Research Center (BHRC), Iranian National Building Code, Issue 10, Steel Structures, 2015. (in Persian)
- [11] Standard No. 2800, Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (4th Edition), Tehran, Iran, 2014. (in Persian)
- [12] Federal Energy Management Agency (FEMA), (1998), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: Fema 356: Createspace Independent Publication.
- [13] SAP 2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers and Structures Institute (CSI), Berkeley, California
- [14] Mukhopadhyay, S., Gupta, V.K., 2013. “Directivity pulses in near-fault ground motions - II: Estimation of pulse parameters”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, pp. 38-52.
- [15] Mukhopadhyay, S., Gupta, V.K., 2013. “Directivity pulses in near-fault ground motions - I: Identification, extraction and modeling”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, pp. 1-15.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Aboutalebi, A. Meshkat-Dini, J. Keyvani-Ghamsari, *Analytical Extension of Higher Modes Participation in The Estimation of Seismic Response of Tall Hybrid Framed Tube Structures comprising Mega Zipper Elements*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 997-1000.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18400.6866](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18400.6866)





گسترش تحلیلی مشارکت مودهای بالاتر در تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه قاب محیطی خمشی دارای المان‌های زیپر بزرگ مقیاس

محبوبه ابوطالبی، افشین مشکوه‌الدینی*، جعفر کیوانی قمصری

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

کلمات کلیدی:

تحلیل غیرخطی

آنالیز پوش‌آور مودال

مودهای بالاتر

سازه بلند مرتبه

رکورد حوزه نزدیک

رکورد حوزه دور

خلاصه: این مقاله در برگیرنده یک نگرش محاسباتی بر کارایی تحلیلی روش پوش‌آور مودال در پیش‌بینی پارامترهای پاسخ غیرخطی سازه بلند مرتبه قاب محیطی خمشی فولادی دارای پیکربندی المان‌های زیپر بزرگ مقیاس است. دقت نتایج این روش از طریق مقایسه با پاسخ‌های معیار حاصل از دو مجموعه تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میزان اثرات مودهای بالاتر در پارامترهای پاسخ سازه‌ای نیز با در نظرگیری ساختارهای بارگذاری ترتیب یافته از سه حالت محاسباتی با مشارکت ۱، ۳ و ۵ مود اول انتقالی سنجیده می‌شود. در این پژوهش، معیارسازی تغییر مکان هدف در تحلیل‌های پوش‌آور بر اساس نتایج حاصل از آنالیزهای دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت دو گروه رکورد‌های حوزه نزدیک و حوزه دور صورت گرفته است. دامنه تغییرات پارامترهای پاسخ سه سازه بلند مرتبه قاب محیطی خمشی فولادی ۳۰ طبقه با پیکربندی همسان اسکلت مقاوم، بر اساس انجام یک سری تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی مودال پوش‌آور و نیز دینامیکی تاریخچه زمانی، ارزیابی شده است. مدل ۱ به عنوان ساختار پایه دارای سیستم مقاوم قاب خمشی محیطی با یک پیکربندی دو لایه متشکل از پانل‌های با اتصالات صلب است. مدل‌های ۲ و ۳ با چیدمان‌های چند طبقه ای المان‌های زیپر بزرگ مقیاس بر روی اسکلت مدل پایه، به ترتیب با اتصال (در دو حالت) به یک و نیز دو ستون در طبقه همکف معرفی می‌شوند. چیدمان و آرایش چند طبقه ای المان‌های زیپر بزرگ مقیاس با هدف جلوگیری از تشکیل مکانیزم گسترش یافته پلاستیک و پرهیز از وقوع وضعیت احتمالی کمانش در ستون‌های طبقات تحتانی می‌باشد. آورده‌های محاسباتی حاصل از تحلیل‌های مودال پوش‌آور با نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی به عنوان مقادیر دقیق، مقایسه شده و درصد خطای استاندارد برآورد شده است. ارزیابی نتایج این مطالعه نشان دهنده قابلیت محاسباتی به نسبت مطلوب برای روش پوش‌آور مودال در پیش‌بینی مشخصات رفتار سازه‌های بلند مرتبه، با اسکلت مقاوم متقارن و منظم در پلان و ارتفاع است. ملاحظه شد که تعبیه المان‌های زیپر بزرگ مقیاس در پیکره قاب محیطی خمشی، سبب کاهش نسبی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای غیرخطی و نیز افزایش قابلیت پایداری دینامیکی اسکلت مقاوم سازه بلند مرتبه می‌شود. مقایسه نتایج مربوط به سه مدل مطالعاتی در این تحقیق نشان می‌دهد که حضور المان‌های زیپر بزرگ مقیاس، تأثیرات مودهای بالاتر در محاسبه بارگذاری معیارسازی شده برای تحلیل‌های پوش‌آور مودال را دچار کاهش نسبی نموده و نیز تفاوت در پیکربندی و چیدمان هندسی المان‌های مذکور، تأثیر ناچیزی در پارامترهای پاسخ خواهد داشت.

لرزه‌ای و نیز شناسایی مکانیزم‌های مفاصل پلاستیک شکل گرفته در سازه‌ها است [۱]. با این حال، عواملی چون پارامترهای مدل‌سازی سازه و مشخصه‌های زلزله ورودی از قبیل محتوای فرکانسی، شدت و مدت زمان جنبش نیرومند زمین، روند همگرایی این تحلیل را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲]. بنابراین لازم است مجموعه جامع و گسترده‌ای از رکورد‌های زلزله جهت توصیف کامل رفتار دینامیکی ساختگاه

۱- مقدمه

یکی از ارکان اساسی تکامل روش‌های طراحی مبتنی بر عملکرد، ارزیابی هر چه دقیق‌تر پارامترهای نیاز لرزه‌ای است. تحلیل تاریخچه زمانی پاسخ غیرخطی^۱ ابزاری قوی و روشی دقیق در محاسبه نیازهای

1 Nonlinear Response History Analysis (NLRHA)

* نویسنده‌دار مکاتبات: meshkat@khu.ac.ir



[۱۳-۱۷]. این تلاش‌ها منجر به توسعه روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی و گسترش تکنیک‌های محاسباتی شده است. یکی از این روندها نیز روش تحلیل پوش‌آور مودال^۳ ارائه شده توسط چوپرا و گول است [۱۹ و ۱۸].

مفاهیم بنیادی تحلیل پوش‌آور مودال ریشه در نظریه دینامیک سازه دارد و بر مبنای در نظرگیری آن گروه مودهای ارتعاشی که به طور قابل توجهی در نیازهای لرزه‌ای مشارکت دارند، توسعه داده شده است. ساختار تحلیلی این روش علاوه بر خورداری از سادگی مفهومی، توزیع نیروی جانبی مستقل از زمان را حفظ نموده و اثرات $P-\Delta$ را نیز به صورت موثر وارد می‌نماید. در روش MPA نیاز لرزه‌ای به دلیل مولفه‌های منفرد در بسط مودال نیروی موثر زلزله، بر اساس انجام تحلیل غیرخطی و با استفاده از توزیع نیروی اینرسی برای هر مود تعیین می‌شود. این آرایه‌های نیرویی برای ساختمان‌های متقارن به صورت دو بردار مستقل و با درایه‌های متناظر برابر، به دست می‌آیند. سپس این نیازهای مودال با توجه به چند مود انتخابی، توسط قانون $SRSS^4$ یا CQC^5 ترکیب شده تا برآورد نیاز لرزه‌ای کل برای سیستم غیرالاستیک حاصل گردد. توضیح دیگر آن که ساختار روش MPA هنگامی که به سیستم‌های الاستیک اعمال می‌شود، برابر با تجزیه و تحلیل روش طیف پاسخ استاندارد^۶ است [۱۸].

این پژوهش در برگزیده یک نگرش محاسباتی بر میزان و قابلیت تحلیلی روش پوش‌آور مودال در پیش‌بینی پارامترهای نیاز و پاسخ‌های لرزه‌ای اسکلت‌های مقاوم بلند مرتبه فولادی است. این روند مطالعاتی نیز بر پایه مقایسه با پاسخ‌های معیار حاصل از دو مجموعه جامع از تحلیل NLRHA مورد بررسی قرار گرفته است. تعیین دامنه اثرات مودهای بالاتر در پارامترهای پاسخ غیرخطی نیز با لحاظ نمودن سه حالت محاسباتی ترتیب یافته از مشارکت تحلیلی مود پایه ارتعاش و نیز دو مورد دیگر شامل اثرات ۳ و ۵ مود اول انتقالی، صورت پذیرفته است. در این پژوهش، معیارسازی تغییر مکان هدف در تحلیل‌های پوش‌آور بر اساس نتایج حاصل از آنالیزهای دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت دو مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک^۷ و حوزه دور^۸ انجام شده است. سپس، آورده‌های محاسباتی فوق با

انتخاب شود و این امر باعث ازدیاد تلاش‌های محاسباتی خواهد شد [۳]. همچنین از سوی دیگر، روش تحلیل پوش‌آور بر خلاف تحلیل غیرخطی دینامیکی می‌تواند بدون نیاز به مدل‌سازی پیچیده و با تلاش محاسباتی کمتر، معلومات ارزشمندی را در مورد نقاط ضعف سازه و مکانیزم‌های احتمالی شکست در محدوده غیر الاستیک فراهم کند [۴]. امروزه در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها، الگوهای مختلف بار جانبی مانند آرایش یکنواخت، مثلثی و توزیع بر مبنای مود اول، مورد استفاده قرار می‌گیرند. قابلیت‌های مطلوب روش تحلیل پوش‌آور در برآورد نیازهای لرزه‌ای و ارزیابی رفتار سازه‌های کوتاه مرتبه (با ماهیت حاکم رفتاری بر اساس مود اول ارتعاش)، سبب توسعه و گسترش جنبه‌های تحلیلی آن گردیده است [۶ و ۵].

دقت روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در پیش‌بینی نیاز لرزه‌ای ساختمان‌های بلند مرتبه، موضوعی چالشی و بحث برانگیز است. عواملی همچون الگوی بارگذاری ثابت، عدم در نظرگیری مودهای بالاتر و ناتوانی در پوشش اثرات مربوط به تغییر خواص دینامیکی سازه، از مهم‌ترین کمبودها و کاستی‌های ذاتی روش‌های تحلیل پوش‌آور می‌باشند. نمود و تاثیرگذاری این عوامل در برآورد رفتار غیرخطی ساختمان‌های بلند مرتبه متقارن و نامتقارن، همچنین توصیف ارتباط شکل‌گیری مکانیسم‌های پلاستیک موضعی با روند تغییرات در ویژگی‌های مودال سازه به علت تسلیم المان‌های اصلی، دارای اهمیت دو چندان خواهد بود. اساس این روند بدین قرار است که توزیع نیروی اینرسی به طور مداوم تحت جنبش نیرومند زمین، به دلیل مشارکت مودهای بالاتر، کاهش سختی^۱ و زوال مقاومت^۲، تغییر می‌کند [۷]. همچنین از طرف دیگر، نتایج مطالعات گسترده در این راستا نشان داده که شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در نزدیکی گسل‌های فعال، دارای ویژگی‌هایی خاص و متفاوت از رکوردهای حوزه دور می‌باشند. با توجه به مشخصات این نوع رکوردهای نیرومند، توانایی و کارایی روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی در رابطه با چنین تحریکات لرزه‌ای نیز بایستی مورد بررسی قرار گیرد [۱۲-۸].

