



## Application of the Endurance Time Method in the Seismic Assessment of Moment-Resisting Reinforced Concrete Frames with Setbacks

Mehdi Izadpanah <sup>1✉</sup> 

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran.  
E-mail: [M.Izadpanah@kut.ac.ir](mailto:M.Izadpanah@kut.ac.ir).

---

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
**Received**  
2024-07-31  
**Received in revised form**  
2024-10-24  
**Accepted**  
2024-11-26  
**Available online**  
2024-12-21

**Keywords:**  
Irregular building,  
Seismic behavior,  
Nonlinear dynamic analysis.  
Endurance Time method.  
Inter-story drift.

---

### ABSTRACT

Nowadays, many buildings around the world exhibit height irregularities. Given that higher vibration modes can significantly influence the responses of irregular frames, it is essential to investigate the seismic behavior of these structures. In this research, making use of nonlinear dynamic analysis, the seismic behavior of irregular moment resisting frames is assessed. Nonlinear dynamic analysis, due to considering the dynamic characteristics and nonlinear behavior of the structure, is one of the most accurate methods for seismic evaluation of structures. Despite its advantages, the complexity, high computational demands, and time-consuming nature of nonlinear dynamic analysis have led to limited attention from engineers in the design process of conventional structures. In recent years, several efforts have been made to enhance this method, including the development of the Endurance Time method. In this method, acceleration functions are generated using optimization algorithms, reducing the need for excessive use of accelerograms. For this purpose, 3- and 9-story frames with different types of height irregularities are considered. These frames are analyzed using accelerations derived from the Endurance Time method. A comparison of the results indicates that setbacks in building frames significantly influence the dynamic responses. Notably, the difference in drift values between the story where the setback occurs and the others is relatively large. This highlights the need for special attention to the irregularities during the design process of such frames.

---

**Cite this article:** Izadpanah, Mehdi. (2024). Application of the endurance time method in the seismic assessment of moment-resisting reinforced concrete frames with setbacks. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), 1-12.

DOI: 10.22126/amcen.2024.11389.1032



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.11389.1032

Publisher: Razi University

---

## **Introduction**

The evaluation of inter-story drifts is one of the most important aspects in designing process of buildings. This process needs a particular attention for irregular buildings due to the importance of higher vibration modes. Today, there are numerous buildings with vertical irregularity, including stepped buildings and buildings with setbacks all around the world. The design of such buildings continues for reasons such as architectural considerations, aesthetics, change of use, etc. A building with setback presents a discontinuity in structural characteristics such as stiffness; mass, etc. evaluation of the seismic performance of irregular buildings has been a topic of research interest in last decade. In this study, the seismic performance of moment-resisting reinforced concrete frames with setback was investigated. To do so, 3- and 9-story frames with different types of irregularities are considered. These frames are analyzed using accelerations derived from the Endurance Time method.

## **Method**

In this study, making use of nonlinear dynamic analysis, the seismic performance of the regular and irregular frames is assessed. Nonlinear dynamic analysis is recognized as the most accurate, yet also the most complex method of structural analysis, capable of considering the progressive changes of structure characteristics during seismic excitations. To solve the nonlinear dynamic equations, the Newmark method is employed. The Endurance Time acceleration functions (in), achieved based on FEMA 440, are utilized as excitations. Lumped plasticity model is employed to simulate the nonlinear behavior of the reinforced concrete structural components, where inelastic behavior is concentrated at the predefined locations at two ends of member. Tri-linear moment-curvature model and a vertex-oriented hysteretic model are utilized to capture the complex cyclic behavior of the RC elements. The moment-resisting reinforced concrete frames, including 3, and 12 stories, are studied. The frames are designed to meet intermediate ductility criteria as per the Iranian seismic design code. The story height is considered to be 3.2 m.

## **Results**

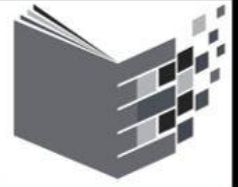
Comparing the inter-story drifts of the regular 9-story frame subjected to the accelerations recommended by FEMA 440 with those from the Endurance Time acceleration functions confirms the validity of ET functions in predicting seismic responses. Comparing the inter-story drifts of the 3-story frames indicates that the peak inter-story drifts for 3T0, 3T1, 3T2, and 3T3 are 1.1, 1.0, 1.2, and 1.6, respectively. The maximum inter-story drifts for 9T0, 9T1, 9T2, 9T3, 9T4, and 9T5 are 1.0, 1.3, 1.1, 0.8, 0.8, and 0.76, respectively. For 9T1, the inter-story drift in 7<sup>th</sup> story is 60% higher than that of 6<sup>th</sup> story level. For 9T2, the inter-story drift in 3<sup>rd</sup> story is 22% lower than that of 4<sup>th</sup> story level. For 9T3 and 9T4, the inter-story drift in 7<sup>th</sup> story is 35% higher than that of 6<sup>th</sup> story level, and the inter-story drift in 4<sup>th</sup> story is 35% higher than that of 3<sup>rd</sup> story level. For 9T5, the inter-story drift in 6<sup>th</sup> story is 37% lower than that of 7<sup>th</sup> story level.

**Conclusions**

In this study, 3- and 9-story moment-resisting reinforced concrete frames with different types of height irregularities are taken into consideration. These frames are analyzed using the Endurance Time acceleration functions. It is found that setbacks in building frames significantly influence the dynamic responses. Type 3 accounts for the highest inter-story drift among the 3-story frames, while the highest inter-story drift for the 9-story frames belongs to 9T1. A comparison of the inter-story drifts in the upper and lower stories of the setback reveals that the special attention to these irregularities is essential during the design process of such frames.

**Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.



## ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب‌های خمشی بتن مسلح دارای عقب‌نشینی با استفاده از روش زمان دوام

مهدی ایزدپناه✉

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [M.Izadpanah@kut.ac.ir](mailto:M.Izadpanah@kut.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

امروزه ساختمان‌های بسیاری در جهان وجود دارند که دارای نامنظمی در ارتفاع می‌باشند. با توجه به اینکه در قاب‌های نامنظم، اثر مودهای ارتعاشی بالاتر، می‌تواند پاسخ‌های سازه را تحت تاثیر قرار دهد، بررسی رفتار لرزه‌ای این ساختمان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، از تحلیل دینامیکی غیرخطی جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی نامنظم در ارتفاع، استفاده شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی، به دلیل در نظر گرفتن ویژگی‌های دینامیکی و رفتار غیرخطی سازه، از دقیق‌ترین روش‌ها جهت ارزیابی لرزه-ای سازه‌ها محسوب می‌شود. علی‌رغم مزیت‌های این روش، به دلیل پیچیدگی، حجم محاسباتی بالا و زمان‌بر بودن، این تحلیل در فرایند طراحی سازه‌های معمول، چندان مورد توجه مهندسان قرار نمی‌گیرد. در سال‌های اخیر، محققان سعی در بهبود این روش داشته‌اند، که از آن جمله می‌توان به روش زمان دوام اشاره نمود. در این روش با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، رکوردهایی تولید می‌شوند که نیاز به استفاده از تعداد زیاد شتاب‌نگاشت را مرتفع می‌سازد. هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های منظم و نامنظم در ارتفاع، با استفاده از روش زمان دوام می‌باشد. بدین منظور، قاب‌های ۳ و ۹ طبقه با انواع متفاوتی از نامنظمی در ارتفاع در نظر گرفته شدند. این قاب‌ها با استفاده از رکوردهای زمان دوام تحلیل می‌شوند. مقایسه مقدار دررفت قاب‌ها نشان می‌دهد که ایجاد عقب‌نشینی در قاب‌های ساختمانی با تغییر سختی و جرم همراه است و کاملاً بر پاسخ‌های دینامیکی تاثیر گذار است و اختلاف دررفت در طبقه ایجاد عقب‌نشینی و طبقه زیرین آن نسبتاً زیاد است. به عبارت دیگر، در فرایند طراحی چنین قاب‌هایی، توجه ویژه به محل ایجاد نامنظمی، ضروری به نظر می‌رسد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۸/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۰۶

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

ساختمان نامنظم،

رفتار لرزه‌ای،

تحلیل دینامیکی غیرخطی،

روش زمان دوام،

جابجایی نسبی طبقات

استناد: ایزدپناه، مهدی. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد لرزه ای قاب‌های خمشی بتن مسلح دارای عقب‌نشینی با استفاده از روش زمان دوام. *مجله مدل‌سازی*

پیشرفته در مهندسی عمران، ۱(۲)، ۱-۱۲. DOI: 10.22126/amcen.2024.11389.1032



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

## ۱. مقدمه

یک مقدار واحد، می‌تواند گمراه‌کننده باشد. والامنش و استکانچی نشان دادند که دقت نتایج روش زمان دوام، تحت تاثیر نامنظمی ساختمان نمی‌باشد [۱۱ و ۱۲]. لذا در این تحقیق از این روش جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی قاب‌های منظم و نامنظم بتن مسلح استفاده شده است.

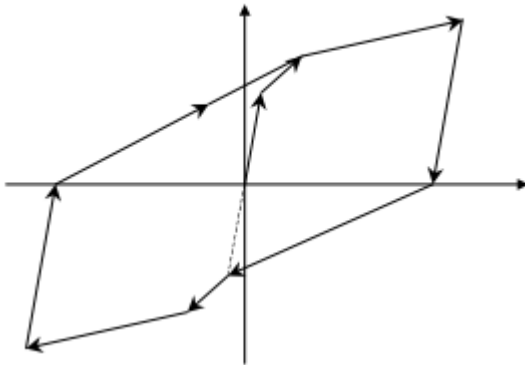
## ۲. روش زمان دوام

جهت تحلیل سازه‌ها، روش‌های متفاوتی وجود دارد که بطور کلی به دو دسته‌ی استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند. هر یک از این روش‌ها را می‌توان به دو گروه خطی و غیرخطی تقسیم نمود. در بین این روش‌ها، تحلیل دینامیکی غیرخطی به دلیل شبیه‌سازی رفتار غیرخطی سازه‌ها و همچنین در نظر گرفتن ویژگی‌های دینامیکی سازه، از دقت و سازگاری بیشتری با رفتار واقعی سازه برخوردار است. اگرچه این تحلیل، تقریب مناسب تری از رفتار سازه‌ها در مقایسه با سایر روش‌های تحلیل ارائه می‌دهد، اما پیچیدگی تحلیل، نحوه انتخاب شتاب نگاشت‌ها، زمان بر بودن و حجم محاسباتی بالای آن، سبب شده این روش از مقبولیت بالایی بین مهندسان برخوردار نباشد. به دلیل ویژگی‌های دینامیکی متفاوت سازه‌ها و همچنین زلزله‌ها، مانند محتوای فرکانسی، انرژی متفاوت و ...، بعلاوه ی عدم قطعیت در مورد زلزله‌های آتی، آیین‌نامه‌های لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی ساختمان‌ها تحت تحریک چندین زلزله را ضروری می‌دانند. در سال‌های اخیر محققان بسیاری تلاش کرده‌اند تا نیاز به استفاده از چندین رکورد زلزله را جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی کاهش دهند [۱۳ و ۱۴]. ایده‌ی روش زمان دوام، اولین بار توسط استکانچی و همکاران ارائه گردید [۱۵]. روش زمان دوام یک تحلیل بار افزون دینامیکی ساده است. در این روش پاسخ لرزه‌ای سازه، تحت یک تحریک دینامیکی افزایش یافته بررسی می‌شود. در این روش، پاسخ‌های سازه مانند دریافت طبقات، دوران پلاستیک اعضا، شاخص‌های خسارت و ... در مدت تحلیل اندازه‌گیری می‌شوند و تحلیل تا تخریب سازه یا گذر سازه از یک حد مشخص ادامه می‌یابد. مدت زمانی که سازه از ابتدای تحلیل تا لحظه خرابی طی می‌کند، زمان دوام نامیده می‌شود [۱۶]. یکی از مهمترین گام‌ها در روش زمان دوام، تهیه شتاب نگاشت‌های مناسب برای این روش است به نحوی که شدت زلزله در آن‌ها با گذشت

