



## Reliability Analysis of Steel Moment-Resisting Frame Structure under the Light Vehicle Collision

A. Sadeghi, H. Kazemi\* , M. Samadi

Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

**ABSTRACT:** The Impact induced by vehicles collision to external buildings' columns is one of the research scenarios of collision. Therefore, in this study, the reliability analysis of steel moment-resisting frame structure with 2-story has been conducted under the impact of light vehicle collision considering uncertainty in material and applied loads using simulation-based methods. The mentioned structure is modeled in OpenSees software two-dimensionally and the sensitivity analysis of the studied random variables is performed using Monte Carlo simulation-based method in Matlab software. Then, the limit state functions are proposed based on the maximum permitted beam rotation of the damaged bay. Finally, the failure probability and reliability index of the mentioned frame is investigated and compared according to performance levels under the impact of a light vehicle collision with speeds 20, 40, 60, and 80 Km<sup>-1</sup>-h. The results showed that the random variables such as mass and velocity of vehicle and yield strength of material were the most influential in the failure probability and the control variates-based subset simulation method compared to Monte Carlo method estimated the failure probability with a permissible error rate, less sample number, and short running duration..

### Review History:

Received: Jun. 09, 2020

Revised: Jul. 14, 2020

Accepted: Jul. 18 2020

Available Online: Aug. 21, 2020

### Keywords:

Reliability

Steel moment-resisting frame

Light vehicle collision

Simulation-based methods

Sensitivity analysis.

### 1- Introduction

In the last decade, due to the increasing terrorist threats in different parts of the world, much attention has been paid to the design and analysis of resistant structures against abnormal loads. Traditionally, structural engineers designed and analyzed buildings against conventional lateral loads such as earthquake and wind, but in some cases, the study of the nonlinear performance of structures against abnormal loads such as vehicles impact and blasts is also important [1]. With regarding assurance to performance of structures has always been an important principle for engineers and designers, and since complete assurance to the quantity of a potential natural or unnatural accident is not possible, the use of probabilistic analyses, Reliability with the application of various uncertainties such as geometry, materials, applied loads, etc are considered logical [2]. Some researches had been conducted in this field. Park et al. [3] analyzed the sensitivity of a steel moment-resisting frame due to column removal. The Monte Carlo simulation method (MCS) and the first-order second-moment method (FOSM) have been used. The results showed that the random variable of yield strength of beam was the most effective parameter in the design of the frame under the effect of column removal. Kim et al. [4] evaluated the behavior of 3-story steel moment-resisting frame structures under the effect of vehicle impact to the external corner by fragility curves with different

velocities. Santos et al. [5] investigated the failure of common types of beam-column joints of the steel moment-resisting frame subjected to vehicle impact and the results showed that the reduced beam connection (RBS) caused the beam yielding mechanism and had better performance against impact loadings.

In this study, the probabilistic framework is proposed based on the reliability of the steel moment-resisting frame under the effect of a light vehicle impact with different collision velocities (20, 40, 60, and 80 Km<sup>-1</sup>-h) using Monte Carlo simulation (MCS), importance sampling (IS), subset simulation (SS), line sampling (LS), and control variates-based subset simulation (CSS) simulation methods. Then, the accuracy of these methods was measured by the MCS method and finally, an estimation of the probability of failure is obtained.

### 2- Methodology

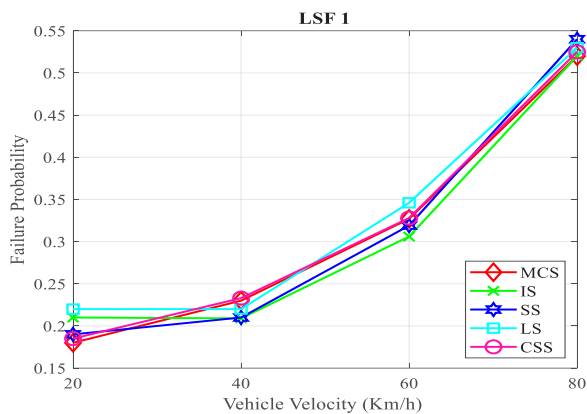
In this study, a 2-story three-dimensional structure with a lateral bearing system of steel moment-resisting frame with intermediate ductility in both longitudinal and transverse directions is considered. This structure is designed based on Iranian design regulations (Codes 6 and 10 of national building regulations [6, 7]) and standard No. 2800, 4<sup>th</sup> Edition [8] on soil type II in a very high-risk zone ( $A = 035 g$ ) with ETABS software [9]. It is designed by the LRFD method. Dead and live loads of stories are applied at 500 and 200

\*Corresponding author's email: kazemi0518@mshdiau.ac.ir



**Table 1. The failure criteria of steel structures subjected to impact loads [4, 12].**

Element	Failure Type	Damage Level Based on Rotation (Rad)		
		Low	Medium	Severe
Beam	Bending	0.05	0.12	0.25



**Fig. 1. The failure probability comparison in different simulation methods for LSF1.**

kg/m<sup>2</sup>, respectively, and the critical criterion in designing the model of the building is drift. By examining the results, the ratio of demand to capacity in all its structural elements was far less than one. The two-dimensional frame of the side axis is extracted and modeled for nonlinear dynamic analysis under impact loads in OpenSees software [10]. Dead and live loads applied to the mentioned frame are 1500 and 600 Kg/m, respectively, and the used steel materials in the beams and columns are ST37 type with the values such as an elasticity modulus 200,000 MPa, yield stress 240 MPa, and ultimate stress 370 MPa are considered. Then, two-line uniaxial steel materials with kinematic and isotropic hardness are assumed based on the Steel01 model with a hardness of 3% [3]. Therefore, the probabilistic analyses are conducted based on reliability by Matlab software [11].

**3- Results and Discussion**

The MCS method was used to calculate the probability of failure. For this purpose, at first, the existing samples in the area of health and failure are identified and then, the limit state functions of the reliability problem are evaluated by performing nonlinear dynamic analyses. In each structural analysis, the random variables are defined based on the selected probabilistic distribution. The studied random variables are classified into 4 categories including gravity loading, steel materials, geometric characteristics, and impact loading due to the light vehicle collision. These variables included: yield strength, Poisson ratio, specific weight, damping ratio and elasticity modulus of the used steel material, the damaged beam length, the damaged

column height, alive, dead, and impact loads.

In the following, the proposed limit state functions (LSFs) are considered based on the maximum permitted beam rotation of the damaged bay according to Table 1 [4, 12]. These limit states and failure criteria related to three damage levels of steel structures subjected to extreme loads are presented as low, medium, and severe damage states.

At first, sensitivity analysis is performed by calling 100,000 times as a limit state function and evaluating the rate of failure probability change versus the changes of each random variable and the results of sensitivity analysis showed that the uncertainty parameters such as vehicle mass, vehicle velocity, yield strength of the sections and the dead load of the frame had the maximum effect and Poisson ratio, specific weight of the sections, and live load of the frame had the minimum effect on the calculation of the failure probability.

Then, the failure probability of the frame using reliability-based simulation methods for LSF1, LSF2, and LSF3 is investigated. Since the vehicle velocity is usually one of the effective random variables on the probability of failure, the collision velocity is considered to be 20, 40, 60, and 80 Km/h. Fig. 1 shows the failure probability of mentioned frame for LSF1. For example, by reducing the vehicle velocity from 60 to 40 Km/h, for the LSF1, the probability of failure is reduced by 29%, and by increasing its velocity from 60 to 80 Km/h, respectively, increased probability of failure by 59%. According to Fig. 1, the results of the failure probability show that when the vehicle velocity reaches 80 Km/h, the maximum failure probability for the limit state function 1, is 0.52. As a result, it is found that the conditions of the studied frame were more critical for the LSF1 than for the other functions. Then the error rate of simulation-based methods versus the MCS method in different velocities of collision for LSF1 is presented based on Fig. 2. The comparison of reliability index for three limit state functions is exhibited in different velocities using the CSS method according to Fig. 3.

**4- Conclusion**

In this study, the steel moment-resisting frame structure with 2-story is modeled in OpenSees software, then, the sensitivity analysis of the desired random variables has been performed by the MCS method. Finally, the limit state functions are presented based on the maximum permitted beam rotation of the damaged bay and the failure probability and reliability index of the frame at different performance levels are calculated due to the light vehicle collision impact with different speeds such as 20, 40, 60, and 80 Km/h. Then, probabilistic evaluation and reliability-based analysis have been performed using various simulation methods such as MCS, IS, SS, LS, and CSS. By reviewing and comparing the results of probabilistic analyses, the new findings are mentioned in the following:

-The results of sensitivity analysis showed that the mass and velocity of the vehicle and the yield strength of the sections had the greatest effect and the Poisson ratio, the

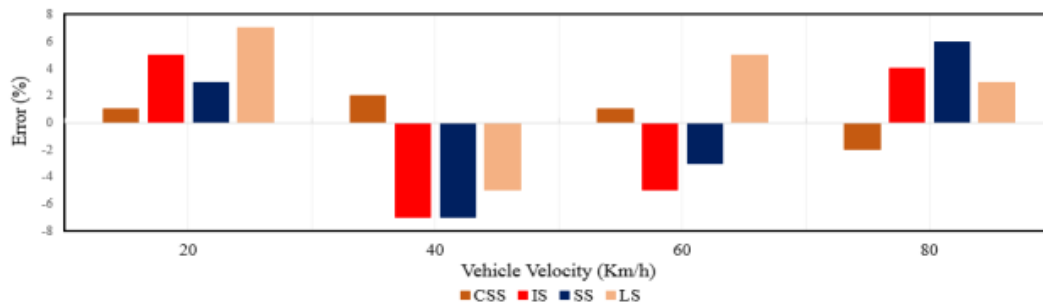


Fig. 2. The error rate of simulation methods versus MCS method in different velocities of collision for LSF1.

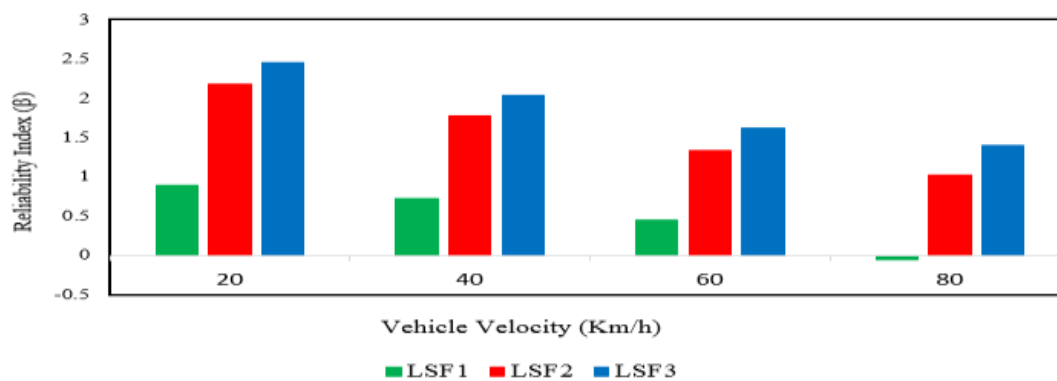


Fig. 3. The comparison of reliability index for 3 limit state functions in different velocities using CSS method.

specific weight of the sections, and the live load of the frame had the least effect on the failure probability.