مطالعات متعدد و گسترده‌ای بر روی فرضیات و محدودیت‌های روش تحلیل پوش‌آور صورت گرفته است. در همین راستا، پیشنهاد توزیع نیروی جانبی تطبیقی جهت وابسته‌سازی نیروهای اینرسی به زمان و افزودن اثرات مودهای بالاتر، از نمونه‌های این موضوع می‌باشد

3 Modal Pushover Analysis (MPA)

4 Square Root of the Sum of the Squares

5 Complete Quadratic Combination

6 Response Spectrum Analysis (RSA)

7 Near Field Record

8 Far Field Record

1 Stiffness Deterioration

2 Strength Degradation

نکته دیگر آن که نتایج حاصل از تحلیل‌های MPA و NLRHA مقایسه شده و دامنه خطای روش پوش‌آور بررسی شده است. رابطه حاکم بر حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت مولفه افقی جنبش زمین در تحقیق چوپرا و گول به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۸]:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + k u = -m.i.\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

پارامترهای c, m و k به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی، و سختی سازه هستند و i یک بردار واحد است. سمت راست رابطه (۱) نشان دهنده نیروهای مؤثر است و می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$p_{eff}(t) = -m.i.\ddot{u}_g(t) = -s\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

پارامتر s بیان‌گر توزیع نیروی مؤثر ناشی از زمین لرزه، در راستای ارتفاع ساختمان است و به عنوان جمع توزیع نیروی محرک مودال (s_n) به شرح زیر گسترش می‌یابد:

$$s = m.i = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n m \varphi_n \quad (3)$$

پارامتر Γ_n ضریب مشارکت مودی مربوط به مود n ام و φ_n نیز شکل مود متناظر با آن است. ساختار جابجایی سیستم n درجه آزادی می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \varphi_n q_n(t) \quad (4)$$

عبارت $q_n(t)$ پاسخ مربوط به مود n ام و رابطه حاکم بر آن نیز به صورت زیر است:

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

پارامترهای ω_n و ξ_n به ترتیب، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی مود n ام هستند و ضریب مشارکت مودی Γ_n از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma_n = \frac{\varphi_n^T m i}{\varphi_n^T m \varphi_n} \quad (6)$$

نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به عنوان مقادیر دقیق مقایسه شده و درصد خطای استاندارد برای ارزیابی نتایج مورد بحث قرار گرفته است. در این پژوهش، مشخصات پارامترهای پاسخ سه سازه بلند مرتبه قاب محیطی خمشی فولادی ۳۰ طبقه با پیکربندی همسان اسکلت مقاوم، بر اساس انجام یک سری تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی پوش‌آور مودال و دینامیکی تاریخچه زمانی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. سیستم سازه‌ای مدل اول قاب محیطی خمشی پایه در نظر گرفته شده و دو سازه مطالعاتی دیگر نیز دارای پیکربندی‌های چند طبقه‌ای المان‌های زیپر بزرگ مقیاس در اسکلت قاب محیطی خمشی و با دو آرایش متفاوت هستند. تعبیه آرایش چند طبقه‌ای المان‌های زیپر بزرگ مقیاس نیز با هدف جلوگیری از تشکیل مکانیزم گسترش یافته پلاستیک و پرهیز از وقوع وضعیت احتمالی کماتش در ستون‌های طبقات تحتانی می‌باشد.

طراحی سازه‌های مطالعاتی بر اساس ضوابط مقررات ملی ساختمان ایران (ویرایش‌های ششم و دهم) و همچنین ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) انجام شده است [۲۰-۲۲]. توصیف مبانی تحلیلی و مدل‌سازی رفتار غیرخطی اعضا و تعریف مفاصل پلاستیک بر اساس ضوابط FEMA و با استفاده از نرم افزار SAP2000 صورت گرفته است [۲۳-۲۵]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پیاده سازی روش پوش‌آور مودال با ترتیبات ذکر شده فوق، قابلیت و کارایی به نسبت مطلوب در برآورد مشخصات رفتار سازه‌های بلند مرتبه حاوی اسکلت مقاوم متقارن و منظم در پلان و ارتفاع را دارا می‌باشد. همچنین، کاربرد المان‌های زیپر بزرگ مقیاس در پیکره قاب محیطی خمشی، سبب کاهش نسبی پارامترهای پاسخ لرزه‌ای غیرخطی و نیز افزایش قابلیت پایداری دینامیکی سازه بلند مرتبه می‌شود.

۲- تحلیل پاسخ مودال و مفاهیم روش پوش‌آور

در ساختار تحلیلی روش MPA فرض ناهمبسته بودن پاسخ‌های مودی در حالت غیرالاستیک به کار برده می‌شود. پاسخ غیرخطی سازه در هر مود به صورت مستقل، تحت اثر بارگذاری نمودی یک جهته و الگوی پخش متناظر با نیروهای اینرسی در آن مود تا رسیدن به تغییر مکان هدف محاسبه می‌شود. در این خصوص، مشخصات طیفی مودهای ارتعاشی انتقالی سازه‌های مطالعاتی نیز باید محاسبه شوند.

۳- سازه‌های مطالعاتی

سه سازه ۳۰ طبقه فولادی به منظور بررسی رویکردهای تحلیلی کاربرد پوش آور مودال برای سازه‌های بلند مرتبه و تحلیل میزان مشارکت مودهای بالاتر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). این سازه‌ها دارای ۶ دهانه در دو راستای X و Y هستند و نیز طول هر دهانه برابر با ۶ متر و ارتفاع هر طبقه نیز ۳/۵ متر است. مدل ۱ به عنوان مدل پایه دارای سیستم مقاوم قاب خمشی محیطی و متشکل از پیکربندی با اتصالات صلب است و با نماد CT^1 شناخته می‌شود. مدل‌های ۲ و ۳ نیز با چیدمان‌های چند طبقه ای‌المان‌های زیبر بزرگ مقیاس بر روی اسکلت مدل پایه، به ترتیب با اتصال (در دو حالت) به یک و نیز دو ستون در طبقه همکف و با نمادهای $MZCT-1C^2$ و $MZCT-2C^3$ معرفی می‌شوند. هر دو مدل قاب محیطی دارای المان‌های زیبر بزرگ مقیاس، نمایش‌گر سیستم سازه‌ای است که با هدف دستیابی به عملکرد بهبود یافته لرزه‌ای، تضمین‌کننده حفظ پایداری اسکلت مقاوم در حین ارتعاشات شدید ناشی از زلزله‌های نیرومند حوزه نزدیک نیز می‌باشد. ساختار مقاوم $MZCT$ از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول شامل یک سیستم مقاوم جانبی از نوع قاب خمشی محیطی (یا قاب صلب با ساختار لوله‌ای) می‌باشد و بخش دوم نیز دربرگیرنده یک چیدمان اعضای قطری در پانل‌های محیط پلان اسکلت مقاوم است که با نام المان‌های زیبر بزرگ مقیاس معرفی می‌شوند. چیدمان مذکور نیز به صورت تا حد امکان مناسب و کارا، تنها در چند طبقه پایینی اسکلت مقاوم تعبیه شده است. چیدمان المان‌های زیبر بزرگ مقیاس ضمن افزایش نسبی پارامتر سختی سازه، می‌تواند به عنوان مستهلک‌کننده انرژی ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای زلزله‌های بزرگ در اسکلت سازه عمل نماید. این روند نیز به گونه‌ای می‌باشد که از ایجاد احتمالی دامنه‌های بزرگ غیرخطی جلوگیری نموده و پارامترهای پاسخ تغییر مکان و دررفت جانبی، محدود خواهند شد. آرایش چند طبقه‌ای المان‌های زیبر بزرگ مقیاس سبب جلوگیری از تشکیل مکانیزم‌های تشدید شده و گسترش یافته پلاستیک و پرهیز از وقوع وضعیت احتمالی کماتش در ستون‌های طبقات تحتانی می‌شود. اتصال المان‌های زیبر به محل اتصالات تیر به ستون، به صورت صلب خمشی تعریف شده و پلان و

عبارت کامل مربوط به حل ریاضی رابطه (۵) به صورت زیر است:

$$q_n(t) = -\Gamma_n D_n(t) \quad (7)$$

نکته دیگر آن که عبارت $D_n(t)$ توسط رابطه حرکت برای یک سیستم یک درجه آزاد با ویژگی‌های ارتعاش مود n ام از سیستم چند درجه آزادی تحت نیروی $\ddot{u}_g(t)$ تنظیم می‌شود:

$$\ddot{D}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{D}_n + \omega_n^2 D_n = \ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

با جایگزینی رابطه (۷) در رابطه (۴)، تابع جابجایی افقی در تراز کف‌های طبقات به صورت زیر به دست می‌آید:

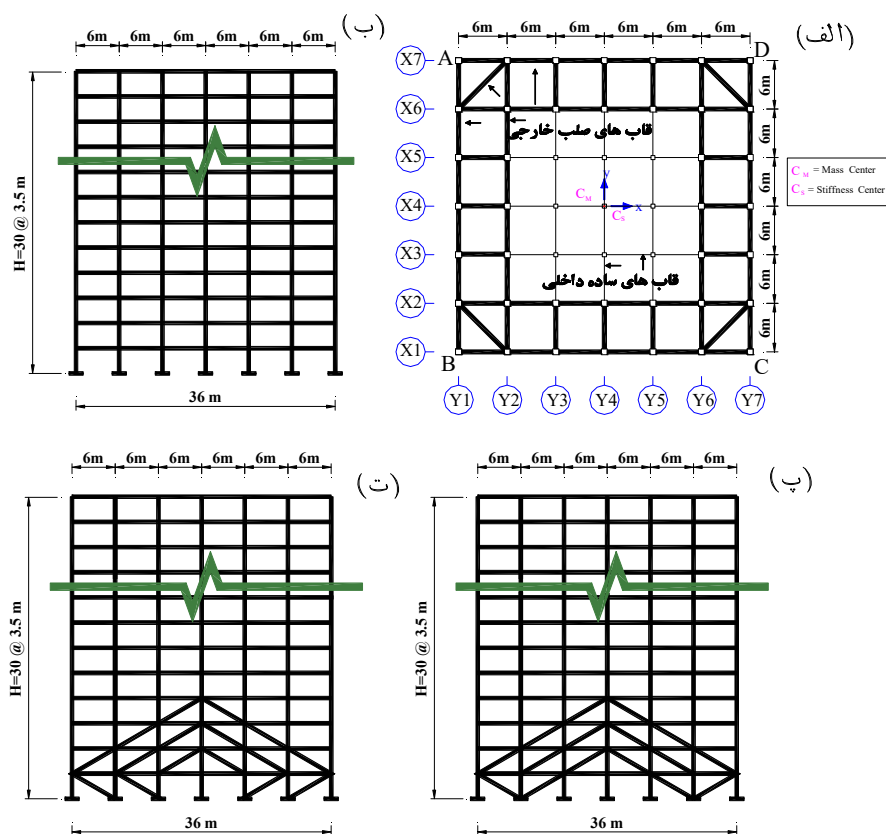
$$u(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \varphi_n D_n(t) \quad (9)$$

بدین ترتیب، روش تحلیل پوش‌آور مودال نیز یک فرایند تحلیلی بر اساس تئوری دینامیک سازه است که سادگی مفهومی و کارایی محاسباتی از ویژگی‌های برجسته آن می‌باشد. در این روش؛ نیاز لرزه‌ای متناظر با هر مود تحت اثر سهم‌های مشخص و ترتیب یافته در بسط و تعمیم‌سازی نیروی موثر ناشی از زمین لرزه (برای هر مود) تعیین می‌شود. نکته تکمیلی نیز آن است که ترکیب این نیازهای مودال با توجه به دو یا سه ترم اول بسط فوق، تخمینی از نیاز لرزه‌ای کل سیستم غیرالاستیک را فراهم می‌نماید [۲۶ و ۲۷]. در همین موضوع، ارزیابی طیف پاسخ استاندارد برای ساختمان‌های چند طبقه الاستیک را می‌توان در قالب یک تحلیل پوش‌آور تعمیم یافته، ساختارسازی نمود. پاسخ حداکثر سازه الاستیک در مود ارتعاشی n ام نیز به طور دقیق با انجام تحلیل پوش‌آور تحت فشار نیروهای جانبی توزیع شده در ارتفاع ساختمان بر اساس $s_n^* = m\varphi_n$ که در آن m ماتریس جرم و φ_n شکل مود n ام است، تعیین می‌شود. بدین ترتیب، سازه تا دامنه جابجایی بیشینه به دست آمده از تغییر شکل حداکثر D_n مود n ام سیستم یک درجه آزادی الاستیک تحت بارگذاری جانبی یک سویه قرار می‌گیرد. پارامتر D_n از طیف پاسخ الاستیک (یا طراحی) به دست می‌آید و ترکیب پاسخ‌های مودال حداکثر (بر پایه یک قانون ترکیبی آماری) منتهی به نتایج اصلی روش پوش‌آور مودال خواهد شد.

1 Castled Tube Structure

2 Mega Zipper Castled Tube (Single Column Connection)

3 Mega Zipper Castled Tube (Dual Column Connection)



شکل ۱. سازه های مطالعاتی: (الف) پلان متقارن سازه، (ب) پیگردنی نمای مدل CT، (پ) پیگردنی نمای مدل MZCT-1C، (ت) پیگردنی نمای مدل MZCT-2C

Figure 1. The studied structures: (a) The symmetric plan of structure; (b) The CT model; (c) The MZCT-1C model; (d) The MZCT-2C model

رفتار سیستم قاب خمشی فولادی با مشخصه ویژه لحاظ شده است. جدول ۱ مشخصات هندسی سازه های مطالعاتی و دوره تناوب طبیعی مربوط به پنج مود اول انتقالی را نشان می دهد. ملاحظه می شود که مدل های MZCT دارای دوره تناوب های یکسان هستند که این مقادیر به طور متوسط ۴ درصد کمتر از مقادیر نظیر برای مدل پایه CT می باشد. دلیل این امر نیز یک افزایش کوچک برای مولفه های عمومی سختی جانبی مربوط به مدل های MZCT با چیدمان المان های زیپر بزرگ مقیاس نسبت به مدل پایه CT است. سازه های مطالعاتی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴) و مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان، با برقراری و تصدیق دو معیار محدودیت جابه جایی نسبی طبقات و اصل ستون قوی - تیر ضعیف طراحی گردیدند. مقاطع طراحی شده برای سازه های مطالعاتی در شکل ۲ و جدول های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. پانل های محیطی اسکلت مقاوم دارای اتصالات خمشی بوده و سایر پانل های داخلی با اتصالات

پیگردنی سازه ها در شکل ۱ مشهود است.