از مهم‌ترین مقولات در طراحی سازه‌ها، طراحی و کنترل آن‌ها در برابر جابجایی نسبی طبقات می‌باشد. این فرآیند به خصوص در ساختمان‌های دارای نامنظمی در ارتفاع، به علت اثر موده‌های ارتعاشی بالاتر دارای اهمیت ویژه‌ای است. امروزه، ساختمان‌های دارای نامنظمی در ارتفاع، از جمله ساختمان‌های پله‌ای و همچنین ساختمان‌های دارای عقب‌نشینی بسیاری موجود هستند و طراحی اینگونه ساختمان‌ها به دلایلی مانند ملاحظات معماری، زیبایی، تغییر کاربری و ... همچنان ادامه دارد. یک ساختمان دارای عقب‌نشینی، با یک ناپیوستگی در سختی، جرم و مقاومت مواجه می‌شود. در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های نامنظم پرداختند [۳-۱]. سارکار و همکاران [۴] یک روش جدید جهت تعیین میزان نامنظمی در ساختمان‌ها را ارائه نمودند. بدین منظور ۷۸ قاب ساختمانی با انواع مختلفی از نامنظمی و ارتفاع را در نظر گرفتند. روش پیشنهادی این محققین، مبتنی بر توزیع جرم و سختی می‌باشد و نتایج نشان از عملکرد مناسب تر روش پیشنهادی، نسبت رویکردهای قبلی دارد. تحقیقات بسیاری نشان دادند که طبقاتی که نامنظمی در آنها اتفاق می‌افتد، در زلزله تغییرشکل‌های بزرگی را تجربه می‌کنند [۶-۵]. همچنین نشان داده شده است که خسارت معمولاً در طبقات نرم متمرکز می‌شود [۸-۷]. در مرجع [۹] نشان داده شد که میزان عقب‌نشینی در ساختمان‌ها، به شدت پاسخ لرزه‌ای این ساختمان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یک روش طراحی مبتنی بر تغییرمکان مودال برای ساختمان‌های دارای نامنظمی در ارتفاع پیشنهاد گردید. مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان داد که روش مزبور با دقت قابل قبولی می‌تواند پاسخ‌های دینامیکی را پیش‌بینی نماید. چندین حالت متنوع از تحلیل بارافزون، برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ساختمان‌های دارای عقب‌نشینی استفاده شد و نتایج نشان داد که دقت این تحلیل‌ها به دو عامل محل ایجاد عقب‌نشینی و میزان آن، وابسته است [۹]. حبیبی و همکاران با ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای عقب‌نشینی، به ارائه روابطی جهت محاسبه‌ی ضریب رفتار قاب خمشی دارای عقب‌نشینی در ارتفاع پرداختند [۱۰]. این محققین، نشان دادند که ضریب رفتار قاب‌های منظم و نامنظم متفاوت است و استفاده از

### ۳. تحلیل دینامیکی غیرخطی

تحلیل دینامیکی غیرخطی را می‌توان دقیق‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین روش تحلیل سازه دانست. در این روش، سختی و سایر مشخصه‌های سازه، در هر لحظه زمانی اصلاح می‌شود و پاسخ غیر-خطی سازه محاسبه می‌گردد. از موارد مهم در این تحلیل، انتخاب یک منحنی چرخه‌ای مناسب برای نیروی بازگرداننده می‌باشد. مدل چرخه‌ای در نظر گرفته شده در این تحقیق، مدل سه خطی متمایل به تسلیم (شکل ۲) است که در مرحله ی بارگذاری توانایی مدل سازی ترک خودگی و تسلیم را دارا می‌باشد [۱۹].



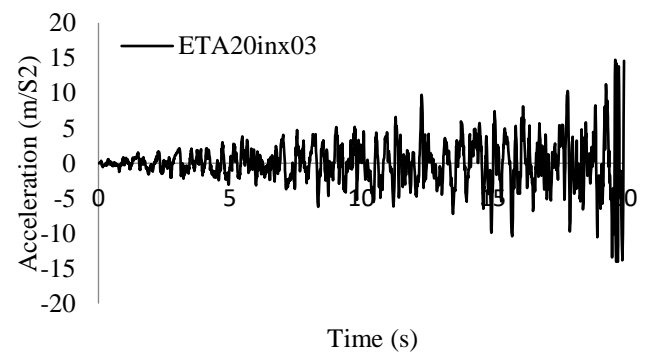
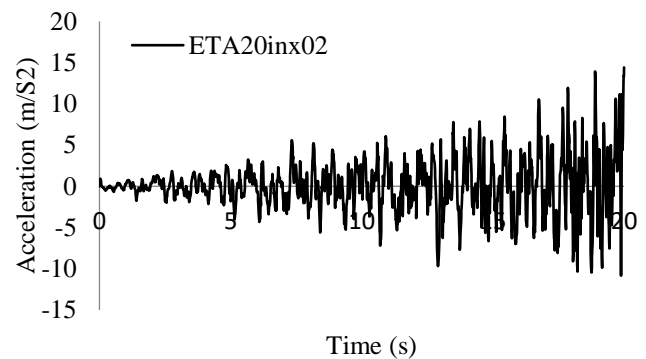
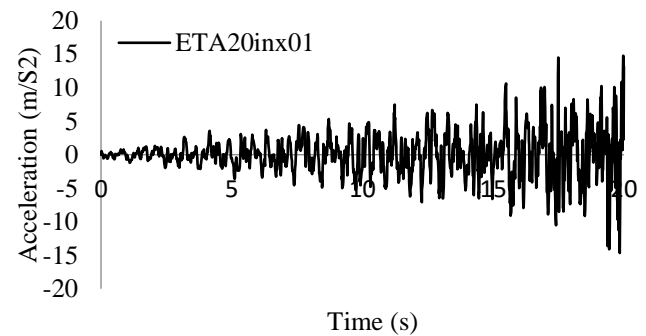
شکل ۲. مدل رفتار هیستریزس در این تحقیق [۱۹]