-The results of the probabilistic evaluation and reliability analysis showed that due to the low failure probability of frame due to vehicle impact, the CSS method with fewer samples and shorter running time estimated accurately compared to the MCS method.

-By calculating the probability of failure under different vehicle collision velocities for the three limit state functions, it is determined that with increasing velocity, the probability of failure increases, and the reliability index decreases.

## References

- [1] K. Mehdizadeh, A. Sadeghi, and S. V. Hashemi, The Performance Investigation of Steel Moment Frames with Knee Braces subjected to Vehicle Collision, *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2019). (In Persian).
- [2] Y.G. Zhao, and T. Ono, Moment methods for structural reliability, *Structural Safety*, 23(1) (2001) 47-75.
- [3] J. Kim, J. Park, and T. Lee, Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss, *Engineering Structures*, 33(2) (2011) 421-432.
- [4] M.M. Javidan, H. Kang, D. Isobe, and J. Kim, Computationally efficient framework for probabilistic collapse analysis of structures under extreme actions, *Engineering Structures*, 17(2) (2018) 440-452.
- [5] A. F. Santos, A. Santiago, M. Latour, and G. Rizzano, Robustness analysis of steel frames subjected to vehicle collisions, *Structures*, 25 (2020) 930-942.
- [6] INBC, Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6, (2013) (In Persian).
- [7] INBC, Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10, (2013) (in Persian).
- [8] BHRC, Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, (2014) (in Persian).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Sadeghi, H. Kazemi, M. Samadi, Reliability Analysis of Steel Moment-Resisting Frame Structure under the Light Vehicle Collision, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 1053-1056.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18565.6901







## تحلیل قابلیت اطمینان سازه ی قاب خمشی فولادی تحت اثر برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک

عباسعلی صادقی، حمید کاظمی\*، میثم صمدی

گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

### کلمات کلیدی:

قابلیت اطمینان  
قاب خمشی فولادی  
برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک  
روش های مبتنی بر شبیه سازی  
تحلیل حساسیت

**خلاصه:** ضربه ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه به ستون های خارجی ساختمان ها، یکی از سناریوهای تحقیقاتی برخورد می باشد. به این منظور، در این تحقیق، تحلیل قابلیت اطمینان سازه ی قاب خمشی فولادی ۲ طبقه تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مصالح و بارهای اعمالی، با استفاده از روش های مبتنی بر شبیه سازی انجام گرفته است. سازه ی مذکور به صورت دو بعدی در نرم افزار OpenSees مدل سازی گردیده و تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی مورد مطالعه با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو به کمک نرم افزار Matlab انجام شده است. سپس توابع شرایط حدی بر مبنای حداکثر دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده ارائه گردیده است. در نهایت، احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان قاب مذکور در سطوح عملکردی مختلف تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک با سرعت های برخورد ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت بررسی و مقایسه شده است. نتایج نشان داد که در سازه ی مورد مطالعه، متغیرهای تصادفی جرم و سرعت وسیله ی نقلیه و مقاومت تسلیم مصالح، تأثیر گذارترین متغیرها در احتمال خرابی بوده و روش شبیه سازی زیرمجموعه ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل نسبت به روش مونت کارلو، با تعداد نمونه ی کمتر و زمان اجرای کوتاه تر، احتمال خرابی را با خطای قابل قبولی تخمین زده است.

### ۱- مقدمه

یکی از مباحثی که در دهه های اخیر توجه پژوهشگران به آن معطوف شده است، پدیده ی فروریزش پیش رونده<sup>۲</sup> می باشد. این رخداد می تواند ناشی از تهدیدات انسان ساز و غیرطبیعی نظیر اقدامات تروریستی، انفجار، آتش سوزی، برخورد وسایل نقلیه ی زمینی و یا هواپیما به ساختمانها باشد. بر اساس تعریف موجود در آئین نامه ها، فروریزش پیش رونده یعنی انتشار یک خرابی موضعی اولیه در یک سازه تا مرحله ای که در نهایت منجر به خرابی کل سازه یا قسمت وسیعی از آن شود. به بیان دیگر، فروریزش پیش رونده، فرآیندی زنجیروار است که در آن، پس از بروز یک خرابی موضعی ناشی از وقوع یک حادثه، بخش بسیار بزرگتر و وسیعتری از سازه، دچار خسارت شده و خرابی اولیه و نهایی، تناسبی با هم ندارند [۳].

بعد از تخریب برج های دو قلوئی مرکز تجارت جهانی در سال ۲۰۰۱، تحقیق در زمینه ی فروریزش پیش رونده و علل آن، افزایش چشمگیری یافته است. به طوری که در سال ۲۰۱۷، میزان مطالعه و بررسی در این زمینه ی پژوهشی به بیش از ۱۲۰ مورد رسیده است. همچنین در دهه ی گذشته،

در نیم قرن اخیر، با توجه به افزایش تهدیدهای تروریستی در نقاط مختلف جهان، توجه زیادی به طراحی و تحلیل سازه های مقاوم در برابر بارهای نامتعارف شده است. به طور سنتی، مهندسان سازه، ساختمانها را در برابر بارهای جانبی متعارف مانند زلزله و باد طراحی و تحلیل میکردند، اما در برخی موارد، بررسی عملکرد غیرخطی سازه ها در برابر بارهای غیرمتعارف مانند ضربه ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه و انفجار نیز حائز اهمیت می باشد [۱]. با توجه به این که اطمینان از عملکرد سازه ها همیشه به عنوان یک اصل مهم برای مهندسان و طراحان مطرح بوده و از آنجا که اطمینان کامل از کمیت یک حادثه ی بالقوه ی طبیعی یا غیرطبیعی قابل حصول نیست، در نتیجه استفاده از تحلیل های مبتنی بر احتمالات، قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> همراه با اعمال عدم قطعیت های مختلف مانند هندسه، مصالح، بارهای اعمالی و غیره منطقی به نظر می رسد [۲].

### 1 Reliability

### 2 Progressive Collapse

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: kazemi0518@mshdiau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



پرداختند و نشان دادند جرم وسیله ی نقلیه، نقش مهمی در میزان خرابی پایه ی پل دارد. جریک و فوگلار<sup>۹</sup> [۱۲]، به بررسی رفتار پایه ی پل بتن مسلح تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد کامیون پرداخته اند. نتایج مدل سازی پایه ی پل تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد کامیون نشان داد که ترکیبهای مختلف آرماتورگذاری پایه ی پل، تأثیر بسزایی بر کاهش خرابی آن داشته است و می تواند عملکرد آن را بهبود بخشد. کیم و کانگ [۱۳]، به بررسی خسارت ستون فولادی تحت اثر ضربه ی کامیون پرداخته اند. آنها نشان دادند که رفتار ستون تحت برخورد وسیله ی نقلیه به صورت عمده به جزئیات اتصال ستون به پی ساختمان بستگی دارد. هادیانفر و همکاران [۱۴]، به بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان ستونهای فولادی H شکل تحت اثر بارگذاری انفجاری پرداخته اند. در این مطالعه، به منظور ارزیابی احتمال خرابی، از روش MCS استفاده شد و نتایج نشان داد که با تغییر تکیه گاه ستونها از مفصلی به گیردار، احتمال خرابی در مد خمشی کاهش یافته است. کیم و همکاران [۱۵]، به ارزیابی احتمالاتی اثر ضربه ی وسیله ی نقلیه به ستون گوشه‌ی طبقه‌ی همکف یک سازه ی قاب خمشی فولادی ۳ طبقه پرداختند و میزان خسارت وارده را با استخراج منحنی های شکست در سرعتهای مختلف وسیله ی نقلیه به دست آوردند. ژائو و همکاران<sup>۱۰</sup> [۱۶]، به بررسی عملکرد پایه های پل بتن مسلح تحت اثر ضربه ی وسیله ی نقلیه ی سنگین پرداختند، آنها با بررسی پاسخهای دینامیکی و مدهای خرابی، خسارات سازه‌های و مالی را تخمین زدند. استوارت<sup>۱۱</sup> [۱۷]، به بررسی قابلیت اطمینان مدل طراحی بر مبنای فاکتور بار تحت اثر بارگذاری انفجاری پرداخته است. در این پژوهش، متغیرهای تصادفی شامل مقدار ماده ی منفجره، فاصله از محل انفجار، زاویه‌ی انفجار و درجه‌ی حرارت آن لحاظ شده است و نتایج نشان داد که مدل طراحی شده‌ی قابلیت اطمینان بر مبنای پارامترهای بار، در پیش بینی خسارت مدل سازه‌های ستونهای بتن مسلح و طراحی سازه‌های آنها در برابر بارگذاری انفجار تأثیرگذار است. سانتوس و همکاران<sup>۱۲</sup> [۱۸]، به بررسی خرابی انواع اتصالات متداول تیر به ستون قاب خمشی فولادی تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه پرداخته و نتایج نشان داد که اتصال تیر کاهش یافته<sup>۱۳</sup> (RBS) باعث مکانیسم تسلیم تیر شده و عملکرد بهتری در برابر ضربه ایفا می کند.

بررسی شواهد و مطالعات نشان می دهد که ضربه ی ناشی از برخورد

ضوابط طراحی در برابر فروریزش پیشرونده نیز در بسیاری از آئین‌نامه‌های طراحی وارد شده است. اخیراً مطالعات آزمایشگاهی و ارتقای نرم افزارهای تحلیلی، این امکان را فراهم آورده تا فرآیند خرابی پیشرونده در سازه ها با دقت بیشتری بررسی گردد [۴ و ۵].