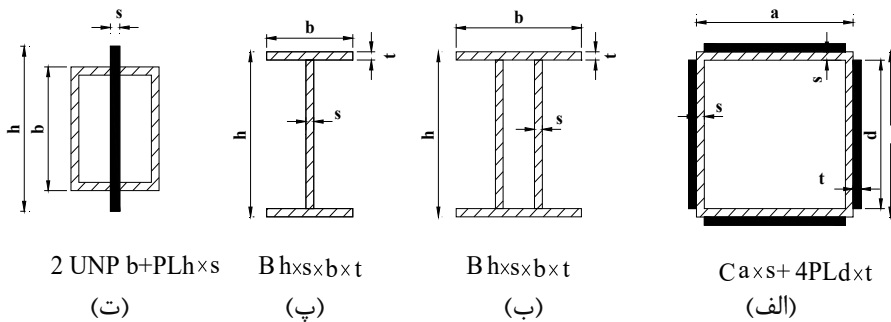
۳-۱- شرایط و ملاحظات طراحی

سازه های مطالعاتی در این تحقیق، بر اساس مدل های سه بعدی و با استفاده از نرم افزار SAP2000 ساختار سازی و طراحی شدند. المان ها از جنس فولاد A36 با مقاومت تسلیم و مدول الاستیک به ترتیب برابر با $235 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ و $196 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ ، همچنین بار مرده در تمامی طبقات سازه برابر با 5 kN/m^2 و بار زنده در طبقه بام برابر با $1/5 \text{ kN/m}^2$ و در سایر طبقات برابر با 2 kN/m^2 بر مبنای مبحث ششم مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته شده است. جرم محاسباتی در هر طبقه از طریق جمع بار مرده به علاوه ۲۰ درصد از بار زنده، تعیین گردید. سازه های مطالعاتی در ساختمان دارای بیشترین خطر لرزه خیزی و خاک نوع II طبق تقسیم بندی استاندارد ۲۸۰۰ و نیز با اهمیت متوسط فرض شدند. ضریب

جدول ۱. مشخصات مودال سازه های مطالعاتی (شکل ۱)

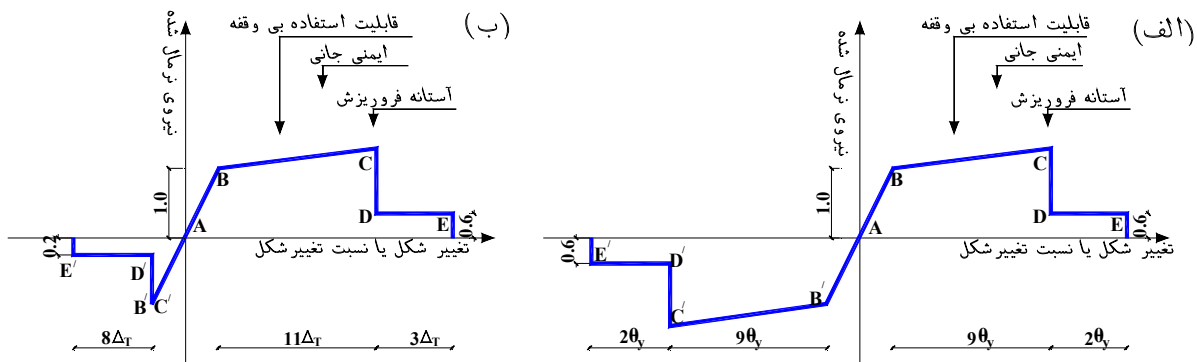
Table 1. Modal characteristics of the studied structures (Figure 1)

دوره تناوب و شماره مود ارتعاشی (sec)					ارتفاع (m)	تعداد طبقه	نام مدل
T5	T4	T3	T2	T1			
انتقالی	انتقالی	انتقالی	انتقالی	انتقالی	۱۰.۵	۳۰	CT
۰/۳۴	۰/۴۵	۰/۶۵	۱/۱۱	۳/۰۳	۱۰.۵	۳۰	MZCT-1C
۰/۳۳	۰/۴۳	۰/۶۲	۱/۰۶	۲/۹۲	۱۰.۵	۳۰	MZCT-2C
۰/۳۳	۰/۴۳	۰/۶۲	۱/۰۶	۲/۹۲	۱۰.۵	۳۰	MZCT-2C



شکل ۲. شکل هندسی مقاطع طراحی شده: (الف) ستون ها؛ (ب) تیرهای با اتصال خمشی؛ (پ) تیرهای با اتصال مفصلی؛ (ت) زیپرها.

Fig. 2. The geometric shape of the member cross section: (a) Columns; (b) Flexural beams; (c) Hinged beams; (d) Zipper elements



شکل ۳. مدل رفتار غیرخطی: (الف) المان های تیر و ستون؛ (ب) زیپر های بزرگ مقیاس [۲۴ و ۲۸]

Fig. 3. The model of nonlinear behavior: (a) Beam and column elements; (b) Large scale zipper elements

جدول ۲. جزئیات مقطع ستون ها (شکل ۲، ابعاد پارامترها میلی متر می باشد)

Table 2. Details of all columns (box section)

نام مقطع	a	s	d	t	نام مقطع	a	s
C1	۷۵۰	۳۰	۶۵۰	۲۵	C6	۵۰۰	۱۵
C2	۷۰۰	۳۰	-	-	C7	۵۵۰	۳۰
C3	۶۵۰	۳۰	-	-	C8	۴۵۰	۲۵
C4	۶۰۰	۳۰	-	-	C9	۴۰۰	۲۵
C5	۵۵۰	۲۵	-	-	C10	۳۵۰	۲۰

جدول ۳. جزییات مقطع تیرها و زیپرها (شکل ۲، ابعاد به میلی‌متر می باشد)

Table 3. Details of all beams and zipper elements

نام مقطع	تعداد جان	h	s	b	t
B1	۲	۵۰۰	۲۰	۵۰۰	۲۵
B2	۲	۵۰۰	۲۰	۴۵۰	۲۵
B3	۲	۵۰۰	۲۰	۴۰۰	۲۵
B4	۲	۳۵۰	۱۵	۴۰۰	۲۰
B5	۱	۳۵۰	۲۰	۱۵۰	۱۰
Z1	-	۳۴۰	۱۵	۳۰۰	-

جدول ۴. مقاطع طراحی شده برای المان های سازه ای (شکل ۱)

Table 4. Sections of all structural members (Figure 1)

مقطع زیپرها	مقطع تیرها		مقطع ستونها		گروه طبقات
	پانل مفصلی داخلی	پانل خمشی محیطی	پانل مفصلی داخلی	پانل خمشی محیطی	
Z1	B5	B1	C7	C1	۵-۱
	B5	B1	C7	C2	۱۰-۶
	B5	B1	C8	C3	۱۵-۱۱
	B5	B2	C9	C4	۲۰-۱۶
	B5	B3	C10	C5	۲۵-۲۱
	B5	B4	C10	C6	۳۰-۲۶

ساده مفصلی طراحی شده‌اند.

یکسان باشد. قابلیت رفتار غیرخطی المان های زیپر بزرگ مقیاس نیز بر اساس تعریف مفصل نامتقارن P با تطبیق سازی مشخصات عملکرد محوری تعریف شده است. دو ساختار متفاوت اندرکنشی P منطبق با رفتار در مود کمانش و نیز PMM (مشابه رفتار غیرخطی المان تیر خمشی) برای ستون های سازه تعریف گردیده است. مشخصات متفاوت عملکردی در دو حوزه کشش و فشار نیز لحاظ شده است. اضافه می شود که رفتار همگی المان های تیر و ستون مربوط به قاب های داخلی دارای اتصالات مفصل خمشی نیز برای هر چهار مدل مطالعاتی در حوزه خطی فرض می شود [۲۸ و ۲۴].

تعریف معیارهای مهم و تاثیرگذار در بررسی رفتار غیرخطی المان های یک سازه، دارای ارتباط مستقیم با چگونگی مشخصات تحلیلی در بخش های با احتمال بیشتر تشکیل حوزه های غیرخطی دارد. این حوزه های غیرخطی در بخش هایی از المان های سازه که احتمال تجاوز و بیشتر شدن دامنه عددی کرنش های محاسباتی از کرنش های تسلیم وجود دارد، تعریف می شوند. همچنین در این خصوص نیز راهکار مناسب و موثر آن است که پیاده سازی ویژگی های رفتار غیرخطی، تنها در بخش ها و موقعیت های احتمالی دارای تمرکز شدید تنش در نظر گرفته شود. مطابق با شکل (۳) پارامترهای تحلیلی مربوط به مفاصل پلاستیک احتمالی در اعضای سازه، بر اساس ضوابط مربوطه در FEMA 356 و ASCE / SEI 41-13 لحاظ شده است. مفصل پلاستیک با رفتار خمشی M برای تیرهای اصلی به گونه ای لحاظ شده که عملکرد لرزه ای در دو حوزه کشش و فشار به صورت

۲-۳- مجموعه انتخاب شده جنبش های نیرومند زمین

کاربرد جنبش های نیرومند زمین با ویژگی های فیزیکی و طیفی متنوع، سبب حصول گستره ای بزرگ برای دامنه تغییرات پاسخ لرزه ای سازه ها خواهد شد. مطالعات این تحقیق با در نظر گرفتن و انتخاب

جدول ۵. مشخصات فیزیکی دو مجموعه رکوردهای انتخابی [۳۰]

Table 5. Physical properties of the selected earthquake records

شماره	نام زلزله	سال وقوع	بزرگا MW	PGA (g)			PGV(cm/s)			فاصله تا گسل (km)
				UP	TR	LN	UP	TR	LN	
جنبش‌های حوزه نزدیک دارای اثر جهت‌داری پیش‌رونده										
۱	لوما پریتا (LGP)	۱۹۸۹	۶/۹	۰/۵۶	۰/۸۹	۰/۶۱	۵۱/۲	۹۳/۸	۵۴/۹	۶/۱
۲	نورتریج (JFP)	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۵۹	۹۹/۳	۱۰۶/۲	۳۴/۱	۶/۲
۳	نورتریج (SCE)	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۴۹	۰/۳۸	۰/۸۳	۷۵/۴	۱۱۸/۱	۲۴/۳	۶/۱
۴	نورتریج (SYL)	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۸۴	۰/۵۴	۰/۶۰	۷۸/۲	۱۲۹/۶	۱۸/۹	۶/۴
۵	بم (BAM)	۲۰۰۳	۶/۶	۰/۶۳	۰/۷۹	۰/۶۳	۵۹/۶	۱۲۳/۷	۳۷/۶	۱/۰
۶	طیس (TAB)	۱۹۷۸	۷/۴	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۸۳	۹۷/۷	۱۲۱/۳	۴۳/۰	۳/۰
جنبش‌های حوزه دور										
۱	کرن کانتی (TAFT)	۱۹۵۲	۷/۴	۰/۱۵۶	۰/۱۷۸	۰/۱۰۹	۱۵/۳	۱۷/۵	۶/۶	۴۱/۰
۲	نورتریج (MRP)	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۱۹۲	۰/۲۹۲	۰/۱۵۹	۲۰/۲	۲۰/۷	۷/۹	۲۸/۰
۳	نورتریج (ARC)	۱۹۹۴	۶/۷	۰/۱۰۴	۰/۰۸۳	۰/۰۹۲	۷/۳	۱۰/۲	۴/۰	۴۲/۵
۴	امپریال ولی (ELC)	۱۹۴۰	۷/۰	۰/۳۱۳	۰/۲۱۵	۰/۲۰۵	۲۹/۸	۳۰/۱	۱۰/۷	۸/۳
۵	لوما پریتا (PAE)	۱۹۸۹	۶/۹	۰/۲۰۴	۰/۲۱۳	۰/۰۸	۲۲/۰	۳۹/۶	۷/۳	۲۶/۱
۶	کیپ مندوسینو (EUR)	۱۹۹۲	۷/۱	۰/۱۵۴	۰/۱۷۸	۰/۰۴۲	۲۰/۲	۲۸/۳	۷/۵	۴۴/۶