همچنین انتخاب گام زمانی مناسب در این تحلیل، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد، چراکه انتخاب گام زمانی نامناسب اغلب منتهی به نیروهای نامتعادل بزرگ می‌شود و مشکلاتی را در مدل‌سازی هیستریزس ایجاد کرده و می‌تواند سبب ناپایداری عددی در برنامه گردد. در این مطالعه از روش نیومارک و ترکیب آن با روش شبه نیرو استفاده می‌شود. به این منظور معادله زیر در هر لحظه‌ی زمانی حل می‌گردد:

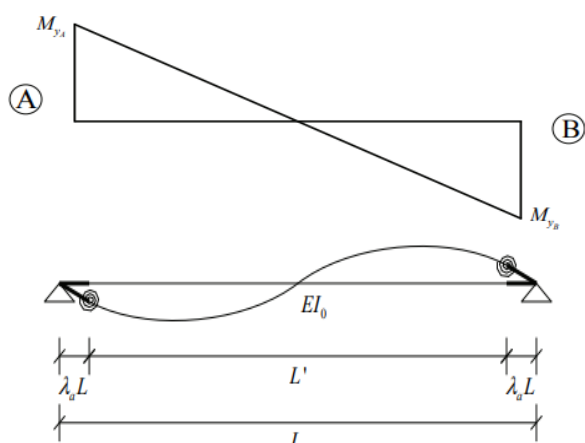
$$[M]\{\Delta\ddot{u}\} + [C]\{\Delta\dot{u}\} + K_t\{\Delta u\} = - [M]\left(\{L_h\}\Delta\ddot{x}_{gh} + \{L_v\}\Delta\ddot{x}_{gv}\right) + C_{corr}\{\Delta F_{err}\} \quad (1)$$

که در آن  $[M]$  ماتریس جرم،  $[C]$  ماتریس میرایی،  $K_t$  ماتریس سختی تانژانت،  $\{\Delta u\}$ ،  $\{\Delta\dot{u}\}$  و  $\{\Delta\ddot{u}\}$  به ترتیب بردارهای تغییر در تغییر مکان، سرعت و شتاب،  $\{L_h\}$  و  $\{L_v\}$  به ترتیب بردارهایی

زمان افزایش یابد. بدین منظور در تحقیقات انجام شده، توابع متنوعی ارائه شده‌اند. برخی از این توابع فقط جهت تحلیل‌های خطی مناسب هستند و برخی دیگر برای تحلیل‌های غیرخطی نیز مفید هستند. توابع شتاب سری in [۱۷] براساس شتاب نگاشت‌های معرفی شده در FEMA 440 [۱۸] و برای خاک تیپ C (معادل خاک نوع II در استاندارد ۲۸۰۰) استخراج شده‌اند. سه مجموعه ی سه تایی و دارای مولفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  تولید شدند به گونه ای که برای تحلیل‌های خطی و غیرخطی مناسب باشند. در شکل ۱، سه شتابنگاشت متناظر با مولفه ی  $x$  نشان داده شده است.

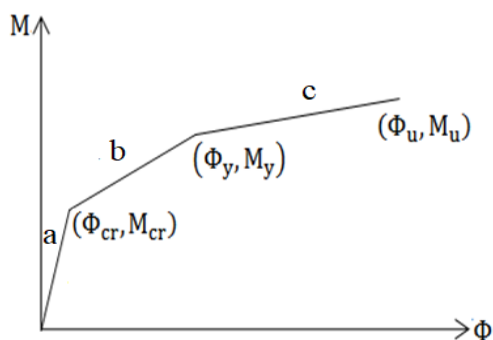


شکل ۱. توابع شتابنگاشت سری in (مولفه ی  $x$ )



شکل ۳. مدل پلاستیسته متمرکز [۱۹]

در این مدل، رفتار غیرخطی در دو فنر واقع شده در دو انتهای المان متمرکز می‌گردد و بخش میانی المان، الاستیک ( $EI_0$ ) در نظر گرفته می‌شود. ضمناً اثر نواحی صلب انتهایی، در این تحقیق در نظر گرفته شده است که با استفاده از ضرایب  $(\lambda_B, \lambda_A)$  در شکل ۳، مشخص شده است. منحنی لنگر انحنای صورت سه خطی در نظر گرفته شده است که دارای سه بخش متمایز قبل از ترک خوردگی (a)، وضعیت ترک خورده (b) و شاخه‌ی تسلیم شده (c) می‌باشد (شکل ۴). این منحنی برای المان‌های سازه‌ای، با استفاده از روش فایبر استخراج شده است که منحنی تنش و کرنش بتن و فولاد در این روش مانند شکل ۵، در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. منحنی سه خطی لنگر-انحنا [۱۹]