پارک و همکاران<sup>۱</sup> [۶]، به تحلیل حساسیت<sup>۲</sup> قاب خمشی فولادی تحت اثر حذف ستون پرداختند. در این مطالعه، از روش شبیه سازی مونت کارلو<sup>۳</sup> (MCS) و روش لنگر دوم مرتبه ی اول<sup>۴</sup> (FOSM) استفاده شده است. نتایج نشان داد که متغیر تصادفی مقاومت تسلیم تیر تأثیرگذارترین پارامتر در طراحی قاب مذکور تحت اثر حذف ستون بوده است. زینیوفسکی و کراتامر<sup>۵</sup> [۷]، روشی احتمالاتی جهت بررسی پدیده‌ی گسیختگی پیشرونده‌ی ناشی از انفجار را ارائه کردند. در این مطالعه، با فرض توزیع احتمالاتی موقعیت مکانی ساکنین ساختمان، پاسخ سازه در سناریوهای مختلف حذف ستون بررسی شده است. شارما و همکاران<sup>۶</sup> [۸]، در یک مطالعه ی موردی به بررسی عملکرد پایه ی پل بتن مسلح تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد کامیون پرداخته اند. نتایج این تحقیق نشان داد که پایه ی پل موردنظر، مقاومت کافی در برابر بار ضربه ای را دارد و دچار فروریزش کلی نمی شود. توکلی و رشیدی الشتی [۹]، با هدف بررسی رفتار قابهای خمشی فولادی طراحی شده بر اساس آئین‌نامه‌های لرزه‌های، فروریزش پیشرونده را تحت بارگذاری جانبی بررسی کردند. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه های ۵ و ۱۵ طبقه با فرض ایجاد خرابی اولیه در ستونها حاکی از آن بود که مدل‌های سه بعدی حساسیت بیشتری به کاهش مقدار برش پایه و حذف المان‌ها نشان میدهند و سازه ها در مقابل حذف ستون میانی استحکام بیشتری نسبت به حذف ستون گوشه دارند. کیم و کانگ<sup>۷</sup> [۱۰]، به بررسی اثر ضربه ی وسیله ی نقلیه به ستون یک سازه‌ی قاب خمشی فولادی پرداختند و میزان خسارت وارده بر آن را به دست آوردند. نتایج نشان داد وضعیت مدل مورد بررسی با برخورد با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت، پایدار و از سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، مدل مذکور دچار فروریزش پیشرونده می‌گردد.

لی و همکاران<sup>۸</sup> [۱۱]، به بررسی عملکرد پایه ی پل بتن مسلح پیش‌ساخته تحت اثر بارگذاری ضربه ای متناسب با جرم وسیله ی نقلیه

- 1 Park *et al.*
- 2 Sensitivity Analysis
- 3 Monte Carlo Simulation Method
- 4 the First-Order Second Moment Method
- 5 Szyniszewski and Krauthammer
- 6 Sharma *et al.*
- 7 Kim and Kang
- 8 Lee *et al.*

- 9 Jiříček and Foglar
- 10 Zhao *et al.*
- 11 Stewart
- 12 Santos *et al.*
- 13 Reduced Beam Section

وسایل نقلیه به ستونهای خارجی ساختمانها می تواند یکی از عوامل ایجاد فروریزش پیش‌رونده باشد [۱۰، ۱۹ و ۲۰]. لذا از آنجا که در سناریوی ضربه ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه، در نظر گرفتن عدم قطعیت در مصالح و بارهای اعمالی بر عملکرد سازه و امکان رخداد فروریزش پیش‌رونده تأثیرگذار می‌باشند، برای بررسی رفتار سازه‌ها در برابر این نوع بارگذارها با رویکرد احتمالاتی، معمولاً استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> اجتناب‌ناپذیر می باشد [۲۱ و ۲۲].

در این تحقیق، مسأله ی برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک به ستون خارجی ساختمان فولادی به عنوان یک سناریوی تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور برآورد احتمال خرابی، عدم قطعیتها در مصالح و بارهای اعمالی در نظر گرفته شده و از روشهای مبتنی بر شبیه سازی<sup>۲</sup> قابلیت اطمینان به عنوان دقیقترین روشهای ارزیابی، استفاده شده است. در این مسیر، یک سازه ی قاب خمشی فولادی<sup>۳</sup> دو طبقه با شکل پذیری متوسط مطابق آئین‌نامه‌ها، طراحی شده و تحلیل‌های غیرارتجعی به کمک نرم افزار OpenSees ۲.۵.۰ [۲۳] انجام شده است. به منظور کاهش زمان تحلیلها، فرضیات ساده کننده‌های مانند قاب خمشی دو بعدی کوتاه مرتبه در نظر گرفته شده است. تحلیل حساسیت مدل مذکور بر اساس روش MCS و با اعمال عدم قطعیت در مصالح، بارهای ثقیلی و ضربه ای با استفاده از نرم افزار Matlab ۲۰۱۳ [۲۴] انجام گردیده تا متغیرهایی که بیشترین و کمترین تأثیر را در محاسبه ی احتمال خرابی دارند، مشخص گردند. در ادامه، چارچوب احتمالاتی بر مبنای تحلیل قابلیت اطمینان قاب موردنظر، تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک با سرعتهای برخورد مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت) با استفاده از روشهای شبیه سازی مونت کارلو (MCS)، نمونه گیری با اهمیت<sup>۴</sup> (IS)، زیرمجموعه ای<sup>۵</sup> (SS)، نمونه گیری خطی<sup>۶</sup> (LS) و روش شبیه سازی زیرمجموعه ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل<sup>۷</sup> (CSS) انجام شده و سپس دقت این روشها با روش MCS سنجیده و در نهایت، تخمین احتمال خرابی به دست آمده است.

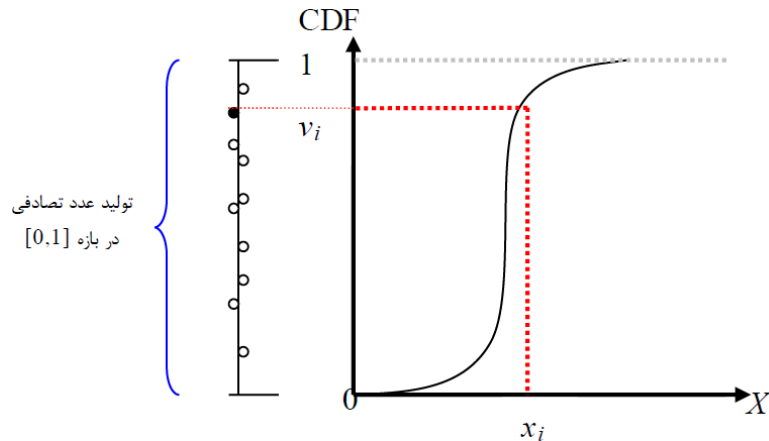
وجود عدم قطعیت در مسائل مهندسی موجب شده تا نیاز به برآورد قابلیت اطمینان و محاسبه ی احتمالاتی خرابی با استفاده از روشهای شبیه سازی، بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. لذا برای رسیدن به تحلیل واقع‌بینانه از عملکرد سازه، می‌بایست اثر عدم قطعیتها در برآورد احتمال خرابی لحاظ گردد. توانایی های فراوان روشهای شبیه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان موجب کاربرد روزافزون آنها در حل مسائل مختلف قابلیت اطمینان سازه ها شده است. در این روشها، دستیابی به دقتی معین مستلزم تعداد قابل توجهی از عملیات شبیه سازی می باشد. با اتخاذ رویکردهای مختلف میتوان با تعداد کمتری از نمونه ها به دقتهای قابل قبولی دست یافت. از آنجایی که توابع شرایط حدی در مسائل مهندسی اغلب شکل صریح یا بسته ندارند و معمولاً غیرخطی می‌باشند، از روشهای مبتنی بر شبیه سازی استفاده میگردد. روشهای مرتبه ی اول قابلیت اطمینان (FORM)<sup>۸</sup> و مرتبه ی دوم قابلیت اطمینان (SORM)<sup>۹</sup> [۲۸ و ۲۹] به دلیل در نظر گرفتن تابع شرایط حدی به صورت خطی علی رغم کاهش مدت زمان، دقت مناسبی در تحلیل سازه های غیرخطی ندارند. در نتیجه، روشهای شبیه سازی نسبت به روشهای تحلیلی از صحت برآورد بالایی در تخمین احتمال خرابی توابع غیرخطی برخوردار بوده و نیاز به محاسبه ی بردار حساسیت بر مبنای گرادیان تابع عملکرد ندارند. اما، این روشها نیازمند برآورد بالایی از تابع عملکرد برای یک تخمین مناسب بوده و نیز حجم داده های شبیه سازی آنها، ممکن است وابسته به نوع مسأله و تعداد متغیرهای

8 the First-Order Reliability Method  
9 the Second-Order Reliability Method

۲- تحلیل قابلیت اطمینان

تئوری قابلیت اطمینان، در طرح سازه ها تحت اثر بارهای مختلف

1 Reliability Analysis  
2 Simulation-Based Methods  
3 Steel Moment-Resisting Frame Structure  
4 Importance Sampling Method  
5 Subset Simulation Method  
6 Line Sampling Method  
7 Control Variates-based Subset Simulation Method



شکل ۱. تولید نمونه در روش MCS بر اساس معکوس تابع توزیع تجمعی احتمال [۳۶]

Fig. 1. Sample generation in MCS method based on inverse cumulative probability distribution function [36]

$$P_f = \int_{g(x) < 0} f_x(x) dx = \int_{\mathbb{I}_{g(x) \leq 0}(x)} f_x(x) dx = \mathbb{E}_f(\mathbb{I}_{g(x) \leq 0}(x)) \quad (1)$$

در رابطه ی (۱)،  $f_X(x)$  تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای  $X$ ،  $g(x)$  تابع عملکردی،  $X$  متغیرهای تصادفی،  $\mathbb{E}_f$  امید ریاضی،  $g(x) \leq 0$  بیانگر مجموعه نمونه های خراب و در نهایت  $\mathbb{I}_{g(x) \leq 0}$  تابع شمارنده می باشد، که به صورت رابطه ی (۲) تعریف می شود:

$$\mathbb{I}_{g(x) \leq 0}(x) = \begin{cases} 0, & x^i \notin (g(x) \leq 0) \\ 1, & x^i \in (g(x) \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

تابع شمارنده که مقدار آن برای نمونه های تولید شده در ناحیه ی خرابی  $g(x) < 0$  برابر یک و برای نمونه های تولید شده در ناحیه ی سلامت  $g(x) > 0$  برابر با صفر در نظر گرفته می شود.