جدول ۶. ضرایب مقیاس رکوردهای انتخابی برای مدل‌های مطالعاتی

Table 6. The scale factors of the selected earthquake records

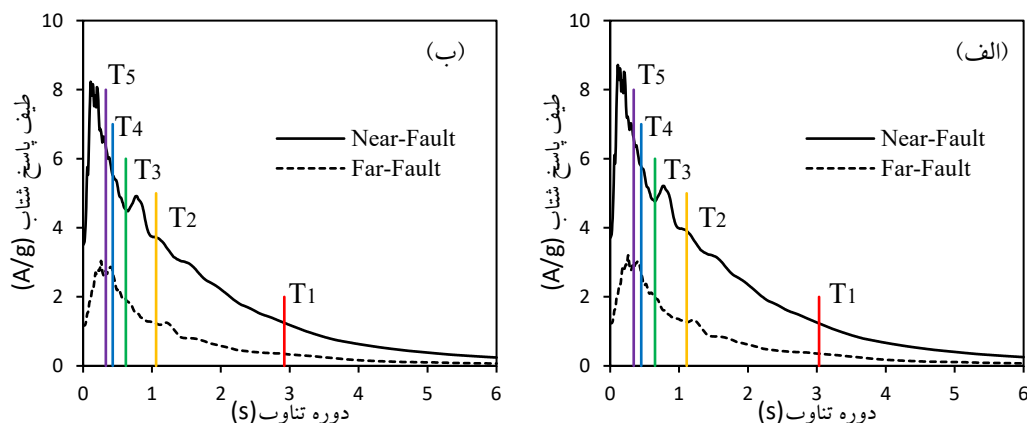
نام مدل	مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک						مجموعه رکوردهای حوزه دور					
	LGP	JFP	SCE	BAM	TAB	TAFT	EUR	PAE	ELC	ARC	MRP	
CT	۱/۸۹	۱/۶۳	۳/۷۴	۴/۳۸	۴/۹۸	۱/۶۰	۲/۵۳	۱/۵۹	۳/۵۹	۷/۲۸	۶/۳۷	
MZCT-1C	۱/۷۲	۱/۴۸	۳/۵۸	۴/۱۶	۴/۶۷	۱/۶۰	۲/۳۷	۱/۳۹	۳/۳۴	۶/۹۷	۶/۲۹	
MZCT-2C	۱/۷۲	۱/۴۸	۳/۵۸	۴/۱۶	۴/۶۷	۱/۶۰	۲/۳۷	۱/۳۹	۳/۳۴	۶/۹۷	۶/۲۹	

گسترش مکانیزم‌های پلاستیک در اسکلت مقاوم، ارتباط مستقیم با فرایند مقیاس‌سازی رکوردهای زلزله دارد. رکوردهای انتخابی بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ مقیاس‌سازی شدند. بدیهی است که اعمال ضرایب مقیاس سبب افزایش دامنه و بزرگ شدن پیکره پالس‌های شتاب و سرعت موجود در تاریخچه زمانی رکوردها و منتهی به نیرومندتر شدن آن‌ها می‌شود [۳۱-۳۳].

ضرایب مقیاس به دست آمده در جدول ۶ نشان داده شده است. به دلیل وابستگی ضرایب مقیاس محاسباتی به دوره تناوب سازه، ضرایب مقیاس به دست آمده برای مدل CT با مدل‌های MZCT متفاوت هستند. مشاهده می‌شود که ضرایب مقیاس به دست آمده برای مدل‌های MZCT با یکدیگر برابر بوده و در تمامی موارد کمتر

۱۲ جنبش ثبت شده، شامل شش رکورد حوزه دور و نیز شش رکورد حوزه نزدیک دارای اثرات جهت‌داری پیش‌رونده^۱ انجام شده است. مشخصات فیزیکی رکوردهای انتخابی در جدول ۵ مشهود است و جنبش‌های حوزه نزدیک انتخاب شده، همگی مربوط به ایستگاه‌های لرزه‌نگاری هستند که حداکثر ۷ کیلومتر از گسل فاصله دارند. معیار اصلی در انتخاب این رکوردها وجود پالس‌های پیوسته به علت اثرات شدید جهت‌داری پیش‌رونده در تاریخچه زمانی سرعت زمین، مقادیر بزرگ مولفه‌های طیفی و انطباق نوع خاک حوزه وقوع زلزله با ساختگاه سازه‌های مطالعاتی است [۳۰ و ۲۹]. موضوعات مرتبط با جنبه‌های عملکرد غیرخطی سازه‌های مطالعاتی و بررسی چگونگی تشکیل و

1 Forward Directivity Effects



شکل ۴. طیف پاسخ شتاب میانگین مجموعه رکوردهای مقیاس شده؛ (الف) مدل CT، (ب) مدل های MZCT؛ (شکل ۱ و جدول ۱)

Fig. 4. Pseudo-acceleration response spectra related to the scaled records corresponding to the studied structures: (a) The CT model; (b) The MZCT models

جدول ۷. مقدار جابجایی هدف متناظر با رکوردهای انتخابی (بر حسب متر)

Table 7. Target displacement values corresponding to the selected earthquake records

رکوردهای حوزه دور						رکوردهای حوزه نزدیک						مولفه	نام مدل
EUR	PAE	ELC	ARC	MRP	TAFT	TAB	BAM	SYL	SCE	JFP	LGP		
۰/۲۷	۰/۸۷	۱/۱۹	۰/۵۰	۰/۸۲	۰/۳۵	۱/۱۲	۲/۰۲	۲/۰۶	۱/۷۶	۱/۲۷	۰/۷۴	U1	CT
۰/۸۷	۰/۹۸	۱/۰۴	۰/۴۸	۰/۶۶	۰/۵۲	۱/۲۱	۳/۹۶	۲/۸۳	۲/۵۴	۱/۴۲	۲/۲۰	U2	
۰/۲۷	۰/۷۳	۱/۰۶	۰/۴۶	۰/۷۶	۰/۳۱	۱/۰۸	۱/۸۸	۱/۹۸	۱/۷۹	۱/۲۱	۰/۶۸	U1	MZCT-1C MZCT-2C
۰/۸۰	۰/۸۷	۰/۹۵	۰/۴۲	۰/۶۶	۰/۴۴	۱/۲۰	۳/۷۹	۲/۶۳	۲/۳۶	۱/۲۷	۱/۹۳	U2	

صفحه شکست گسل (مولفه TR) جهت محور Y و مولفه قائم (مولفه UP) نیز در جهت محور Z اعمال شدند.

۳-۳- روش تحلیل غیرخطی و مفهوم سازی پارامتری

گروه تحلیل های تاریخچه زمانی غیرخطی (NLRHA) تحت مجموعه جنبش های حوزه نزدیک و حوزه دور مقیاس شده بر روی سه سازه بلند مرتبه مطالعاتی (شکل ۱) انجام گردید. پارامترهای پاسخ حاصل از این تحلیل ها به عنوان مقدار دقیق و معیار سنجش های محاسباتی در نظر گرفته شد. تحلیل های پوش آور (MPA) تحت بارگذاری معیار سازی شده برای هر رکورد، در سه حالت مشارکت یک، سه و پنج مود اول انتقالی به انجام رسید. نکته دیگر آن که در روش MPA مقدار جابجایی حداکثر مرکز جرم تراز بام ($z=H$) برآورده شده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت هر رکورد، به عنوان جابجایی هدف در تراز مذکور انتخاب شد. مقدار به دست آمده برای جابجایی هدف برای تمامی رکوردها در جدول ۷ داده شده

از مقادیر نظیر محاسبه شده برای مدل CT می باشد. دامنه کاهش مقادیر ضریب مقیاس مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک از ۰ تا ۱۰ درصد، به ترتیب برای شتاب نگاشت های TAB و JFP است. مقادیر متناظر مربوط به رکوردهای حوزه دور نیز از ۱ تا ۱۲ درصد می باشد و به ترتیب برای MRP و PAE می باشد. شکل ۴ طیف های شتاب میانگین رکوردهای مقیاس شده برای نسبت میرایی ۰/۵ و مربوط به مدل های مطالعاتی را نشان می دهد. خطوط عمودی در این شکل ها نشان دهنده پنج دوره تناوب اول متناظر با مودهای انتقالی سازه های مطالعاتی است. مطابق با شکل ۴ مقادیر به دست آمده برای مدل های MZCT تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک و دور، به طور متوسط به ترتیب ۵/۵ و ۶/۵ درصد کمتر از مقادیر نظیر برای مدل CT است. رکوردهای انتخابی در حالت مقیاس شده و سه مولفه ای در جهات X، Y و Z سازه های مطالعاتی به صورت همزمان اعمال شدند. مولفه مفروض موازی با راستای عمومی صفحه شکست گسل (مولفه LN) در جهت X محور پلان سازه، مولفه مفروض عمود بر راستای عمومی

صورت گرفته است. همچنین از آنجا که نتایج و برآوردهای تاریخچه زمانی بر اساس مجموعه‌های ۶ تایی از رکوردهای زلزله (جدول ۵) ساختارسازی شده است، هر دو مقدار میانگین و پراکندگی (انحراف معیار) برای مقدار متوسط آماری نیز در نمودارهای مربوطه ارائه شده است.

۴-۱- نمودار پوش بیشینه جابجایی جانبی مرکز جرم تراز طبقات یکی از مهم‌ترین شاخص‌های لرزه‌ای، جابجایی جانبی تراز طبقه در محل مرکز جرم C_M است، (شکل ۱). شکل‌های ۵ تا ۷ نشان دهنده میانگین و انحراف استاندارد پروفیل حداکثر جابجایی برآورد شده در راستای y از روش NLRHA و مقادیر پیش بینی شده از روش MPA می‌باشند که با مشارکت ۱، ۳ و ۵ مود اول انتقالی ترسیم و مرتب شده‌اند. تنظیمات نمودارها بر اساس نوع رکورد و همچنین درصد خطای محاسباتی در برآورد مقادیر مذکور به ترتیب برای مدل‌های CT، MZCT-1C و MZCT-2C می‌باشد. مشاهده می‌شود که مقادیر تخمین زده شده از سه حالت روش MPA در بیشتر موارد و به ویژه در طبقات بالایی سازه (از نسبت ارتفاع ۰/۲ تا ۱) به صورت کمی محافظه‌کارانه و بسیار نزدیک به مقادیر دقیق هستند. همچنین در صورت انتخاب مناسب جابجایی

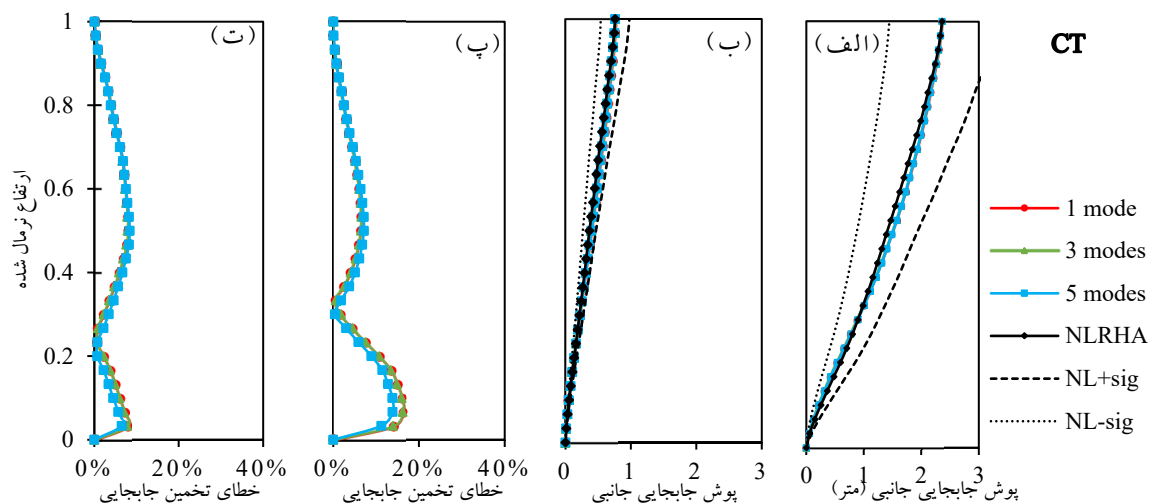
است. سپس میانگین مقدار پاسخ ناشی از تحلیل‌های MPA تحت بارگذاری جانبی معیارسازی شده (رابطه ۳) با مقدار میانگین پاسخ ناشی از NLRHA به عنوان مقادیر دقیق، مقایسه شد. استفاده از خطای نسبی می‌تواند تصویر خوبی از کاستی‌های روش تقریبی ارائه دهد [۳۴-۳۶]، بدین لحاظ خطای محاسباتی در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای از رابطه (۱۰) محاسبه شد.

$$E_r = |(a - a^*) / a| \quad (10)$$

پارامتر E_r خطای نسبی، a پارامتر پاسخ با مقدار دقیق (به دست آمده از تحلیل NLRHA) و a^* پارامتر پاسخ حاصل از روش تقریبی (روش MPA) می‌باشد.