برای تصحیح شتاب افقی و عمودی وارده،  $\Delta \ddot{x}_{gv}$  و  $\Delta \ddot{x}_{gh}$  به ترتیب تغییر در شتاب افقی و عمودی وارده،  $C_{corr}$  ضریب تصحیح (که معمولاً ۱ فرض می‌شود) و  $\{\Delta F_{err}\}$  بردار نیروهای نامتعادل سازه می‌باشد. معادله (۱) با استفاده از الگوریتم نیومارک-بتا با فرض خطی بودن شتاب در فواصل زمانی مختلف، حل می‌شود و در نتیجه مقادیر سرعت و تغییر مکان محاسبه می‌شوند:

$$\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{u}\}_t + \Delta t [(1 - \gamma)\{\ddot{u}\}_t + \gamma\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}] \quad (2)$$

$$\{u\}_{t+\Delta t} = \{u\}_t + \Delta t \{\dot{u}\}_t + \Delta t^2 [(0.5 - \beta)\{\ddot{u}\}_t + \beta\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}] \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهایی روش تحلیل می‌باشند که این مقادیر را بصورت پیش فرض به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۲۵ در نظر می‌گیرد که با این مقادیر، مقدار شتاب بین دو نقطه انتگرال گیری ثابت فرض می‌شود. البته می‌توان با انتخاب مقادیر ۰/۵ و ۰/۱۶۷، شتاب را در بین دو نقطه انتگرال گیری خطی در نظر گرفت. لازم به ذکر است با انتخاب گام زمانی کوچک، نتایج فرض شتاب خطی و شتاب ثابت کاملاً نزدیک به هم خواهند شد. در نهایت با جایگذاری معادلات ۲ و ۳ در رابطه ۱، رابطه‌ی زیر نتیجه خواهد شد:

$$[K_D]\{\Delta u\}_{t+\Delta t} = \{\Delta F_D\} \quad (4)$$

که در این رابطه  $[K_D]$  و  $\{\Delta F_D\}$  به ترتیب ماتریس سختی و بردار بار معادل می‌باشند. برای اطلاعات بیشتر در مورد این روش و نحوه‌ی حل معادلات دینامیکی می‌توان به مرجع [۱۹] مراجعه نمود.

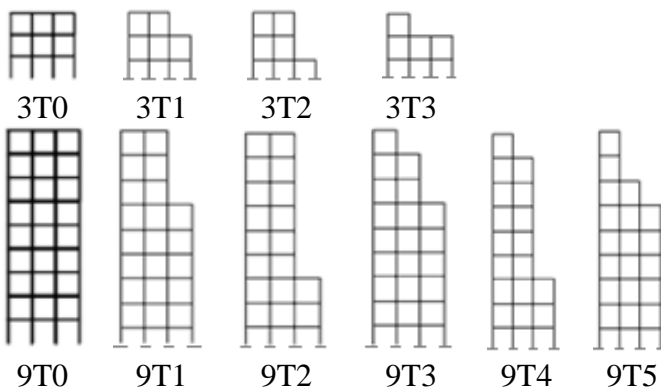
#### ۴. مدل‌سازی رفتار غیرخطی

به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی المان‌های سازه‌ای، در این تحقیق از مدل پلاستیسته متمرکز [۱۹] استفاده شده است (شکل ۳).

کرنش متناظر با حداکثر مقاومت بتن برابر  $0/2$  درصد، کرنش نهایی بتن برابر  $0/3$  درصد، مقاومت جاری شدن فولاد برابر  $400$  مگاپاسکال و مدول الاستیسته فولاد برابر  $2000000$  مگاپاسکال فرض شده است. نامنظمی‌های هندسی قاب‌ها بر اساس معیارهای زیر انتخاب شده‌اند:

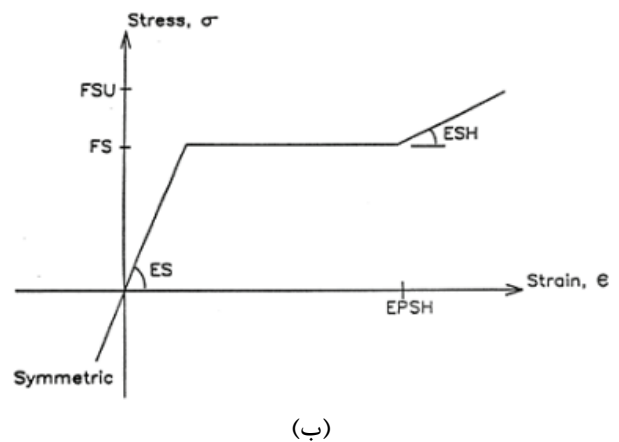
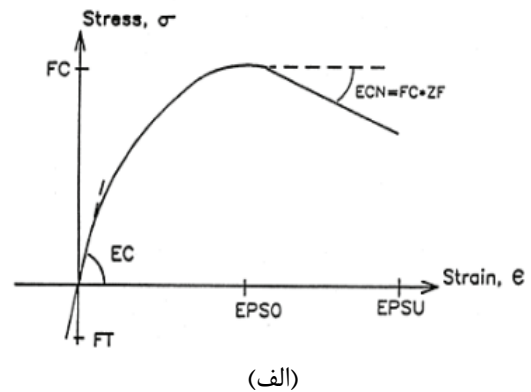
- (۱) حذف دهانه کناری از دوسوم ارتفاع تا طبقه آخر
- (۲) حذف دهانه کناری از یک‌سوم ارتفاع تا طبقه آخر
- (۳) حذف دهانه کناری از دوسوم ارتفاع تا طبقه آخر و حذف دهانه میانی در طبقه آخر
- (۴) حذف دهانه کناری از یک‌سوم ارتفاع تا طبقه آخر و حذف دهانه میانی در طبقه آخر
- (۵) حذف دهانه کناری از دوسوم ارتفاع تا طبقه آخر و حذف دهانه میانی در دو طبقه آخر

برای نام‌گذاری قاب‌ها عدد سمت چپ T معرف تعداد طبقات قاب و عدد سمت راست آن، معرف نوع نامنظمی در نظر گرفته شده است (شکل ۶). لازم به ذکر است، اگرچه انواع متنوع دیگری از نامنظمی در ارتفاع را می‌توان در نظر گرفت، انتخاب حالات در نظر گرفته شده جزئی از فرضیات این تحقیق می‌باشد.