در این روش، متداولترین شیوه ی تولید نمونه، به کارگیری روش معکوس تابع توزیع است که متناسب با تابع چگالی احتمال متغیرها، نمونه های تصادفی را تولید می کند. بر اساس روش معکوس تابع توزیع، چنانچه اعداد دنباله ی احتمالاتی تابع تجمعی احتمال (اعداد بین صفر و یک) با  $\mathcal{U}$  نشان داده شوند، نمونه های متغیر تصادفی  $x$  با تابع چگالی احتمال تجمعی  $F_X(x)$ ، مطابق شکل ۱ و کاربرد رابطه ی (۳) تولید می شوند [۳۶]:

تصادفی باشد [۳۰]. در برآورد احتمال خرابی سازه ها با استفاده از روشهای شبیه سازی، بر اساس تولید نمونه های تصادفی مطابق با نحوه ی توزیع احتمالاتی متغیرهای مسأله، پاسخ سیستم سازه های به ازای هر متغیر تولید شده محاسبه می شود. به عبارت دیگر اگر مقدار تابع شرایط حدی برای آن نمونه مثبت باشد در ناحیه ی سلامت و اگر منفی باشد، در ناحیه ی خرابی قرار می گیرد [۳۱]. لذا همانگونه که ذکر شد، در این تحقیق با عنایت به جذابیت استفاده از تئوری قابلیت اطمینان در بررسی رفتار سازه ی قاب خمشی فولادی دو بعدی تحت اثر ضربه ی برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک از روش شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده و سپس به منظور کاهش زمان تحلیلهای احتمالاتی و افزایش دقت از روشهای شبیه سازی نمونه گیری با اهمیت، زیرمجموعه ای، نمونه گیری خطی و روش شبیه سازی زیرمجموعه ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل با کمک نرم افزارهای قدرتمند OpenS- Matlab و ees بهره برده شده است. در ادامه ی تحقیق حاضر، این روشها به اختصار تشریح می شوند.

## ۲-۱- روش شبیه سازی مونت کارلو (MCS)

روش MCS، یکی از کاربردی ترین روشها در برآورد احتمال خرابی سازه ها به شمار میرود که توسط متروپولیس و یولام [۳۲] ارائه شده است. احتمال خرابی سازه ها  $(P_f)$  بر اساس روش MCS مطابق رابطه ی (۱) ارائه شده است [۳۳، ۳۴ و ۳۵]:



$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ I \left[ (g(V_i) < 0) \right] \frac{f_X(V_i)}{h_V(V_i)} \right\} \quad (5)$$

در رابطه ی (۵)،  $N$  تعداد کل نمونه های شبیه سازی شده می باشد. تابع چگالی احتمال جایگزین  $h_V(x)$  بایستی به گونه ای انتخاب شود که دو شرط اساسی ذیل را ارضا نماید:

(۱) تعداد بیشتری نمونه (نسبت به روش MCS) در ناحیه ی خرابی تولید شود.

(۲) تابع چگالی احتمال جدید تا حد ممکن به تابع اولیه شبیه باشد. بهترین تابع چگالی با اهمیت مطابق رابطه ی (۶) ارائه می شود [۳۹]:

$$h_V(V) = \frac{I \left[ (g(V_i) < 0) \right] f_X(V_i)}{P_f} \quad (6)$$

### ۲-۳- روش شبیه سازی زیرمجموعه ای (SS)

کاربرد روش SS، به دلیل ناکارآمدی روش مونتکارلوی مستقیم، در دست یابی به احتمالات گسیختگی کوچک و تولید نمونه های نادری است که در ناحیه ی گسیختگی قرار دارند. این مسأله منجر به این سؤال اساسی شده است که چگونه می توان از شبیه سازی نمونه های نادر، در محاسبات احتمالات گسیختگی کوچک اجتناب نمود. ایده ی ساده اما اساسی که در شبیه سازی زیرمجموعه ای نهفته است، این است که یک احتمال گسیختگی کوچک، به عنوان زیرمجموعه ای از احتمالات گسیختگی شرطی بزرگتر، در نظر گرفته می شود. بنابراین مسأله ی شبیه سازی شامل رویدادهای نادر، به مسائل شبیه سازی شامل رویدادهای متناوب تر، تبدیل می شود، لذا کاربرد آن در یافتن احتمال خرابی پایین، مشهود است. مقادیر مختلف مثبت بر روی تابع شرایط حدی انتخاب می شود و احتمال خرابی برای هر کدام محاسبه می گردد. این مقادیر مثبت به صورت  $b_1 > b_2 > \dots > b_m = 0$  نمایش داده می شوند. رخدادهای خرابی را میتوان به صورت رابطه ی (۷) بیان نمود:

$$F_k = \{x : g(x) < b_k\}; (k = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

بنابراین اگر  $F$  ناحیه ی گسیختگی باشد آنگاه رابطه ی  $F_1 \supset F_2 \supset \dots \supset F_m$  مجموعه ای نزولی از نواحی گسیختگی هستند،

$$F_X(x_i) = V_i; \quad x_i = F^{-1}(V_i) \quad (3)$$

مراحل تولید نمونه ها به شرح ذیل می باشد [۳۶]:

- تولید اعداد به صورت تصادفی در بازه ی  $\mathcal{G} = [0, 1]$ .
- انتقال مقدار  $\mathcal{G}_i$  به معکوس تابع تجمعی احتمال.
- خواندن مقدار عدد تصادفی تولید شده با استفاده از معکوس تابع تجمعی احتمال در  $\mathcal{G}_i$ .

روش MCS، با وجود آنکه قادر به تخمین مقدار احتمال خرابی با دقت بالاست، اما در ارائه ی محتمل ترین حالت خرابی ناتوان است. علاوه بر آن به کارگیری این روش برای سازه هایی با احتمال خرابی پایین نیازمند صرف وقت و هزینه ی زیادی خواهد بود که از معایب این روش محسوب می شود [۳۷]. برای حل مشکلات فوق، در این تحقیق، روشهای شبیه سازی نمونه گیری با اهمیت، زیرمجموعه ای، نمونه گیری خطی و روش شبیه سازی زیرمجموعه ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل پیشنهاد شده است.

### ۲-۲- روش نمونه گیری با اهمیت (IS)

در روش IS، نمونه برداری در مجاورت نقطه با بیشترین اهمیت (نقطه ی طراحی) و با در نظر گرفتن یک تابع چگالی جدید  $h_V(x)$  به جای تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی  $f_X(x)$  صورت می گیرد. بدین ترتیب، احتمال خرابی در روش IS به صورت رابطه ی (۴) محاسبه می گردد:

$$P_f = \int \dots \int I \left[ g(x) < 0 \right] \frac{f_X(x)}{h_V(x)} h_V(x) dx = E_X \left\{ I \left[ (g(x) < 0) \right] \frac{f_X(x)}{h_V(x)} \right\} \quad (4)$$

در رابطه ی (۴)،  $V$  متغیر تصادفی با تابع چگالی احتمال نمونه برداری با اهمیت  $h_V$ ،  $g(x)$  تابع عملکردی،  $E_X$  امید ریاضی و تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی  $f_X(x)$  می باشد. در نهایت، احتمال خرابی در روش IS با استفاده از رابطه ی (۵) تخمین زده می شود [۳۸]:

مطابق رابطه ی (۱۱)، این بردار معمولاً توسط روشهای گرادیدانی محاسبه می شود؛ اما میتوان در برآورد آن از الگوریتم های بهینه ساز نیز استفاده نمود. بردار یکه ی نظیر آن نیز مطابق با رابطه ی (۱۲) با تقسیم بردار بر اندازه ی آن به دست می آید [۴۲].

$$e_{\infty} = \alpha / \alpha \quad (12)$$

## ۲-۵- روش شبیه سازی زیرمجموعه ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل (CSS)

روش CSS، که برای محاسبه ی مقادیر احتمال خرابی کم مناسب می باشد، با معرفی تابع چگالی احتمال متغیر کنترل، انتگرال اصلی احتمال خرابی بر اساس تکنیک متغیر کنترل بازنویسی می شود. در واقع با استفاده از روشهای شبیه سازی زیرمجموعه ای تعمیم یافته و روش نمونه گیری با اهمیت به همراه تکنیک متغیر کنترل به صورت بهینه به تخمین احتمال خرابی میپردازد. محاسبه ی احتمال خرابی طبق رابطه ی (۱۳) ارائه شده است [۳۴].

$$P_f = P_f |_{\text{subsim}}^{n\sigma} \mathbb{E} \left( \frac{f_X(X_{\text{Failed}})}{k_X(X_{\text{Failed}})} \right) = \left[ \prod_{i=1}^m P_i^{n\sigma} \right] \mathbb{E} \left( \frac{f_X(X_{\text{Failed}})}{k_X(X_{\text{Failed}})} \right) \quad (13)$$

رابطه ی (۱۳) نشان می دهد که تابع  $P_f |_{\text{subsim}}^{n\sigma}$  احتمال خرابی تخمین زده شده توسط روش شبیه سازی زیرمجموعه ای  $(k(X))$  می باشد،  $\mathbb{E}(X)$  امید ریاضی و تابع  $\{x : g(x) < 0\}$   $X_{\text{Failed}}$  نمونه های واقع در ناحیه ی خرابی را بیان می کند [۳۴].

## ۳- روش تحقیق

در این تحقیق، سازه ی ۲ طبقه ی سه بعدی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط در دو جهت طولی و عرضی در نظر گرفته شده است. این سازه بر اساس آییننامه های طراحی ایران (مبحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان [۴۳ و ۴۴]) و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۴۵] بر روی خاک نوع II در پهنه ی خطرپذیری خیلی زیاد ( $A=0/35$ )

به گونه ای که رابطه ی  $F_k = \bigcap_{i=1}^k F_i$  بین رخداد های خرابی حد واسط برقرار باشد. بنا بر نظریه ی مجموعه ها، میتوان احتمال خرابی به دست آمده از روش زیرمجموعه ای را به صورت رابطه ی (۸) ارائه نمود.

$$P_f = P(F_m) = P(F_m | F_{m-1}) \cdot P(F_{m-1}) = \dots = P(F_1) \prod_{i=1}^{m-1} P(F_{i+1} | F_i) \quad (8)$$

رابطه ی (۸) نشان می دهد که به جای محاسبه ی مستقیم احتمال کوچک  $P(F)$ ، می توان احتمال  $P(F_1)$  و  $P(F_{i+1} | F_i)$  را محاسبه نموده و نتایج آنها را مورد بررسی قرار داد. مزیت اصلی این کار، در این مسأله نهفته است که میتوان احتمالات در نظر گرفته شده را بزرگتر از  $P(F)$  فرض نمود و از شبیه سازی رویدادهای نادر اجتناب ورزید. در نهایت رابطه ی (۸) را می توان به صورت ساده شده در قالب رابطه ی (۹) ارائه نمود [۴۰ و ۴۱].