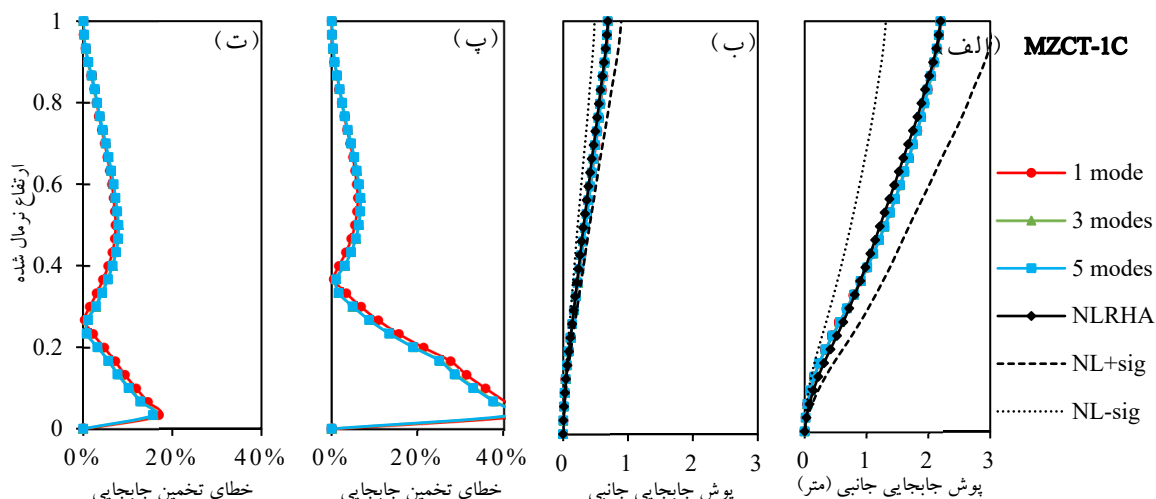
۴- ارزیابی نتایج محاسباتی

ارزیابی و بررسی میزان مشارکت مودهای بالاتر در روش پوش‌آور مودال با مقایسه مقادیر محاسبه شده برای بیشینه تغییر مکان جانبی طبقات سازه در محل مرکز جرم C_M (معیار ۱)، نسبت دریافت طبقه ای (معیار ۲) و حداکثر چرخش پلاستیک ستون‌ها و تیرها (معیار ۳) حاصل از نتایج دو گروه تحلیل‌های MPA و NLRHA



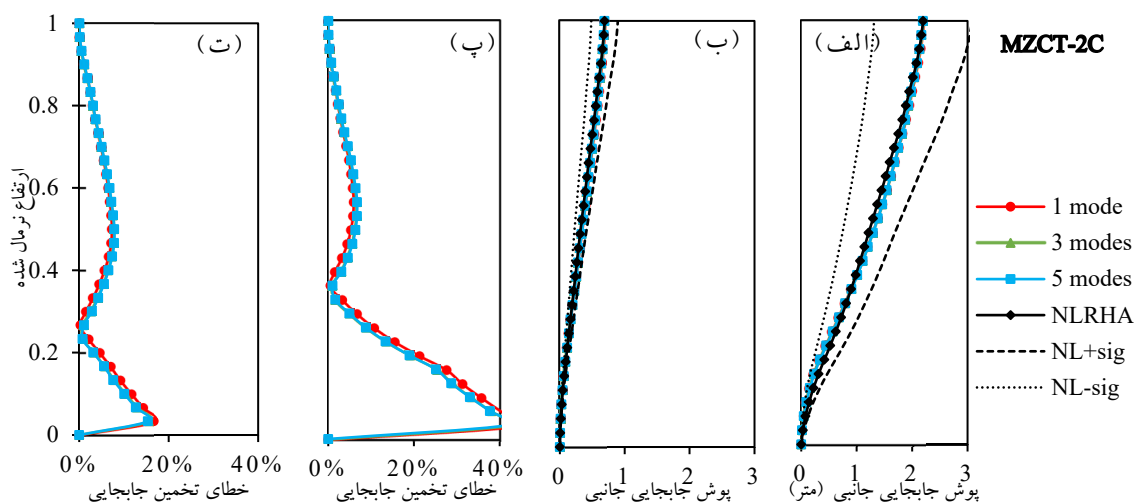
شکل ۵. متوسط پوش بیشینه، تغییرات میانگین و انحراف استاندارد مربوط به تغییر مکان جانبی مرکز جرم C_M طبقات مدل CT در راستای y (مولفه TR) تحت: (الف) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ب) مجموعه رکوردهای حوزه دور؛ درصد خطای نسبی تخمین پارامتر مذکور تحت: (پ) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ت) مجموعه رکوردهای حوزه دور

Fig. 5. The mean values of the maximum lateral displacement related to the floor mass center (CM) of the CT model in y direction of the plan (Fig. 1): (a) the near-field records, (b) the far-field records; and the relative error due to the estimation of the response parameter; (c) the near-field records, (d) the far-field records



شکل ۶. متوسط پوش بیشینه، تغییرات میانگین و انحراف استاندارد مربوط به تغییر مکان جانبی مرکز جرم C_M طبقات مدل MZCT-1C در راستای y (مولفه TR) تحت: (الف) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ب) مجموعه رکوردهای حوزه دور؛ درصد خطای نسبی تخمین پارامتر مذکور تحت: (پ) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ت) مجموعه رکوردهای حوزه دور

Fig. 6. The mean values of the maximum lateral displacement related to the floor mass center (CM) of the MZCT-1C model in y direction of the plan (Fig. 1): (a) the near-field records, (b) the far-field records; and the relative error due to the estimation of the response parameter; (c) the near-field records, (d) the far-field records



شکل ۷. متوسط پوش بیشینه، تغییرات میانگین و انحراف استاندارد مربوط به تغییر مکان جانبی مرکز جرم C_M طبقات مدل MZCT-2C در راستای y (مولفه TR) تحت: (الف) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ب) مجموعه رکوردهای حوزه دور؛ درصد خطای نسبی تخمین پارامتر مذکور تحت: (پ) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ت) مجموعه رکوردهای حوزه دور

Fig. 7. The mean values of the maximum lateral displacement related to the floor mass center (CM) of the MZCT-2C model in y direction of the plan (Fig. 1): (a) the near-field records, (b) the far-field records; and the relative error due to the estimation of the response parameter; (c) the near-field records, (d) the far-field records

بارگذاری‌های معیارسازی شده رکوردهای زلزله در جدول ۸ نشان داده شده است. مقایسه نتایج مربوط به سه مدل مطالعاتی نشان می‌دهد که حضور پیکربندی المان‌های زیبر بزرگ مقیاس می‌تواند نیاز به در نظرگیری اثر مودهای بالاتر از ۳ را به خصوص در حالت

هدف، این روش می‌تواند تحت بارگذاری‌های معیارسازی شده برای رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور، رفتار سازه را به صورت موثر برآورد نماید. متوسط درصد خطای تخمین سه حالت تحلیل MPA و انحراف استاندارد خطاها برای هر سه سازه مطالعاتی تحت

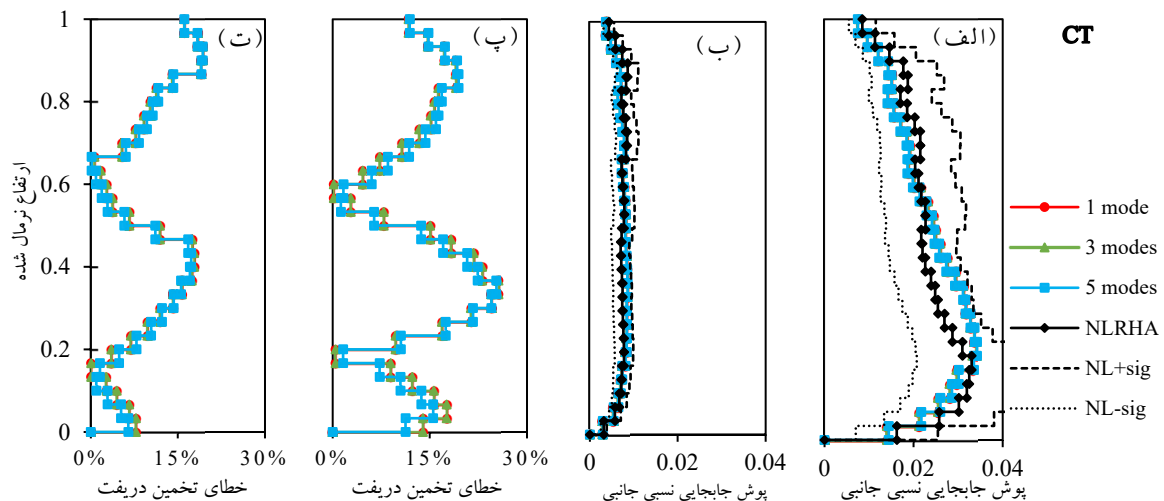
اعمال رکوردهای حوزه نزدیک کاهش داده و همچنین باعث کاهش پراکندگی مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقدار میانگین شود. همچنین تفاوت در آرایش المان‌های زیپر تاثیر چشمگیری بر نتایج ندارد. با مقایسه منحنی‌ها مشخص است با تعبیه المان‌های زیپر در چهار طبقه پایینی سازه، مقدار تغییر مکان جانبی در تراز $Z=H$ حدود ۷ درصد و به طور متوسط برای تمامی طبقات نیز ۱۷ درصد کاهش دارد.

۴-۲- نمودار پوش بیشینه جابجایی نسبی جانبی مرکز جرم طبقات شکل‌های ۸ تا ۱۰ نمایش‌گر میانگین و انحراف استاندارد مربوط به پروفیل حداکثر جابجایی نسبی جانبی (دریافت) برآورد شده در راستای Y پلان از روش NLRHA و مقادیر تخمینی حاصل از روش MPA با سه حالت مبنای تحلیلی است. دریافت برابر با تغییر مکان نسبی میان دو تراز کف متوالی سازه است که به ازای ارتفاع طبقه افزای می‌شود. این پارامتر به دلیل ارتباط با نیاز شکل‌پذیری در هر طبقه

جدول ۸. متوسط خطای تخمین جابجایی جانبی (تغییر مکان سازه) از روش MPA با مشارکت مدهای مختلف و انحراف استاندارد آن

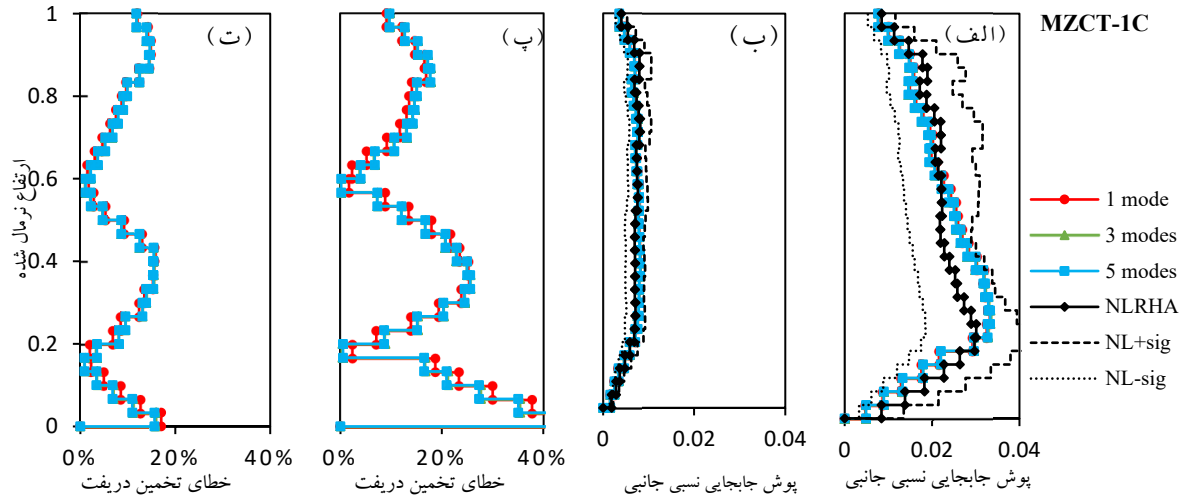
Table 8. Average error (%) and standard deviation in predicting the lateral displacement for all the studied structures through conducting MPA with the participation of different numbers of modes

مدل MZCT-2C			مدل MZCT-1C			مدل CT			
مُد ۵	مُد ۳	مُد ۱	مُد ۵	مُد ۳	مُد ۱	مُد ۵	مُد ۳	مُد ۱	
رکوردهای حوزه نزدیک									
۹/۱۷	۹/۲۴	۹/۶۲	۹/۱۷	۹/۲۴	۹/۶۲	۵/۲۳	۵/۵۴	۵/۵۴	متوسط درصد خطای تخمین
۲/۱۱	۲/۱۳	۲/۳۰	۲/۱۱	۲/۱۳	۲/۳۰	۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۸۸	انحراف استاندارد
رکوردهای حوزه دور									
۴/۹۹	۴/۹۹	۵/۰۰	۵/۰۱	۵/۰۲	۵/۰۴	۴/۳۷	۴/۳۷	۴/۳۸	متوسط درصد خطای تخمین
۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۴۹	انحراف استاندارد