شکل ۶. هندسه قاب‌های مدل‌سازی شده

مشخصات مقاطع برای قاب ۹ طبقه منظم در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۵. منحنی تنش کرنش (الف) بتن (ب) فولاد [۱۹]

جزئیات تکمیلی در مورد این مدل و نحوه‌ی در نظر گرفتن نواحی صلب انتهایی، در مرجع [۱۹] ارائه شده است.

##### ۵. مشخصات مدل‌ها

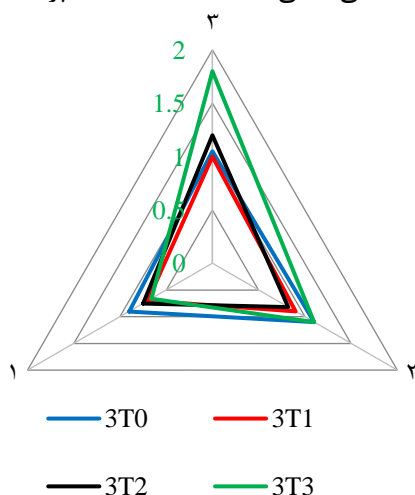
قاب‌های مورد مطالعه در این پژوهش از نوع قاب خمشی بتن مسلح با شکل پذیری متوسط می‌باشند. تمام قاب‌های مورد مطالعه بر اساس مبحث ششم مقررات ملی بارگذاری و بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث نهم مقررات ملی ایران تحلیل و طراحی گردیده‌اند. ارتفاع تمام طبقات  $3/20$  متر و عرض دهانه‌های قاب‌ها  $4$  متر می‌باشند. عرض باربر قاب‌ها  $5$  متر و تمام طبقات دارای بار مرده  $550$  و بار زنده  $200$  کیلوگرم بر مترمربع هستند. مقاومت مشخصه بتن  $30$  مگاپاسکال، مدول الاستیسته بتن برابر  $27386$  مگاپاسکال،



همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در طبقات پایین قاب، مقادیر جابجایی نسبی روش زمان دوام بیش از مقادیر تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی است که این اختلاف در بیشترین حالت حدود ۱۰ درصد است. در طبقات میانی قاب، مقادیر جابجایی نسبی روش زمان دوام کمتر از روش تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی استخراج شده است که بیشترین اختلاف حدود ۲۰ درصد می‌باشد. لذا توابع شتاب نگاشت روش زمان دوام، با دقت مناسبی می‌توانند پاسخ‌های لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی را پیش بینی نمایند.

در ادامه، قاب‌های در نظر گرفته شده، تحت تحریک توابع شتابنگاشت معرفی شده در بخش ۲، تحلیل شدند و مقادیر دریافت آنها با یکدیگر مقایسه شدند.

شکل ۸، پاسخ‌های قاب سه طبقه را نشان می‌دهد و در شکل ۹، به مقایسه‌ی جابجایی نسبی طبقات قاب نه طبقه پرداخته شده است.



شکل ۸. مقایسه مقادیر جابجایی نسبی طبقات

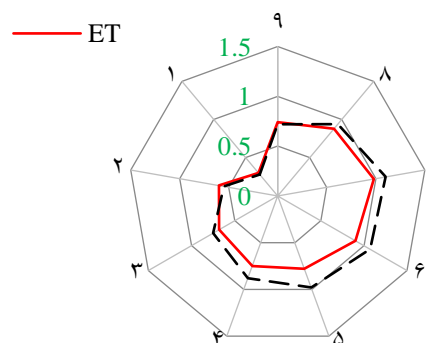
همانطور که در شکل ۸ مشهود است، بیشترین مقدار جابجایی نسبی مربوط به قاب 3T3 و برابر ۱/۶ درصد است. میانگین مقادیر دریافت برای قاب‌های 3T0، 3T1، 3T2 و 3T3 به ترتیب برابر با ۱/۱، ۱/۲، و ۱/۶ درصد می‌باشد. مشاهده مقادیر نشان از اثر عقب نشینی طبقات در پاسخ‌های دینامیکی دارد. در مورد قاب نوع ۳، بیشترین تغییر سختی در قاب‌ها اتفاق افتاده است و در نتایج نیز، تغییر ناگهانی دریافت قابل مشاهده است.

جدول ۱. مشخصات مقاطع قاب طراحی شده

طبقه	اندازه ستون (سانتی‌متر)	میلگرد طولی ستون	اندازه تیر (سانتی‌متر)	میلگرد پایین تیر	میلگرد بالای تیر
۱	۵۵×۵۵	۱۶ میلگرد با قطر ۱۸	۴۰×۵۰	۶ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۲
۲	۵۵×۵۵	۱۶ میلگرد با قطر ۱۶	۴۰×۵۰	۶ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۲
۳	۵۵×۵۵	۱۶ میلگرد با قطر ۱۶	۴۰×۵۰	۶ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۲
۴	۵۵×۵۵	۱۲ میلگرد با قطر ۱۶	۴۰×۵۰	۶ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۲
۵	۵۵×۵۵	۱۲ میلگرد با قطر ۱۶	۴۰×۵۰	۵ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۲
۶	۵۰×۵۰	۱۲ میلگرد با قطر ۱۴	۴۰×۵۰	۴ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۲
۷	۴۵×۴۵	۱۲ میلگرد با قطر ۱۴	۴۰×۴۰	۴ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۲۰
۸	۴۵×۴۵	۱۲ میلگرد با قطر ۱۴	۴۰×۴۰	۳ میلگرد با قطر ۱۸	۶ میلگرد با قطر ۱۸
۹	۴۰×۴۰	۱۲ میلگرد با قطر ۱۴	۴۰×۴۰	۲ میلگرد با قطر ۱۸	۴ میلگرد با قطر ۱۸