$$P(f) = \prod_{i=1}^{m-1} P_i \quad (9)$$

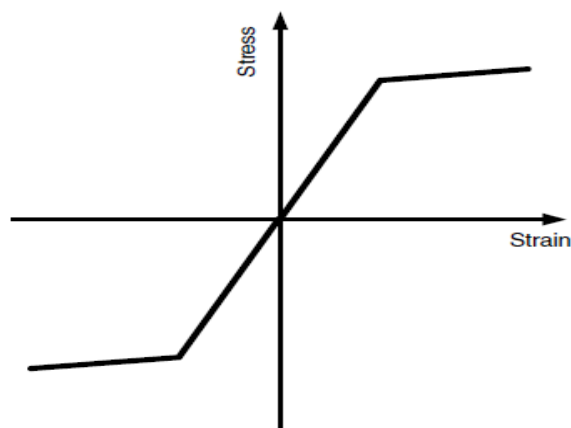
## ۲-۴- روش نمونه گیری خطی (LS)

در روش LS، به جای استفاده از نقاط در تمامی ابعاد مسأله، از خطوط جهت شبیه سازی و تبدیل یک مسأله ی چند بعدی، به یک مسأله ی یک بعدی در فضای حالت استفاده می شود. در تخمین احتمال خرابی توسط این روش در ابتدا بردار جهت مهم  $\alpha$  مطابق رابطه ی (۱۰) به دست می آید:

$$\alpha = \frac{\nabla g_U(u^*)}{\|\nabla g_U(u^*)\|} \quad (10)$$

در رابطه ی (۱۱)،  $\nabla g_U(u^*)$  گرادیدان تابع شرایط حدی نسبت به هر کدام از متغیرهای مسأله می باشد که نشان دهنده ی جهت بردار  $\alpha$  است.

$$\nabla g_U(u^*) = \left[ \frac{\partial g_U(u^*)}{\partial U_1} \quad \frac{\partial g_U(u^*)}{\partial U_2} \quad \dots \quad \frac{\partial g_U(u^*)}{\partial U_n} \right]^T \quad (11)$$



شکل ۲. رفتار هیستریزیس مدل Steel01 در نرم افزار OpenSees [۶]

Fig. 2. The behavior of Steel01 model in OpenSees software [6]

شده است. این المانها به صورت نیرویی و بر پایه ی پلاستیسیته ی گسترده می باشند تا رفتار واقعی المانها را در تحلیل غیرخطی ارزیابی نمایند. جهت برآورد رفتار غیرخطی هندسی از تبدیل همگرد استفاده شده است که در این نوع تبدیل، تبدیلات هندسی غیرخطی را به صورتی کاملاً دقیق از سیستم محلی به سیستم کلی محاسبه کرده است. همچنین اتصالات تیر به ستون و ستون به پی، صلب فرض شده است. سپس عملکرد قاب تحت بارهای ضربه ای ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک و با اعمال اثر  $\Delta-P$  ارزیابی شده است. فلوچارت روش تحقیق مطالعه ی حاضر مطابق شکل ۳ ارائه شده است.

در ادامه، پلان سازهی مذکور و نمای قاب دو بعدی محور کناری در شکل ۴ (الف) و (ب) ارائه و سناریوی ضربه ی برخورد به ستون گوشه مطابق شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱ مقاطع طراحی شده قاب ۲ طبقه را نشان می دهد. در این تحقیق، مقاطع تیرها I شکل (HE) و مقاطع ستونها جعبه ای (BOX) در نظر گرفته شد هاند. به عنوان نمونه، مقطع تیر HE220B و مقطع ستون ۲۰\*۲۰ BOX به ترتیب در شکل ۶ (الف) و (ب) ارائه شده است.

#### ۳-۱- بار ضربه ای ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک

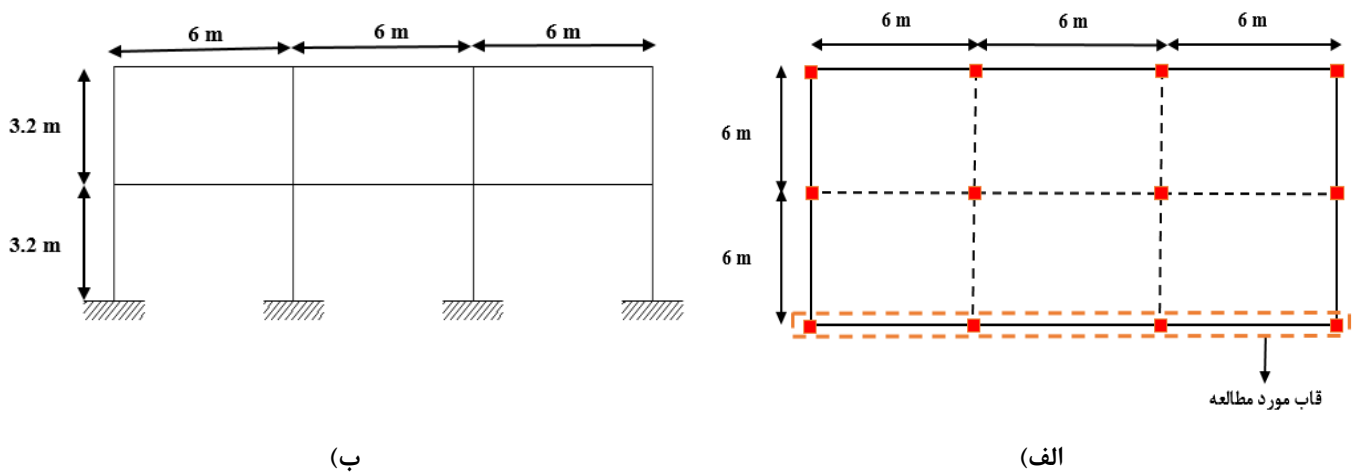
بار ضربه ای، به صورت دینامیکی و با شدت زیاد و طی زمان کوتاهی به سازه اعمال می گردد. از انواع بارهای ضربه ای، بار ناشی از برخورد وسایل نقلیه به ستونهای ساختمانهای فولادی و بتنی و پایه های پل یا ضربه ی ناشی از شروع یا توقف ناگهانی جرثقیل یا آسانسور می باشد. یک نمونهی

در نرم افزار ETABS [۴۶] به روش LRFD، طراحی شده است. بارگذاری ثقلی مرده و زنده ی طبقات به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع اعمال شده اند و معیار بحرانی در طراحی مدل ساختمان موردنظر، کنترل جابه جایی نسبی بوده است، با بررسی نتایج، نسبت تقاضا به ظرفیت در تمامی المانهای سازه ای آن، مقادیری به مراتب کمتر از واحد داشته اند. نسبت میرایی رایلی به صورت  $(\xi = 0.05)$  برای تمام مدهای ارتعاشی سازه لحاظ شده و اثر المانهای غیرسازه ای در نظر گرفته نشده است. کلیه ی ضوابط لرزه ای برای سازه ی مذکور لحاظ شده است. سپس قاب دو بعدی محور کناری استخراج و جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بارهای ضربه ای در نرم افزار OpenSees مدل سازی شده است. بارهای مرده و زنده ی اعمالی به قاب مذکور به ترتیب ۱۵۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر متر لحاظ شده و مصالح به کار رفته در تیرها و ستونها همگی از نوع ST37 با مدول الاستیسیته برابر ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال، در نظر گرفته شده است. مصالح فولادی تک محوری دو خطی با سخت شوندگی سینماتیکی و سختی ایزوتروپیک بر اساس مدل Steel01 مطابق شکل ۲ با میزان سختشدگی ۳ درصد فرض شده اند [۶]. برای المانهای سازه ای از مقطع رشته ای (فایبر) به صورت مدل پلاستیسیته ی گسترده استفاده شده است. در این المانها به جای پلاستیک شدن مصالح در نقاط خاصی از سازه (مانند نقاطی در تیر، که نزدیک ستون است)، پلاستیک شدن مصالح به صورت توزیع یافته در همه ی طول المان در نظر گرفته می شود. از المانهای تیر-ستون غیرخطی نیز در مدلسازی استفاده



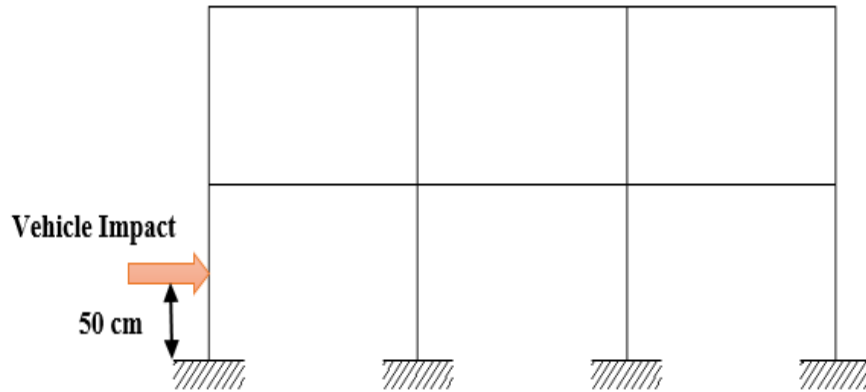
شکل ۳. فلوچارت روش تحقیق مطالعه‌ی حاضر

Fig. 3. The flowchart of present study methodology



شکل ۴. الف) پلان سازه‌ی مورد مطالعه، ب) نمایش قاب محور کناری سازه

Fig. 4. a) The plan of studied structure, b) The side axis frame of structure



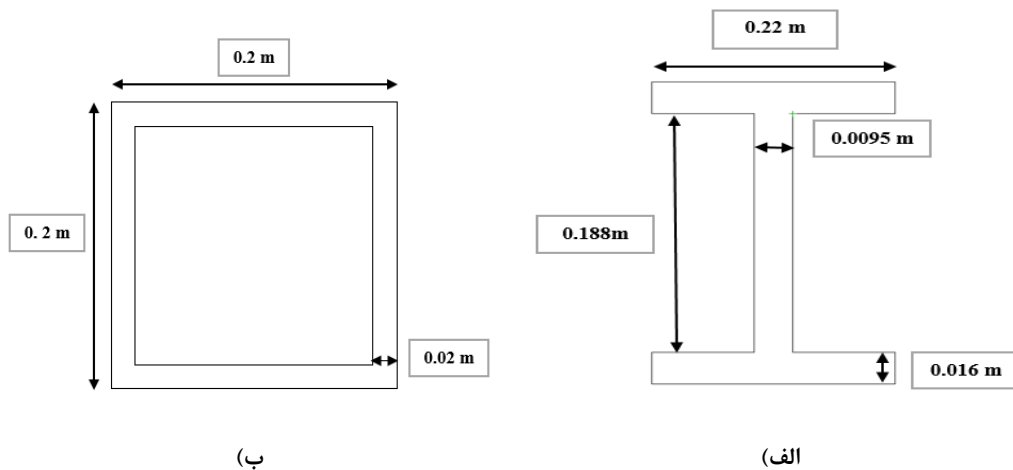
شکل ۵. ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک به ستون گوشه ی قاب مورد مطالعه

Fig. 5. Impact induced by light vehicle collision to corner column of studied frame

جدول ۱. مقاطع قاب ۲ طبقه

Table 1. The sections of studied frame

طبقات	مقطع تیر		مقطع ستون	
	کناری	میانی	کناری	میانی
طبقه ی اول	HE200B	HE220B	BOX200*20	BOX200*20
طبقه ی دوم	HE180B	HE200B	BOX200*18	BOX200*18



شکل ۶. جزئیات مقاطع: الف) مقطع تیر HE220B، ب) مقطع ستون BOX200\*20

Fig. 6. The details of sections: a) Beam section HE220B, b) Column section BOX200\*20



شکل ۷. بار ضربه ای ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه به ستون [۴۷]

Fig. 7. The Impact load induced by light vehicle collision to column [47]

طبیعی و  $\omega_D$ ، فرکانس میرایی می باشد.