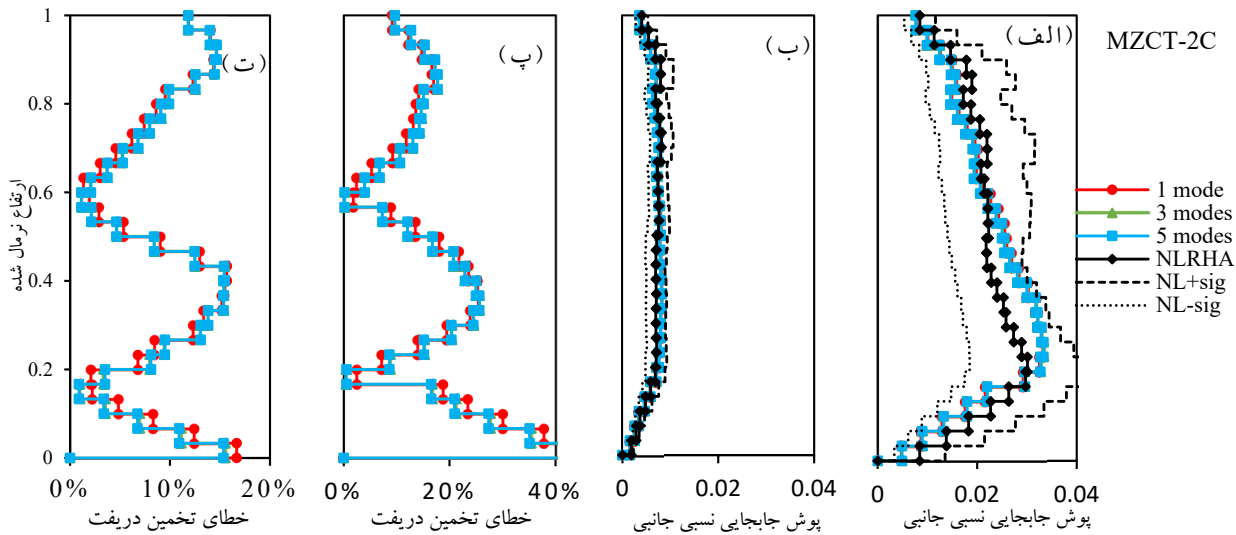
شکل ۸. متوسط پوش بیشینه، تغییرات میانگین و انحراف استاندارد مربوط به تغییر مکان نسبی جانبی (دریافت) در مرکز جرم C_M طبقات مدل CT در راستای Y (مولفه TR) تحت: (الف) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ب) مجموعه رکوردهای حوزه دور؛ درصد خطای نسبی تخمین پارامتر مذکور تحت: (پ) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ت) مجموعه رکوردهای حوزه دور

Fig. 8. The mean values of the maximum inter-story drift ratio related to the floor mass center (CM) of the CT model in y direction of the plan (Fig. 1): (a) the near-field records, (b) the far-field records; and the relative error due to the estimation of the response parameter; (c) the near-field records, (d) the far-field records.



شکل ۹. متوسط پوش بیشینه، تغییرات میانگین و انحراف استاندارد مربوط به تغییر مکان نسبی جانبی (دررفت) در مرکز جرم C_M طبقات مدل MZCT-1C در راستای y (مولفه TR) تحت: (الف) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ب) مجموعه رکوردهای حوزه دور؛ درصد خطای نسبی تخمین پارامتر مذکور تحت: (پ) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ت) مجموعه رکوردهای حوزه دور

Fig. 9. The mean values of the maximum inter-story drift ratio related to the floor mass center (CM) of the MZCT-1C model in y direction of the plan (Fig. 1) : (a) the near-field records, (b) the far-field records; and the relative error due to the estimation of the response parameter; (c) the near-field records, (d) the far-field records



شکل ۱۰. متوسط پوش بیشینه، تغییرات میانگین و انحراف استاندارد مربوط به تغییر مکان نسبی جانبی (دررفت) در مرکز جرم C_M طبقات مدل MZCT-2C در راستای y (مولفه TR) تحت: (الف) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ب) مجموعه رکوردهای حوزه دور؛ درصد خطای نسبی تخمین پارامتر مذکور تحت: (پ) مجموعه رکوردهای حوزه نزدیک، (ت) مجموعه رکوردهای حوزه دور

Fig. 10. The mean values of the maximum inter-story drift ratio related to the floor mass center (CM) of the MZCT-2C model in y direction of the plan (Fig. 1); (a) the near field records, (b) the far field records, and the relative error due to the estimation of the response parameter; (c) the near field records, (d) the far field records

جدول ۹. متوسط خطای تخمین جابجایی نسبی جانبی (دریافت سازه) از روش MPA با مشارکت مدهای مختلف و انحراف استاندارد آن

Table 9. Average error (%) and standard deviation in predicting the story drift ratios for all the studied structures through conducting MPA with the participation of different numbers of modes

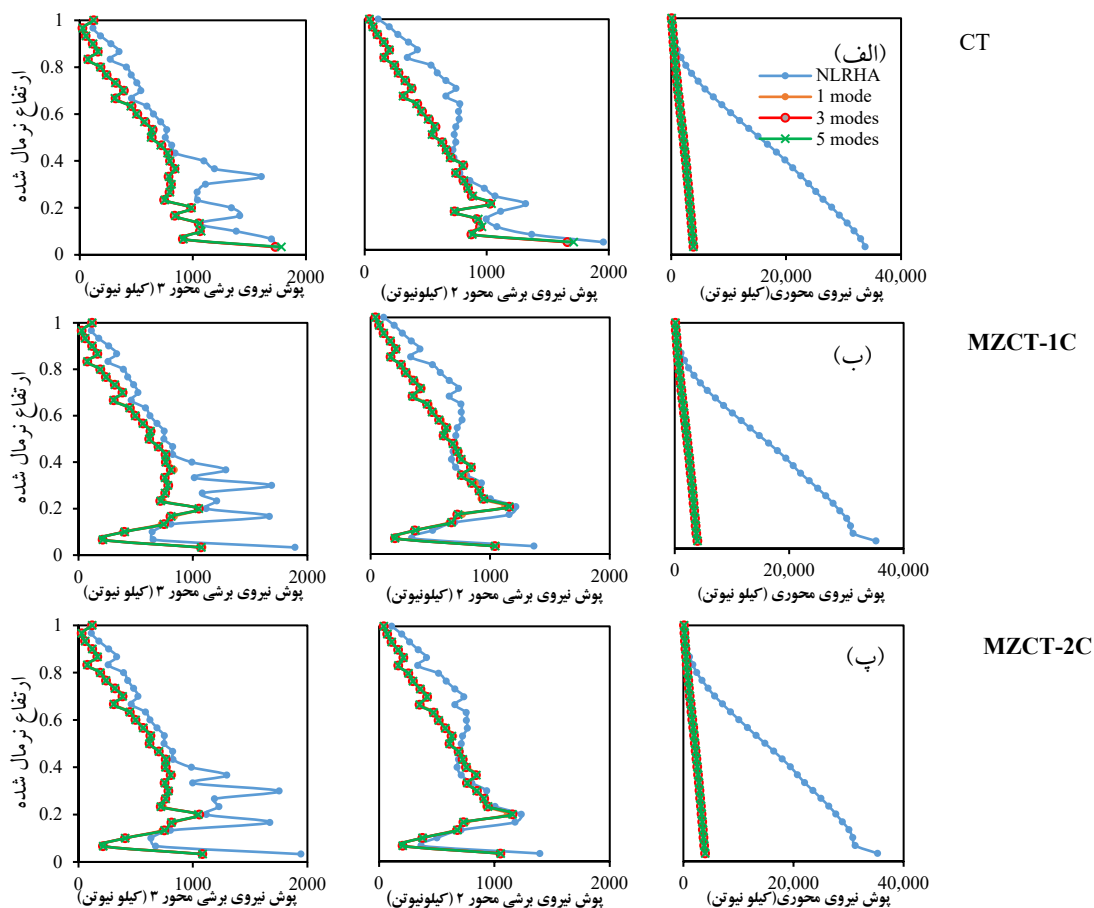
مدل MZCT-2C			مدل MZCT-1C			مدل CT			رکوردهای حوزه نزدیک
مُد ۵	مُد ۳	مُد ۱	مُد ۵	مُد ۳	مُد ۱	مُد ۵	مُد ۳	مُد ۱	
رکوردهای حوزه نزدیک									
متوسط درصد خطای تخمین انحراف استاندارد									
۱۶/۱۵	۱۶/۲۲	۱۶/۳۲	۱۶/۱۵	۱۶/۲۲	۱۶/۳۲	۱۳/۶۱	۱۳/۷۸	۱۳/۷۸	
۱/۲۰	۱/۲۱	۱/۲۸	۱/۲۰	۱/۲۱	۱/۲۸	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۷	
رکوردهای حوزه دور									
متوسط درصد خطای تخمین انحراف استاندارد									
۸/۹۳	۸/۹۳	۸/۹۴	۸/۹۵	۸/۹۸	۸/۹۹	۹/۴۹	۹/۶۴	۹/۶۴	
۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۷۷	

۳-۴- پوش بیشینه برآیندهای نیروها و ممان‌های ایجاد شده در ستون

شکل ۱۱ الف تا پ پوش نیروهای محوری و برشی ایجاد شده در ستون C پلان (شکل ۱) با استفاده از نتایج تحلیل‌های NLRHA و MPA با مشارکت ۱، ۳ و ۵ مود اول انتقالی تحت بارگذاری‌های واقعی و نیز معیارسازی شده برای رکورد نیرومند حوزه نزدیک JFP به ترتیب مربوط به سه مدل CT، MZCT-1C و MZCT-2C را به تصویر می‌کشد. ملاحظه می‌شود که به دلیل عدم در نظرگیری مولفه قائم، روش MPA قادر نیست بار محوری ستون را به درستی پیش‌بینی کند و خطای محاسباتی بسیار بالا است. همچنین، در مورد برش‌های در امتداد محور ۲ (محور ضعیف) و ۳ (محور قوی) مقطع نیز مشاهده می‌گردد که پیش‌بینی‌های سه حالت MPA بسیار به یکدیگر نزدیک است و می‌تواند روند تغییرات نیرو را با متوسط ۳۰ درصد خطا تخمین بزند. افزون بر آن، ملاحظه می‌شود که پیکربندی المان‌های زیپر باعث کاهش مقادیر بیشینه برآیندهای نیرویی شده و همچنین کاهش خطای تخمین حاصل از MPA را نیز در پی دارد. تفاوت آشکاری میان نتایج حاصل از کاربرد پیکربندی‌های متفاوت المان‌های زیپر وجود ندارد. همچنین، شکل ۱۲ الف تا پ نشان دهنده پوش بیشینه لنگرهای پیچشی و خمشی ایجاد شده در ستون C (شکل ۱) می‌باشد. یک برداشت تحلیلی آن است که به دلیل پیچیدگی اندرکنش پیچشی-خمشی غیرخطی در رفتار تیر-ستون‌ها، روش MPA قادر نیست برآیند لنگر پیچشی ستون را به درستی

از سازه، به عنوان یک تقاضای لرزه‌ای پایه تعریف می‌گردد. بررسی آسیب‌ها و خسارات وارده بر سازه تحت اثر رکوردهای نیرومند زلزله، با ارزیابی توزیع دریفت در ترازهای مختلف اسکلت مقاوم قابل توجیه است. محاسبات مربوط به این پارامتر پاسخ با توجه به تحلیل رفتار سه بعدی سازه‌های مطالعاتی، برای مبدا تعریف شده در محل مرکز جرم واقع در تراز کف طبقات انجام می‌شود.

نتایج محاسباتی به ترتیب برای مدل‌های CT و MZCT-1C و MZCT-2C می‌باشند. سه حالت مبنای تحلیلی روش MPA با مشارکت ۱، ۳ و ۵ مود اول انتقالی تدوین شده‌اند. با حضور المان‌های زیپر در چهار طبقه پایینی سازه، مقدار دریفت جانبی در این بخش به طرز محسوسی و با مقدار متوسط ۴۷ درصد کاهش یافته، همچنین در کل ارتفاع اسکلت مقاوم نیز به طور متوسط ۶ درصد افت رخ داده است. مقدار ماکزیمم دریفت نیز از ۰/۰۳۳ به مقدار ۰/۰۳۰ کاهش یافته که خود نشان دهنده یک افت ۸ درصدی می‌باشد. یک آورده محاسباتی آن است که مقادیر تخمین زده شده از سه حالت روش MPA برای هر سه سازه مطالعاتی، نزدیک به یکدیگر بوده و طبق جدول ۹ متوسط درصد خطای تخمین و انحراف استاندارد مربوطه در یک دامنه به نسبت متغیر قرار دارند. با مقایسه خطای روش‌های مختلف MPA می‌توان بیان کرد که با حضور پیکربندی المان‌های زیپر بزرگ مقیاس و افزایش یکپارچگی رفتاری، لحاظ نمودن اثرات مدهای انتقالی بالاتر از ۳ چندان تاثیری در تغییر نتایج و مشخصات پاسخ لرزه‌ای نخواهد داشت.