۶. تحلیل غیرخطی و مقایسه پاسخ‌ها

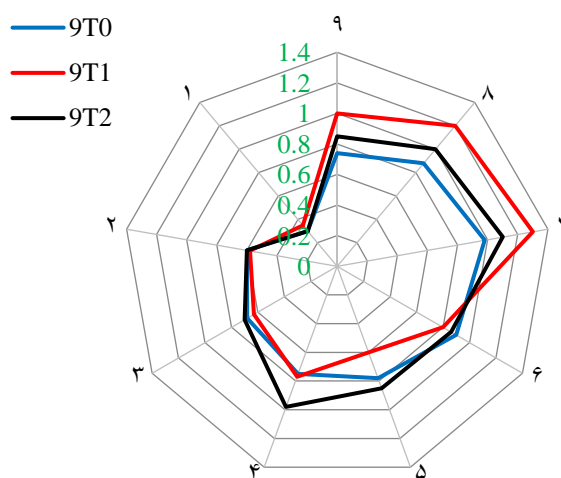
در این بخش، ابتدا برای قاب ۹ طبقه‌ی منظم به مقایسه‌ی نتایج روش زمان دوام (ET) با تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی (NTHA) پرداخته شده که نتایج آن به شرح ذیل ارائه می‌گردد (شکل ۷).



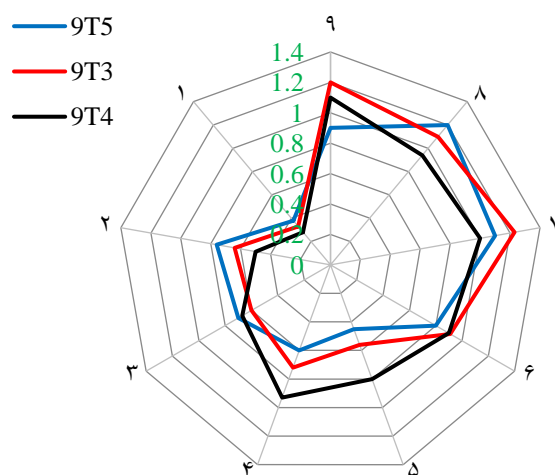
شکل ۷. مقایسه مقادیر جابجایی نسبی طبقات قاب 9T0

تمام مقادیر کمتر از مقدار ۲ درصد که حد ایمنی جانی در این استاندارد است، می‌باشند. با مقایسه قاب‌های نامنظم و حالت منظم، نوسان نتایج در قاب‌های نامنظم کاملاً مشهود است که این موضوع را می‌توان با عقب نشینی‌های ایجاد شده در ارتفاع قاب مرتبط دانست. مقادیر جابجایی نسبی در طبقات پایین به یکدیگر نزدیکتر است اما اختلاف مقادیر در طبقات بالا و میانی بیشتر است. شکل ۹-ب نشان می‌دهد که بیشترین مقدار جابجایی نسبی مربوط به قاب 9T3 و برابر ۱/۲۳ درصد است. میانگین مقادیر دریافت طبقات برای قاب‌های 9T3، 9T4 و 9T5 به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۸ و ۰/۷۶ درصد می‌باشد. در مورد این قاب‌ها نیز، مشاهده مقادیر، نشان از عملکرد مطلوب آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ در محدود نمودن میزان جابجایی نسبی طبقات دارد. نوسان نتایج در قاب‌های نامنظم کاملاً مشهود است که این موضوع را می‌توان با عقب نشینی‌های ایجاد شده در ارتفاع قاب مرتبط دانست. مقادیر جابجایی نسبی در طبقات پایین به یکدیگر نزدیکتر است اما اختلاف در طبقات بالا و میانی بیشتر است.

برای قاب 9T1 عقب نشینی در طبقه‌ی هفتم اتفاق افتاده است که تغییر دریافت از طبقه‌ی ششم به هفتم با افزایش ۶۰ درصدی همراه است. برای قاب 9T2، عقب نشینی در طبقه‌ی چهارم اتفاق افتاده است که تغییر دریافت از طبقه‌ی سوم به چهارم با افزایش ۲۲ درصدی همراه است. برای قاب 9T3، عقب نشینی در طبقه‌ی هفتم و نهم اتفاق افتاده است که تغییر دریافت از طبقه‌ی ششم به هفتم با افزایش ۳۵ درصدی و برای طبقه‌ی هشتم به نهم با افزایش ۱۰ درصدی همراه است. برای قاب 9T4، عقب نشینی در طبقه‌ی چهارم و نهم اتفاق افتاده است که تغییر دریافت از طبقه‌ی سوم به چهارم با افزایش ۴۰ درصدی و برای طبقه‌ی هشتم به نهم با افزایش ۲۰ درصدی همراه است. برای قاب 9T5، عقب نشینی در طبقه‌ی هفتم و هشتم اتفاق افتاده است که تغییر دریافت از طبقه‌ی ششم به هفتم با افزایش ۳۷ درصدی و برای طبقه‌ی هفتم به هشتم با افزایش ۱۰ درصدی همراه است.