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) + \frac{P_0}{k} \quad (16)$$

پاسخ دینامیکی جابه‌جایی ستون ساختمان با در نظر گرفتن نسبت میرایی مختلف تحت اثر بار ضربه ای مستطیلی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک مطابق شکل ۸ ارائه شده است [۴۷].

با توجه به انتخاب وسیله ی نقلیه ی سبک، مطابق مطالعات قبلی، جرم آن یک و نیم تن و برخورد وسیله ی نقلیه در ارتفاع ۵۰ سانتیمتری ستون کناری قاب مورد مطالعه، به ترتیب با سرعت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت فرض شده است [۴۸ و ۴۹]. نیروی ضربه بر حسب سرعت، سختی و جرم وسیله ی نقلیه و مدت زمان ضربه به ترتیب از روابط (۱۷) و (۱۸) به دست آمده و در جدول ۲، نیز نیروی ضربه ی اعمالی به ستون، ارائه شده است [۴۸ و ۵۰]:

$$F = V\sqrt{km} \quad (17)$$

$$\Delta t = \frac{m \cdot v}{F} \quad (18)$$

ساده از بارهای ضربه ای در شکل ۷ نشان داده شده است. روابط (۱۴) و (۱۵)، معادلات حرکت سازه ی یک درجه آزادی را تحت اثر بار ضربه ای ارائه می دهند [۴۷].

الف) از زمان  $t_0$  تا  $t_1$  (نوسان اجباری):

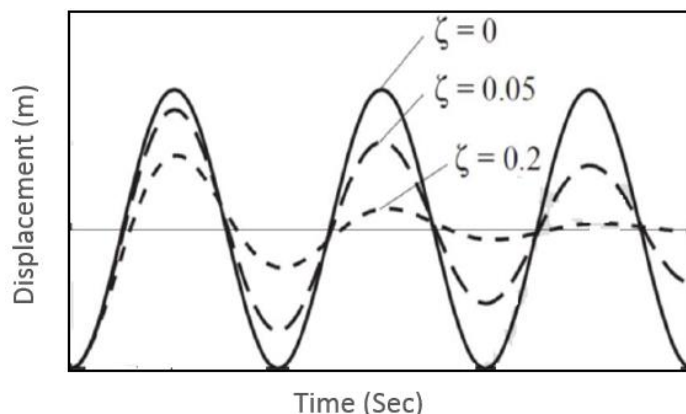
در روابط (۱۴) و (۱۵)، پارامترها  $P_0$ ، بار ضربه ای،  $k$ ، سختی سازه،  $\omega$ ، فرکانس زاویه ای،  $u_0$ ، جابه‌جایی اولیه،  $u'_0$ ، سرعت اولیه ی سازه و  $(t - t_1)$ ، مدت زمان ضربه می باشد [۴۷].

$$u(t) = \frac{P_0}{k} - \frac{P_0}{k} \cos \omega t \quad (14)$$

ب)  $t > t_1$  (نوسان آزاد):

$$u(t) = \frac{u'_0}{\omega} \cos \omega(t - t_1) + u_0 \sin \omega(t - t_1), \Delta t = t - t_1 \quad (15)$$

در رابطه ی (۱۶)، پاسخ تحلیل دینامیکی سازه تحت اثر بار ضربه ای در حالت میرا ارائه شده است. پارامترهای  $\xi$ ، نسبت میرایی،  $\omega_n$ ، فرکانس



شکل ۸. پاسخ دینامیکی جابه‌جایی ستون تحت اثر ضربه [۴۷]

Fig. 8. The dynamic response of column displacement subjected to impact [47]

جدول ۲. نیروی ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سبک

Table 2. The impact force of light vehicle collision

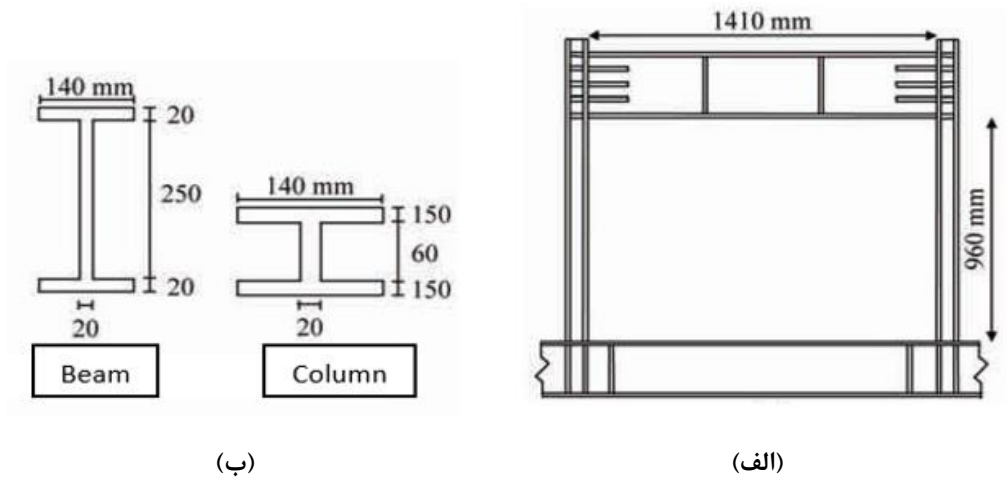
سرعت وسیله‌ی نقلیه (Km/h)	نیروی ضربه (N)
۲۰	۱۱۷۸۵۱
۴۰	۲۳۵۷۰۲
۶۰	۳۵۳۵۵۳
۸۰	۴۷۱۴۰۴

### ۳-۲-۱- راستی‌آزمایی مدل‌سازی تحت بار چرخهای

در این تحقیق، به منظور اطمینان از مدل‌سازی و نتایج تحلیل، مطابق شکل ۹ (الف) و (ب)، نمونه‌ی آزمایشگاهی قاب خمشی فولادی از مطالعه صبوری و اسعد سجادی در نظر گرفته شده است [۵۱]. بارگذاری چرخهای مطابق الگوی استاندارد ATC-۲۴ [۵۲] اعمال شده است. مطابق شکل ۱۰، مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی، نشان از صحت نحوه‌ی مدل‌سازی بوده به طوری که حداکثر اختلاف نتایج به ۲ درصد محدود می‌باشد. حداکثر جابه‌جایی جانبی قاب خمشی تحت اثر بار چرخه‌ی ای در حالت آزمایشگاهی ۶۳/۱۸ میلی‌متر و در حالت تحلیلی ۶۴/۴۷ میلی‌متر می‌باشد.

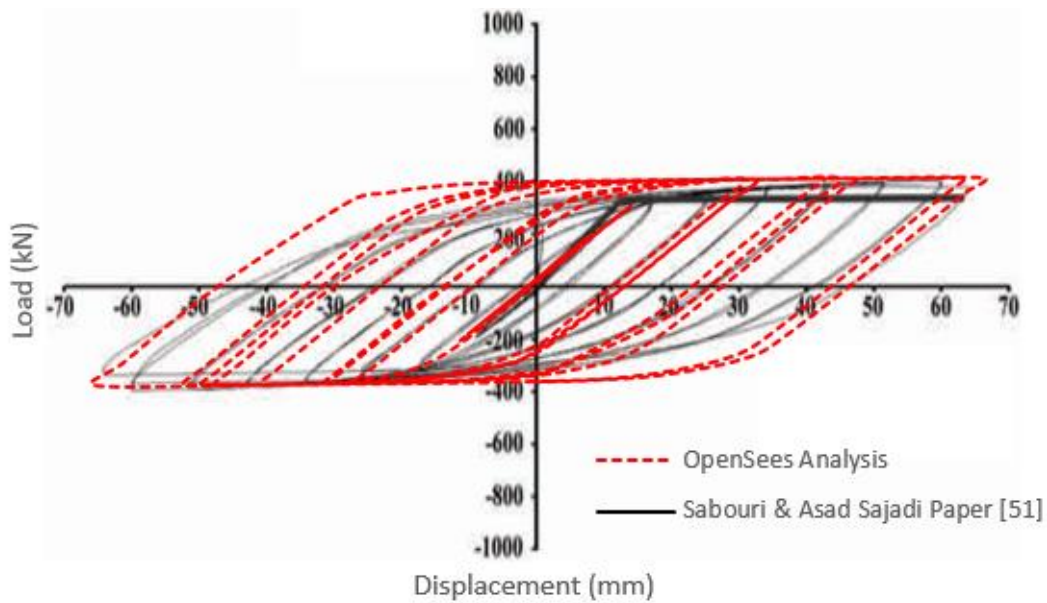
### ۳-۲- راستی‌آزمایی مدل‌سازی

در این تحقیق، به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی در نرم افزار OpenSees و همچنین درستی داده‌های ورودی به برنامه، دو صحت‌سنجی قاب خمشی فولادی در نرم افزار مذکور تحت اثر بارهای چرخهای و ضربه‌ای بر اساس مراجع معتبر داخلی [۵۱] و خارجی [۱۳] به شرح ذیل ارائه شده و دقت آنها راستی‌آزمایی گردیده است. ضمناً در تحقیق حاضر، ابتدا تحلیل مودال قاب دو بعدی مورد مطالعه در نرم افزارهای ETABS و OpenSees انجام شده و با بررسی نتایج، اختلاف زمان تناوب مدهای ارتعاشی مدل مذکور در دو نرم افزار ناچیز بوده است.