شکل ۱۱. پوش بیشینه برآیندهای نیرویی وارد بر ستون C پلان تحت بارگذاری دینامیکی (NLRHA) و بارگذاری معیارسازی شده استاتیکی (MPA) متناظر با رکورد حوزه نزدیک JFP: مدل (الف) CT، مدل (ب) MZCT-1C، مدل (پ) MZCT-2C؛ (محورهای ۲ و ۳ مقطع ستون به موازات راستاهای x و y پلان است)

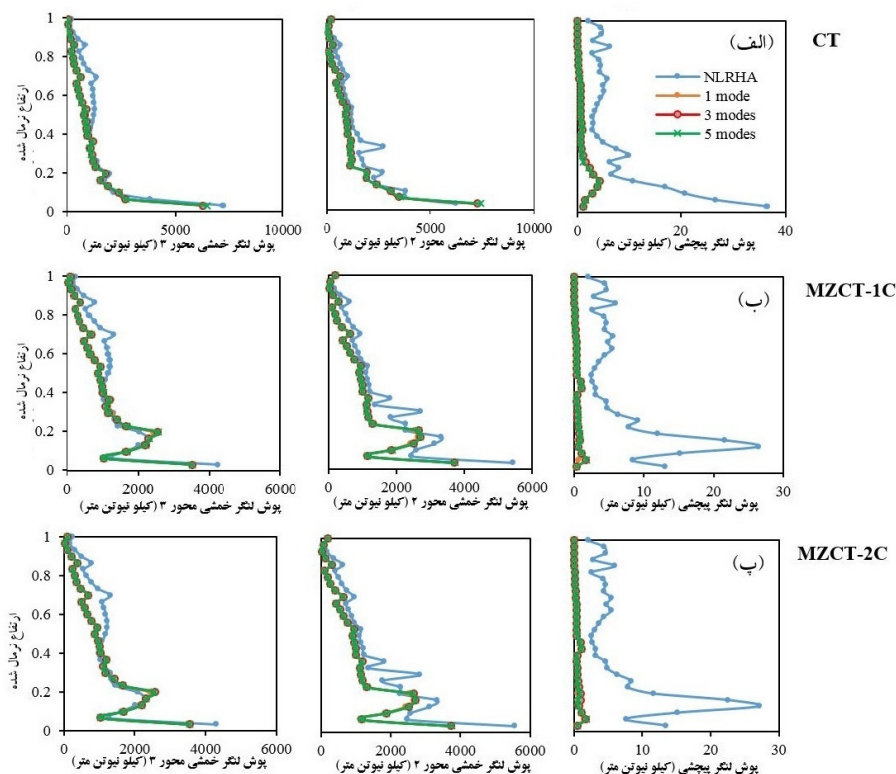
Fig. 11. The maximum axial and shear forces generated in column C in the plan based on the results of NLRHA and the assigned static lateral load used for MPA with the participation of different numbers of modes, corresponding to JFP near-field record: (a) The CT model, (b) The MZCT-1C model, (c) The MZCT-2C model; (The principal axes 2 and 3 of columns cross section are parallel to the plan X and Y directions)

چرخش مفاصل در اولین طبقه در ستون‌ها از مقدار ۰/۰۲۶ به ۰/۰۱۴ رادیان و در تیرها از مقدار ۰/۰۳۲ به ۰/۰۱۵ رادیان تغییر یافته که به ترتیب نشان دهنده کاهش قابل توجه ۴۶ و ۵۲ درصدی است. چرخش در مفاصل غیرخطی ستون‌ها در دیگر طبقات هر دو مدل مطالعاتی، مشابه است. همچنین برای تیرها در ۵ طبقه نخست چرخش مفاصل غیرخطی به علت حضور المان‌های زیپر بزرگ مقیاس به طور متوسط ۳۵ درصد کاهش یافته است. شکل‌های (۱۳-ب، پ و ت) پوش بیشینه چرخش مفاصل غیرخطی در ستون‌ها متناظر با صفحات قابی جهت Y را با استفاده از نتایج NLRHA و MPA با مشارکت ۱، ۳ و ۵ مود ارتعاشی برای سه مدل مطالعاتی نمایش می‌دهند. ملاحظه می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده از روش MPA

پیش‌بینی کند، اگر چه مقدار پیچش در ستون چشمگیر نیست. نکته دیگر آن که روش MPA قادر است روند تغییرات لنگر خمشی ستون را به خوبی برآورد کند و همچنین پیکربندی المان‌های زیپر بزرگ مقیاس نیز باعث کاهش نسبی مقادیر لنگرهای پیچشی و خمشی المان ستون C در حوزه رفتار غیرخطی می‌شود.

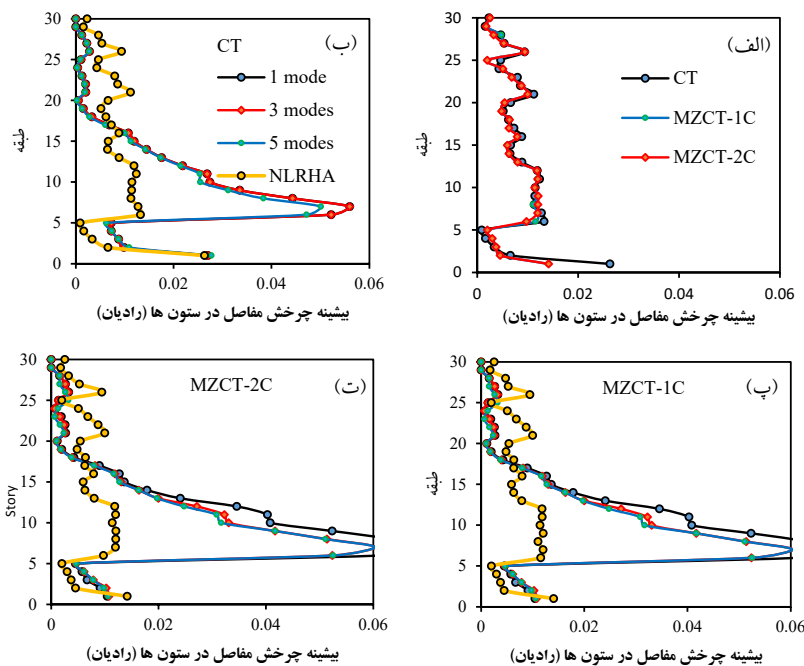
۴-۴- نمودار پوش بیشینه چرخش مفاصل غیرخطی

شکل‌های ۱۳-الف و ۱۴-الف پوش بیشینه چرخش مفاصل غیرخطی تحت رکورد زلزله بم را به ترتیب در ستون‌ها و در تیرها با استفاده از نتایج تحلیل NLRHA به تصویر می‌کشند. مشاهده می‌شود که با حضور المان‌های زیپر بزرگ مقیاس، مقدار بیشینه



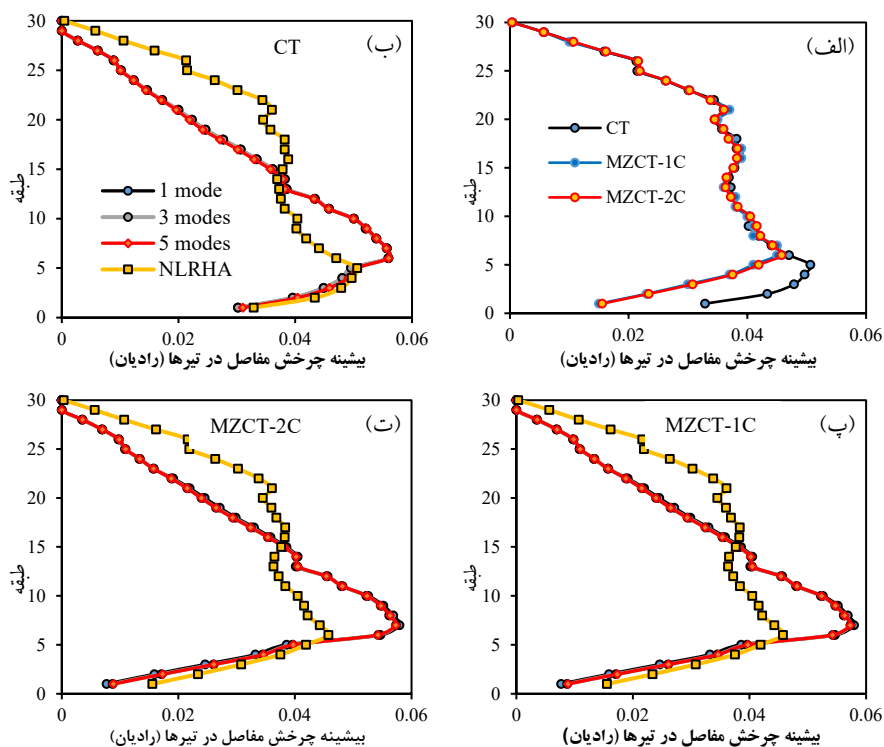
شکل ۱۲. پوش لنگرهای وارد بر ستون C پلان تحت بارگذاری دینامیکی (NLRHA) و بارگذاری معیارسازی شده استاتیکی (MPA) متناظر با رکورد حوزه نزدیک JFP؛ (الف) مدل CT، (ب) مدل MZCT-1C، (پ) مدل MZCT-2C؛ (محورهای ۲ و ۳ مقطع ستون به موازات راستاهای x و y پلان است)

Fig. 12. The maximum torsional and bending moments generated in column C in the plan based on the results of NLRHA and the assigned static lateral load used for MPA with the participation of different numbers of modes, corresponding to JFP near-field record: (a) The CT model, (b) The MZCT-1C model, (c) The MZCT-2C model; (The principal axes 2 and 3 of columns cross section are parallel to the plan X and Y directions)



شکل ۱۳. پوش بیشینه چرخش مفاصل غیرخطی در ستون های صفحات قابی جهت y تحت رکورد BAM؛ (الف) تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، همچنین تحلیل MPA (ب) مدل CT، (پ) مدل MZCT-1C، (ت) مدل MZCT-2C

Fig. 13. The maximum rotation of columns under BAM record in y direction of the plan which were obtained through structural analysis; (a) NLRHA, and MPA (b) The CT model, (c) The MZCT-1C model, (d) The MZCT-2C model



شکل ۱۴. پوش بیشینه چرخش مفاصل غیرخطی در تیرهای صفحات قابی جهت y تحت رکورد BAM؛ (الف) تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، همچنین تحلیل MPA (ب) مدل CT، (پ) مدل MZCT-1C، (ت) مدل MZCT-2C

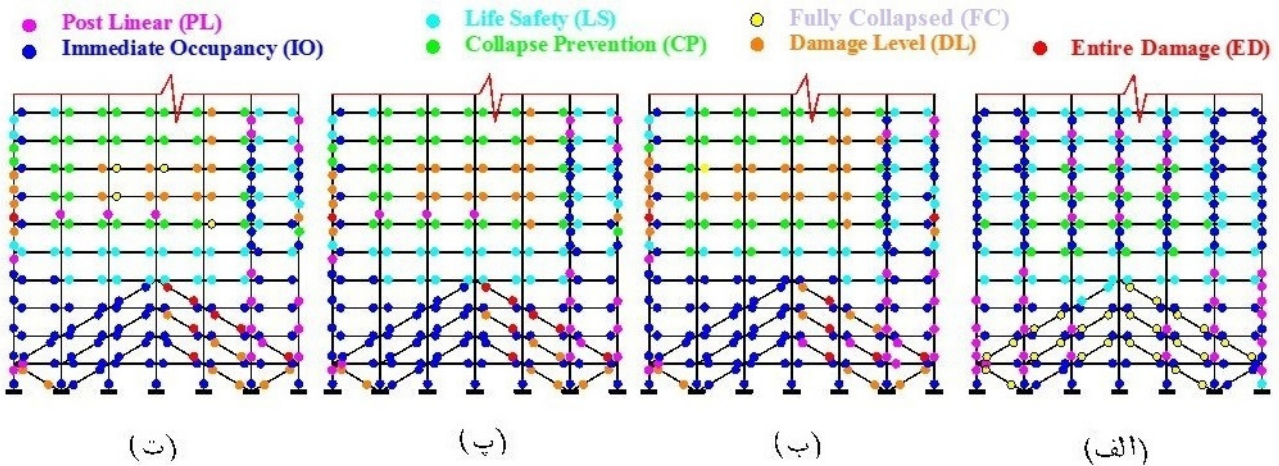
Fig. 14. The maximum rotation of girders under BAM record in y direction of the plan which were obtained through structural analysis; (a) NLRHA, and MPA (b) The CT model, (c) The MZCT-1C model, (d) The MZCT-2C model

۳۲ و ۳۴ درصد خطا وجود دارد.