(الف)



(ب)

شکل ۹. مقایسه مقادیر جابجایی نسبی طبقات

در شکل ۹، به مقایسه‌ی مقادیر جابجایی نسبی طبقات پرداخته شده است. مقایسه شکل ۹-الف نشان می‌دهد که بیشترین مقدار جابجایی نسبی مربوط به قاب 9T1 و برابر ۱/۳ درصد است. میانگین مقادیر دریافت برای قاب‌های 9T0، 9T1 و 9T2 به ترتیب برابر با ۱/۳، ۱/۱ و ۱/۱ درصد می‌باشند. مشاهده مقادیر نشان از عملکرد مطلوب آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ در طراحی قاب‌ها دارد چراکه

## ۷. نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن مسلح دارای عقب نشینی پرداخته شد. به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، از توابع شتاب سری  $\ln$  مربوط به روش زمان دوام استفاده گردید. با مقایسه‌ی نتایج جابجایی نسبی طبقات برای قاب‌های در نظر گرفته شده، نتایج زیر مشهود است:

- ایجاد عقب نشینی در قاب‌های ساختمانی با تغییر سختی و جرم همراه است که کاملاً بر پاسخ‌های دینامیکی تاثیر گذار است.
- در میان قاب‌های سه طبقه، تیپ سوم، دارای بیشترین جابجایی نسبی می‌باشد.
- نتایج نشان از عملکرد مطلوب آیین نامه‌ی ۲۸۰۰ در محدود نمودن مقادیر جابجایی نسبی دارد چراکه تمام مقادیر کمتر از مقدار ۲ درصد که حد ایمنی جانی می باشد، هستند.
- در میان قاب‌های نه طبقه، بیشترین مقدار جابجایی نسبی مربوط به قاب 9T1 و برابر ۱/۳ درصد است.
- نتایج نشان می‌دهد که اختلاف دریافت در طبقه‌ی ایجاد عقب نشینی و طبقه‌ی زیرین آن نسبتاً زیاد است یا به عبارت دیگر این ناپیوستگی سبب ایجاد پرش در دریافت‌ها می‌شود.

## References

- retrofitting of reinforced concrete buildings with soft-story irregularity." In Structures, vol. 55, pp. 933-950. Elsevier, 2023.
- [4] Sarkar, Pradip, A. Meher Prasad, and Devdas Menon. "Vertical geometric irregularity in stepped building frames." Engineering Structures 32, no. 8 (2010): 2175-2182.
- [5] Habibi1a, Alireza, Meisam Vahed2b, and Keyvan Asadi. "Evaluation of Seismic performance of RC setback frames." Structural Engineering and Mechanics 66, no. 5 (2018): 609-619.
- [6] Puppio, M., Linda Giresini, Fabio Doveri, and Mauro Sassu. "Structural irregularity: The analysis of two reinforced concrete (rc) buildings." Engineering Solid Mechanics 7, no. 1 (2019): 13-34.
- [7] Varadharajan, S., V. K. Sehgal, and Babita Saini. "Determination of inelastic seismic demands of RC moment resisting setback frames." Archives of Civil and Mechanical Engineering 13 (2013): 370-393.
- [8] Tena-Colunga, Arturo. "Conditions of structural irregularity. Relationships with observed earthquake damage in Mexico City in 2017." Soil Dynamics and Earthquake Engineering 143 (2021): 106630.
- [9] Bohlouli, Zohreh, and Mehdi Poursha. "Seismic evaluation of geometrically irregular steel moment resisting frames with setbacks considering their dynamic characteristics." Bulletin of Earthquake Engineering 14 (2016): 2757-2777.
- [10] Habibi, Alireza, Mehdi Izadpanah, and Mohsen Ghasem Fam. "An approximate method for determining the behavior factor of RCMRFs with vertical irregularity." Computers and Concrete 28, no. 3 (2021): 243-258.
- [11] Valamanesh, V., and H. E. Estekanchi. "Nonlinear seismic assessment of steel moment frames under bidirectional loading via Endurance Time method." The Structural Design of Tall and Special Buildings 23, no. 6 (2014): 442-462.
- [12] Valamanesh, V., and H. E. Estekanchi. "Compatibility of the endurance time method with codified seismic analysis approaches on three-dimensional analysis of steel frames." The Structural Design of Tall and Special Buildings 22, no. 2 (2013): 144-164.
- [13] Araújo, Miguel, Luís Macedo, Mário Marques, and José Miguel Castro. "Code-based record selection methods for seismic performance
- [1] Inel, Mehmet, Hayri Baytan Ozmen, and Huseyin Bilgin. "Re-evaluation of building damage during recent earthquakes in Turkey." Engineering Structures 30, no. 2 (2008): 412-427.
- [2] Kim, Sung Jig, and Amr S. Elnashai. "Characterization of shaking intensity distribution and seismic assessment of RC buildings for the Kashmir (Pakistan) earthquake of October 2005." Engineering Structures 31, no. 12 (2009): 2998-3015.
- [3] Izadpanah, Mehdi, Hassan Zibasokhan, Panayiotis C. Roussis, and Panagiotis G. Asteris. "Pure-bending yielding dissipater for the seismic

- assessment of buildings." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 45, no. 1 (2016): 129-148.
- [14] Baker, Jack W., and C. Allin Cornell. "Spectral shape, epsilon and record selection." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 35, no. 9 (2006): 1077-1095.
- [15] Estekanchi, H. E., A. Vafaei, and AZAR M. SADEGH. "Endurance time method for seismic analysis and design of structures." (2004): 361-370.
- [16] Nozari, A., and H. E. Estekanchi. "Optimization of endurance time acceleration functions for seismic assessment of structures." *International Journal of Optimization in Civil Engineering* 1, no. 2 (2011): 257-277.
- [17] Valamanesh, V. (2010). "3D nonlinear seismic analysis of structures by endurance time method", Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
- [18] Federal Emergency Management Agency, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure, FEMA-440.
- [19] Reinhorn, A. M., Roh, H., Sivaselvan, M., Kunnath, S. K., Valles, R. E., Madan, A., ... & Park, Y. J. (2009). A Program for the Inelastic Damage Analysis of Structures.