شکل ۹. الف) پیکربندی نمونه ی آزمایشگاهی قاب خمشی فولادی صبوری و اسعد سجادی، ب) جزئیات مقاطع تیر و ستون [۵۱]

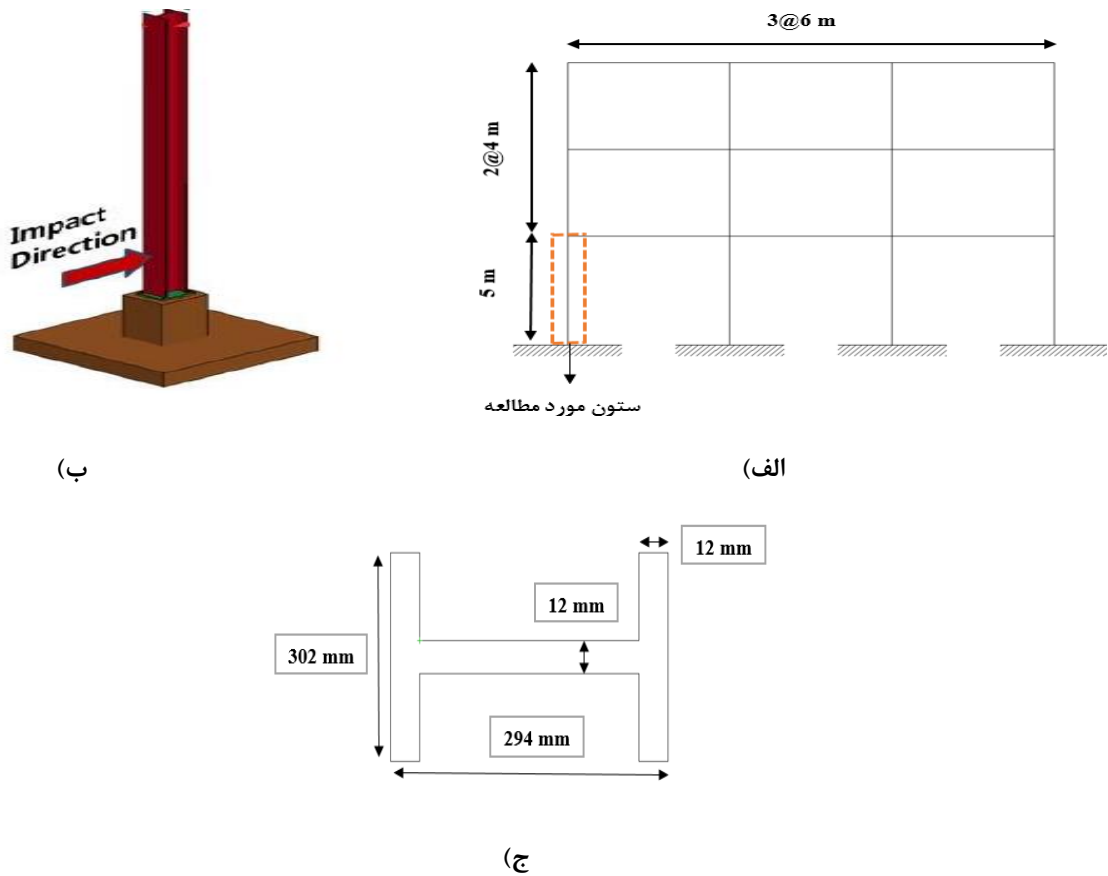
Fig. 9. a) The configuration of experimental model of moment-resisting frame of Sabouri and Asad Sajadi, b) The details of beam and column sections



شکل ۱۰. مقایسه ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی

Fig. 10. The Comparison of analytical and experimental results





شکل ۱۱. الف) سازه ی مدل کیم و کانگ، ب) نمای شماتیک برخورد، ج) مقطع ستون [۱۳]

Fig. 11. a) The structure of Kim and Kang model, b) The schematic view of collision, c) Column section [13]

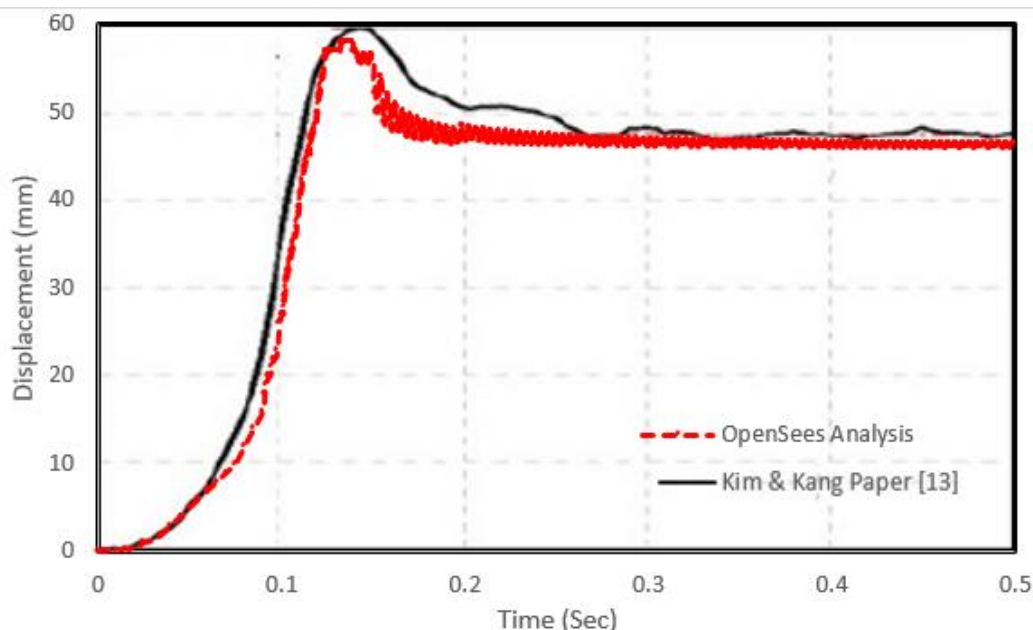
۳-۲-۲- راستی آزمایی بار ضربه ای

جهت صحت سنجی مدل بار ضربه ای از تحقیق کیم و کانگ

[۱۳] استفاده شده است. سازه ی سه طبقه ی سه دهانه مطابق شکل ۱۱ (الف) بوده و ستون فولادی گوشه ی طبقه ی اول مطابق شکل ۱۱ (ب) و (ج) تحت بار ضربه ای ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ای به وزن ۸ تن و سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت قرار گرفته است. همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود منحنی جابه جایی-زمان مدل تهیه شده و مدل مرجع [۱۳]، مطابقت نسبتاً خوبی با یکدیگر داشته و اختلاف نتایج حداکثر ۵ درصد می باشند. حداکثر جابه جایی ستون تحت اثر بار ضربه ای در حالت آزمایشگاهی ۵۹/۹ میلی متر و در حالت تحلیلی ۵۷/۳ میلی متر می باشد.

۳-۳- معرفی تابع شرایط حدی

همانگونه که ذکر شد، برای محاسبه ی احتمال خرابی، از روش MCS استفاده شده است. بدین منظور ابتدا نمونه های موجود در ناحیه ی سلامت و خرابی مشخص شده و با انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی، تابع شرایط حدی مسأله ی قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در هر بار تحلیل سازه ای، متغیرهای تصادفی تعریف شده بر اساس توزیع انتخابی، مقادیری را به خود اختصاص می دهند. متغیرهای تصادفی مورد مطالعه در ۴ گروه شامل بار ثقیلی، مشخصات فولاد مورد استفاده، مشخصات هندسی و بار ضربه ای ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک طبقه بندی شده اند. این متغیرها شامل: مقاومت تسلیم، نسبت پواسون، وزن مخصوص، نسبت



شکل ۱۲. مقایسه ی نمودار جابه‌جایی-زمان مدل تحلیلی و مدل مرجع

Fig. 12. The comparison of displacement-time diagram related to analytical and reference model

کم، متوسط و شدید ارائه گردیده است.

$$LSF_1 = 0.05 - (\max(\text{Beam Rotation})) \quad (19)$$

$$LSF_2 = 0.12 - (\max(\text{Beam Rotation})) \quad (20)$$

$$LSF_3 = 0.25 - (\max(\text{Beam Rotation})) \quad (21)$$

پارامتر  $\max(\text{Beam Rotation})$  در روابط (۱۹) تا (۲۱) بیانگر حداکثر دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده در تحلیل غیرخطی در هر سطح خرابی (متناسب با توابع شرایط حدی مرتبط) می باشد. چنانچه پس از انجام تحلیل  $LSF > 0$  شود، نمونه در ناحیه ی سلامت و چنانچه  $LSF \leq 0$  گردد، نمونه در ناحیه ی خرابی قرار می گیرد.

میرایی و مدول الاستیسیته مصالح، طول تیر دهانه ی برخورد، ارتفاع ستون مورد برخورد، بارهای زنده، مرده و ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک می باشند. ضمناً در این تحقیق، دوران پلاستیک به عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته نشده است. از یک سو شاخصهای عملکردی سازه برای امکان نتیجه گیری منطقی، ثابت فرض شده اند تا مقایسه ی پارامترهای خصوصیات احتمالاتی میسر باشد و از سوی دیگر به طور معمول این شاخص ها مبتنی بر سطوح عملکردی مرتبط با سطوح خسارت، مقادیری مشخص هستند که در آئین نامه ها و مراجع فنی تعریف شده اند. در جدول ۳، متغیرهای تصادفی و مشخصات آماری آنها شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و شکل تابع توزیع چگالی احتمال در قاب خمشی فولادی موردنظر تحت بار ضربه ای ارائه شده است.

در ادامه، تابع شرایط حدی پیشنهادی ( $LSF$ ) بر مبنای معیار حداکثر دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده مطابق جدول ۴ و روابط (۱۹) تا (۲۱) در نظر گرفته شده است [۱۵ و ۵۷]. این حالات حدی و معیار خرابی مرتبط با ۳ سطح خسارت سازه های فولادی تحت اثر بارهای ناگهانی<sup>۱</sup> به صورت

1 Extreme Loads

جدول ۳. متغیرهای تصادفی در مدل قاب خمشی فولادی تحت اثر بارهای ضربه ای

Table 3. The random variables in the steel moment-resisting frame model subjected to impact loads

گروه	نماد متغیر	تعریف متغیر	واحد	توزیع * احتمالاتی	میانگین	انحراف معیار یا ضریب تغییرات	مرجع
بار ثقلی	$DL$	بار مرده	kg/m	$N$	۱۵۰۰	۰/۱	[۵۳ و ۱۵]
	$LL$	بار زنده	kg/m	$G$	۶۰۰	۰/۴	[۵۳ و ۱۵]
مشخصات فولاد	$F_y$	مقاومت تسلیم	MPa	$LN$	۲۴۰	۰/۰۷	[۵۴ و ۱۵]
	$E$	مدول الاستیسیته	MPa	$LN$	$۲*۱۰^۵$	۰/۰۳	[۵۶ و ۵۵]
	$\xi$	نسبت میرایی	-	$LN$	٪۵	۴۰	[۶]
	$\rho$	وزن مخصوص	kg/m <sup>3</sup>	$LN$	۷۸۹۰	۰/۱	[۵۶]
	$g$	نسبت پواسون	-	$LN$	۰/۳	۰/۱	[۵۶]
مشخصات هندسی	$L$	طول تیر	m	$N$	۶	۰/۰۳۰۴	[۵۵ و ۵۴]
	$H$	ارتفاع ستون	m	$N$	۳/۲	۰/۰۳۰۴	[۵۵ و ۵۴]
بار ضربه ای (وسیله نقلیه)	$K$	سختی	kN/m	$LN$	۳۰۰	۶۰ (kN/m)	[۵۴ و ۴۸]
	$M$	جرم	kg	$N$	۱۵۰۰	۴۰۰ (kg)	[۵۴ و ۴۸]
	$V$	سرعت	km/h	$LN$	۸۰	۱۰ (km/h)	[۵۴ و ۴۸]