آرایش و محل تشکیل مفاصل پلاستیک در ۱۰ طبقه پایینی سازه در صفحه قاب صلب گوشه‌ای پلان و به موازات محور y مربوط به مدل مطالعاتی MZCT-1C تحت رکورد مقیاس شده BAM و ارزیابی نتایج تحلیل NLRHA و همچنین بررسی نتایج تحلیل‌های ترتیب یافته MPA، در شکل ۱۵ به نمایش درآمده است. مطابق این شکل در پیکره اسکلت مقاوم سازه MZCT-1C بر پایه نتایج تحلیل NLRHA، مفاصل پلاستیک در دامنه عددی پایین‌تری نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده از تحلیل MPA قرار دارند و روش پوش‌آور مودال، چرخش مفاصل را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زند. همچنین با لحاظ نمودن اثرات مودهای بالاتر، دامنه آسیب‌ها کاهش بسیار کوچکی را تجربه کرده و اندکی به مقدار واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. بر طبق نتایج تحلیل NLRHA، المان‌های زیر بزرگ مقیاس با جذب سهم بیشتر نسبت به ستون‌ها سبب حفظ پایداری عمومی این المان‌ها و کل پیکره سازه در یک بازه زمان بزرگ‌تر شده‌اند. نمود این موضوع در نتایج حاصل از تحلیل‌های MPA

در هر سه مدل مطالعاتی و به ویژه در تراز طبقات ۵ تا ۱۵ با مقادیر دقیق، اختلاف زیادی داشته و بسیار بیشتر تخمین زده شده است. همچنین در طبقات ۱۵ تا ۳۰ مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر واقعی است.

این موضوع می‌تواند به علت عدم در نظر گرفتن اثرات تشدید یافته انتشار امواج لرزه‌ای در اسکلت مقاوم سازه، در ساختار تحلیلی روش MPA باشد. نکته دیگر آن که در مدل CT برای دستیابی به مقادیر نزدیک‌تر به واقعیت، در نظرگیری مشارکت ۵ مود ارتعاشی و در مدل‌های MZCT نیز مشارکت ۳ مود جانبی ضروری به نظر می‌رسد. شکل‌های (۱۴-ب، پ و ت) بیشینه پوش چرخش مفاصل غیرخطی در تیرها با استفاده از نتایج NLRHA و نیز MPA با مشارکت ۱، ۳ و ۵ مود ارتعاشی را نشان می‌دهند. این نمودارها برای صفحات قابی جهت y ترسیم شده و نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده از هر سه مقوله تحلیلی لحاظ شده در پیاده‌سازی روش MPA برای هر سه مدل مطالعاتی، همانند بوده و به طور متوسط در نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های CT و MZCT به ترتیب



شکل ۱۵. آرایش نهایی مفاصل پلاستیک تشکیل شده در بخش ۱۰ طبقه ای پایینی پیکره قاب صلب گوشه ای راستای y سازه مطالعاتی MZCT-1C تحت رکورد مقیاس شده BAM حاصل از آنالیزهای غیرخطی: (الف) تحلیل NLRHA؛ تحلیل MPA با مشارکت (ب) ۱ مود؛ (پ) ۳ مود؛ (ت) ۵ مود اول انتقالی

Fig. 15. The final configuration of the formed plastic hinges in the 10 lower floors of the rigid corner frame of the model MZCT-1C in y direction of the plan under scaled BAM record based on nonlinear analyses: (a) NLRHA; and MPA with the participation of; (b) 1 mode; (c) 3 modes; (d) 5 modes

جرم طبقات، به خصوص در طبقات پایین تر را در پی دارد. بررسی نتایج این پژوهش نشان می دهد که تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک حاوی اثرات پر قدرت جهت داری پیش رونده، رفتار لرزهای با نمود مشخص غیرخطی هندسی به صورت تدریجی در بازه زمانی نیمه اول پالس مشخص سرعت و به طور معمول تا پیش از عبور از نخستین مقدار بزرگ اوج پالس برقرار است. به طور معمول با گذر از نیمه اول پالس سرعت موجود در تاریخچه هر دو مولفه افقی LN و TR، ماهیت رفتار لرزهای با نمود جامع غیرخطی هندسی-مادی خواهد بود. نمود این اثرات به صورت شکل گیری و گسترش مشخصات و مولفه های غیرخطی با دامنه متوسط تا بزرگ در سازه پدیدار می شود. حضور پیکربندی المان های زیپر بزرگ مقیاس سبب کاسته شدن از شدت روند نرم شدن اسکلت و گسترش حوزه های غیرخطی خواهد شد. نکته مهم درباره پیاده سازی روش پوش آور آن است که در صورت انتخاب مناسب جابجایی هدف، این روش قادر خواهد بود که رفتار یک سازه بلند مرتبه را با دقت خوبی برآورد نماید. مقایسه نتایج مربوط به سه مدل مطالعاتی در این تحقیق نشان می دهد که حضور المان های زیپر بزرگ مقیاس، تاثیرات مودهای بالاتر در محاسبه بارگذاری معیار سازی شده برای تحلیل های پوش آور مودال را دچار کاهش نموده و نیز تفاوت در پیکربندی و چیدمان هندسی المان های مذکور، تاثیر ناچیزی در پارامترهای پاسخ خواهد داشت.

دیده نمی شود. شایان ذکر است که دلیل عمده این مطلب، اعمال یک سوپه و پیوسته بردار بارگذاری جانبی بدون لحاظ نمودن اثرات رفت و برگشتی زلزله، همراه با عدم لحاظ نمودن اثرات انتشار امواج لرزهای در پیکره سازه می باشد. بدین لحاظ، دامنه های بزرگ عملکرد غیرخطی فقط در نزدیک به نیمی از المان های زیپر بزرگ مقیاس دیده می شود.

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق ملاحظه می شود که حضور المان های زیپر بزرگ مقیاس سبب یک افزایش کوچک در سختی سازه و کاهش متوسط ۵ درصدی در پرپود مود پایه ارتعاش می گردد. این کاهش دوره تناوب اسکلت مقاوم سازه نیز باعث یک کاهش ۵ تا ۱۶ درصدی در ضریب مقیاس، جهت هم پایه سازی رکورد با سطح خطر مفروض در حوزه ساختگاه خواهد شد. ارزیابی عملکرد سازه های مطالعاتی در حوزه رفتار غیرخطی نشان داد که نمود اساسی ناشی از چیدمان و پیکربندی المان های زیپر بزرگ مقیاس در پاسخ لرزهای مدل های MZCT به صورت بروز دامنه پایین تر آسیب ها بوده و در نتیجه اسکلت مقاوم سازه دیرتر به ناپایداری دینامیکی محتمل می رسد. همچنین حضور المان های مذکور، کاهش عمومی مقدار تغییر مکان جانبی و نیز تغییر مکان نسبی جانبی (دریفت) در محل مرکز

فهرست نشانه ها

نشانه های انگلیسی

ماتریس میرایی	C
دامنه جابجایی پیشینه به دست آمده از تغییر شکل	D_n
حداکثرمود n ام	i
بردار واحد	k
ماتریس سختی	m
ماتریس جرم	$q_n(t)$
پاسخ مود n ام	s
توزیع نیروی موثر ناشی از زمین لرزه	(s_n)
توزیع نیروی محرک مودال	u
بردار جابجایی	\dot{u}
بردار سرعت	\ddot{u}
بردار شتاب	$\ddot{u}_g(t)$
شتاب زمین ناشی از زلزله	

نشانه های یونانی

ضریب مشارکت مودی	Γ_n
شکل مود n ام	φ_n
فرکانس طبیعی مود n ام	ω_n
نسبت میرایی مود n ام	ξ_n

مراجع

- to far-field and near-field ground motions, Asian Journal of Civil Engineering (BHRC) 18(5) (2016) 719-746.
- [6] E. Kalkan, S.K. Kunnath, Assessment of current nonlinear static procedures for seismic evaluation of buildings, Engineering Structures, 29(3) (2007) 305-316.
- [7] M. Poursha, F. Khoshnoudian, A.S. Moghadam, A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings, Engineering Structures, 31(2) (2009) 591-599.
- [8] S. Mukhopadhyay, V.K. Gupta, Directivity pulses in near-fault ground motions—II: Estimation of pulse parameters, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50 (2013) 38-52.
- [9] S. Mukhopadhyay, V.K. Gupta, Directivity pulses in near-fault ground motions—I: Identification, extraction and modeling, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 50 (2013) 1-15.
- [10] E. Kalkan, S.K. Kunnath, Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings, Earthquake Spectra, 22(2) (2006) 367-390.
- [11] J.F. Hall, Seismic response of steel frame buildings to near-source ground motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27(12) (1998) 1445-1464.
- [12] J.D. Bray, A. Rodriguez-Marek, Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24(11) (2004) 815-828.
- [13] M. Poursha, E.T. Samarin, The modified and extended upper-bound (UB) pushover method for the multi-mode pushover analysis of unsymmetric-plan tall buildings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 71 (2015) 114-127.
- [14] M. Poursha, F. Khoshnoudian, A.S. Moghadam, 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 Dynamics and Earthquake Engineering, 63 (2014) 162-173.
- [15] M. Poursha, M.A. Amini, A single-run multi-mode pushover analysis to account for the effect of higher modes in estimating the seismic demands of tall buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 13(8) (2015) 2347-2365.
- [16] S.F. Ghahari, H.R. Moradnejad, M.S. Rouhanimesh, A. Sarvghad-Moghadam, Studying higher mode effects
- [1] H. Kerawinkler, Importance of good nonlinear analysis, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 15(5) (2006) 515-531.
- [2] A. Tenchini, M. D'Aniello, C. Rebelo, R. Landolfo, L.S. Da-Silva, L. Lima, Seismic performance of dual-steel moment resisting frames, Journal of Constructional Steel Research, 101 (2014) 437-454.
- [3] M.H. Vafaei, H. Saffari, A modal shear-based pushover procedure for estimating the seismic demands of tall building structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 92 (2017) 95-108.
- [4] M. Poursha, F. Khoshnoudian, A.S. Moghadam, Assessment of modal pushover analysis and conventional nonlinear static procedure with load distributions of federal emergency management agency for high-rise buildings, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19 (2010) 291-308.
- [5] M.H. Vafaei, H. Saffari, Evaluation of the higher modes contribution in the seismic demands of buildings subjected

- [27] M. Guan, W. Liu, H. Du, J. Cui, J. Wang, Combination model for conventional pushover analysis considering higher mode vibration effects, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(12) (2019), DOI: 10.1002/tal.1625
- [28] ASCE / SEI 41-13, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, 2014.
- [29] PEER Report 2017/06, *Guidelines for Performance Based Seismic Design of Tall Buildings*, Report as part of the Tall Buildings Initiative, University of California, Berkeley, 2017.
- [30] PEER Ground Motion Database, California, <http://peer.berkeley.edu/>
- [31] R. Puglia, E. Russo, L. Luzi, M. D'Amico, C. Felicetta, F. Pacor, G. Lanzano, Strong-motion processing service: a tool to access and analyze earthquakes strong-motion waveforms, *Bulletin of Earthquake Engineering (Springer)*, 16(7) (2018) 2641-2651.
- [32] R. Guidotti, A. Castellani, M. Stupazzini, Nearfield earthquake strong ground motion rotations and their relevance on tall buildings, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(3A) (2018) 1171-1184.
- [33] S. Etli, E.M. Güneysi, Response of steel buildings under near and far field earthquakes, *Civil Engineering Beyond Limits, Turkey*, 2 (2020) 24-30.
- [34] H.Y. Chang, C.K. Chiu, Uncertainty assessment of field weld connections and the related effects on service life of steel buildings, *Structure and Infrastructure Engineering (Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance)*, (2019) DOI: 10.1080/15732479.2019.1621906
- [35] S. Narayan, M.K. Shrimali, S.D. Bharti, T.K. Datta, Collapse of damaged steel building frames because of earthquakes, *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)*, (2018) DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001125.
- [36] FEMA 440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Applied Technology Council (ATC-55 Project), 2005.
- on the performance of nonlinear static analysis methods considering near-fault effects, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(2) (2013) 426-437.
- [17] M. Ferraioli, Multi-mode pushover procedure for deformation demand estimates of steel moment-resisting frames, *International Journal of Steel Structures*, 17(2) (2017) 653-676.
- [18] A.K. Chopra, R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(8) (2004) 903-927.
- [19] A.K. Chopra, R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3) (2002) 561-582.
- [20] Iranian National Building Code (INBC), *Steel Structures*, Issue 10, National Building Regulations Office, Tehran, Iran, 2014. (in Persian)
- [21] Iranian National Building Code (INBC), *Design Loads for Buildings*, Issue 6, National Building Regulations Office, Tehran, Iran, 2014. (in Persian)
- [22] Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800, 4th edn., Building and Housing Research Center (BHRC), Tehran, Iran, 2014. (in Persian)
- [23] FEMA P-695, *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, D.C., Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [24] FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management, 1998.
- [25] SAP 2000, *Integrated Software for Structural Analysis and Design*. Computers & Structures Institute (CSI), Berkeley, California
- [26] A.Y. Rahmani, N. Bourahla, R. Bento, M. Badaoui, Adaptive upper-bound pushover analysis for high-rise moment steel frames, *Structures*, 20 (2019) 912-923, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.006>

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Aboutalebi, A. Meshkat-Dini, J. Keyvani-Ghamsari, *Analytical Extension of Higher Modes Participation in The Estimation of Seismic Response of Tall Hybrid Framed Tube Structures comprising Mega Zipper Elements*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4535-4554.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18400.6866