\* N: Normal, LN: Lognormal, G: Gamma

جدول ۴. معیار خرابی سازه های فولادی تحت اثر بارهای ضربه ای [۱۵ و ۵۷]

Table 4. The failure criteria of steel structures subjected to impact loads

عضو سازه ای	نوع خرابی	میزان خسارت بر حسب دوران (Rad)		
		کم	متوسط	شدید
تیر	خمشی	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۲۵

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت مدل قاب خمشی فولادی تحت اثر بارهای ضربه ای

Table 5. The sensitivity analysis results of steel moment-resisting frame model subjected to impact loads

ردیف	تغییر احتمال خرابی به ازای تغییر هر متغیر	
۱	$(\partial P_f)(\partial DL)$	۰/۰۰۸۶۱۴۶
۲	$(\partial P_f)(\partial LL)$	۰/۰۰۰۰۶۴۶۸۹
۳	$(\partial P_f)(\partial F_y)$	-۰/۰۳۲۳۰۹
۴	$(\partial P_f)(\partial E)$	۰/۰۰۰۰۹۰۰۲۲
۵	$(\partial P_f)(\partial \xi)$	-۰/۰۰۰۰۷۵۷۵۱
۶	$(\partial P_f)(\partial \rho)$	-۰/۰۰۰۰۶۶۵۶
۷	$(\partial P_f)(\partial \theta)$	۰/۰۰۰۰۳۷۶۱۵
۸	$(\partial P_f)(\partial L)$	۰/۰۰۰۲۱۰۶۱
۹	$(\partial P_f)(\partial H)$	۰/۰۰۰۶۶۰۰۴
۱۰	$(\partial P_f)(\partial K)$	۰/۰۰۰۹۳۰۴۱
۱۱	$(\partial P_f)(\partial M)$	۰/۵۷۰۲۶
۱۲	$(\partial P_f)(\partial V)$	۰/۴۷۵۲۱

$$\frac{\partial P_f}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \int I [g(x) < 0] f_{x(p)}(x) dx \quad (22)$$

در رابطه ی (۲۲)، احتمال خرابی،  $(P_f)$  متغیر تصادفی،  $(g(x))$  تابع شرایط حدی،  $(f_x)$  تابع چگالی احتمال توأم متغیرها و  $(I)$  بردار شمارنده می‌باشند.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- ارزیابی نتایج تحلیل حساسیت

در این قسمت، تحلیل حساسیت با ۱۰۰۰۰۰ بار فراخوانی تابع شرایط حدی و با ارزیابی نرخ تغییرات احتمال خرابی نسبت به تغییرات هر متغیر تصادفی انجام شده و نتایج تحلیل حساسیت نیز در جدول ۵ ارائه شده است. می‌توان دریافت که برای سازهی موردنظر تحت بار ضربه ای، پارامترهای

##### ۳-۴- تحلیل حساسیت مبتنی بر شبیه سازی متغیرهای تصادفی

بررسی حساسیت احتمال خرابی به متغیرهای تصادفی، از نکات کلیدی و مهم در ساده سازی و طراحی بهینه بخصوص در مسائل با تعداد متغیرهای تصادفی زیاد می باشد. عموماً در مباحث طراحی بر اساس قابلیت اطمینان، گام اول یافتن اهمیت هر یک از متغیرها در مسأله و تأثیر آن بر احتمال خرابی سازه می باشد. چنانچه تأثیر متغیر تصادفی بر احتمال خرابی جزء سازه‌های ناچیز باشد، جهت ساده سازی و کاهش ابعاد مسأله می‌توان آن متغیر را به صورت قطعی حذف نمود و مسأله را ساده‌تر نمود [۵۸ و ۵۹]. در روش MCS، تحلیل حساسیت اغلب با ارزیابی نرخ تغییر احتمال خرابی به تغییرات هر متغیر تصادفی انجام می شود [۶۰]. با استفاده از این روش، نرخ تغییرات را می‌توان با یک‌بار شبیه سازی (که برای برآورد احتمال خرابی انجام می پذیرد) به صورت رابطه ی (۲۲) محاسبه نمود.

اثر برخوردی با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت می باشد.

در این قسمت، به بررسی احتمال خرابی قاب مورد نظر با استفاده از روشهای شبیه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان برای توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  پرداخته شده است. از آنجایی که معمولاً سرعت وسیله ی نقلیه جزء متغیرهای تصادفی مؤثر بر احتمال خرابی می باشد، سرعت برخورد با مقادیر ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده و در شکل ۱۳ (الف)، (ب) و (ج) برای توابع شرایط حدی مختلف رسم شده است، بطور نمونه، با کاهش سرعت وسیله ی نقلیه از ۶۰ به ۴۰ کیلومتر بر ساعت، برای توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$ ، به ترتیب احتمال خرابی ۲۹، ۵۹ و ۶۱ درصد کاهش و با افزایش سرعت آن از ۶۰ به ۸۰ کیلومتر بر ساعت، به ترتیب، احتمال خرابی ۵۹، ۵۷ و ۵۴ درصد افزایش را نشان می دهد. مطابق شکل ۱۳، نتایج احتمال خرابی نشان می دهد، هنگامی که سرعت وسیله ی نقلیه به ۸۰ کیلومتر بر ساعت می رسد، بیشینه ی احتمال خرابی برای توابع شرایط حدی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر  $۰/۱۴۵$ ،  $۰/۰۸$  و  $۰/۰۸$  می باشد. در نتیجه مشخص می شود که وضعیت سازه ی مورد مطالعه برای تابع  $LSF_1$  نسبت به سایر توابع بحرانی تر بوده است.

در ادامه، درصد خطای احتمال خرابی روشهای شبیه سازی مورد مطالعه در این تحقیق نسبت به روش MCS که کاربردی ترین و دقیق ترین روش شبیه سازی می باشد، بر اساس داده های شکل ۱۳ به دست آمده است. مطابق شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ برای سه تابع شرایط حدی  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$ ، درصد خطای احتمال خرابی روشهای مختلف شبیه سازی نسبت به روش MCS ارائه شده و مشخص است که روش CSS کمترین درصد خطای احتمال خرابی را در کلیه ی توابع شرایط حدی تحت سرعتهای مختلف برخورد دارا می باشد.

در این گام، به مقایسه ی شاخص قابلیت اطمینان روش CSS، برای سه تابع شرایط حدی پرداخته شده است. شکل ۱۷ نشان می دهد، به طور مثال در سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت در سطوح خرابی کم، متوسط و زیاد به ترتیب شاخص قابلیت اطمینان معادل  $۰/۷۲۹$ ،  $۱/۷۸$  و  $۲/۰۳۳$  می باشد. به عبارت دیگر با تغییر دوران مجاز تیر از  $۰/۲۵$  به  $۰/۱۲$  و  $۰/۰۵$ ، شاخص قابلیت اطمینان به ترتیب  $۱۲/۴$  و  $۶۴/۱$  درصد کاهش داشته است و با افزایش سرعت مقدار شاخص قابلیت اطمینان نیز کاهش می یابد.

در این بخش، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده از  $۰/۰۵$  تا  $۰/۲۵$  رادیان در تابع شرایط حدی، احتمال خرابی تحت برخورد با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت به دست آمده و در شکل

دارای عدم قطعیت جرم و سرعت وسیله ی نقلیه و مقاومت تسلیم مقاطع و بار ثقلی مرده ی قاب بیشترین اثر و نسبت پواسون، وزن مخصوص مقاطع و بار ثقلی زنده ی قاب کمترین اثر را بر محاسبه ی احتمال خرابی داشته اند.

#### ۴-۲- ارزیابی نتایج قابلیت اطمینان

حال با استفاده از روشهای مبتنی بر شبیه سازی، به ارزیابی احتمالاتی و تحلیل قابلیت اطمینان مدل موردنظر تحت اثر ضربه ی وسیله ی نقلیه با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت پرداخته می شود. در ادامه، احتمال خرابی ( $P_f$ ) بر اساس روشهای مبتنی بر شبیه سازی مورد مطالعه محاسبه و بر اساس مراجع پورامینیان و همکاران [۶۱ و ۶۲]، شاخص قابلیت اطمینان ( $\beta$ ) نیز مطابق با رابطه ی (۲۳) ارائه شده است. در این رابطه، احتمال خرابی و  $\phi^{-1}$  معکوس تابع توزیع تجمعی استاندارد نرمال می باشد. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن پارامترهای دارای عدم قطعیت در جدول ۶ و برای سه تابع شرایط حدی  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  انجام گرفته است.

$$\beta = -\phi^{-1}(P_f) \quad (23)$$

در ادامه برای کفایت تعداد فراخوانی در روش MCS، به عنوان نمونه، برای تابع شرایط حدی  $LSF_3$ ، ابتدا از تعداد ۱۰۰ نمونه و سپس از تعداد ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰۰ نمونه استفاده شده و احتمال خرابی به ترتیب  $۰/۰۰۸$ ،  $۰/۰۲۴۳$ ،  $۰/۰۵۲۰$  و  $۰/۰۵۲۱$  بدست آمده است. با بررسی نتایج مشاهده می گردد، با تعداد فراخوانی ۱۰۰۰۰۰ نمونه ی شبیه سازی، پاسخ بدست آمده برای احتمال خرابی همگرا می شود و ملاک مقایسه با سایر روش‌های شبیه سازی مورد مطالعه در این تحقیق قرار گرفته است.

در تحقیق حاضر، به دلیل تعداد زیاد متغیرهای تصادفی تولیدشده در روش MCS و همچنین صرف زمان و هزینه ی زیاد جهت انجام تحلیل های غیرخطی و محاسبه ی تابع شرایط حدی، از روشهای شبیه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان که با تعداد نمونه ی کمتر جواب قابل قبولی را ارائه می دهند، استفاده شده است. همان طور که در جدول ۶ مشاهده می شود، نتایج روش CSS با ۹۰۰ بار فراخوانی تابع شرایط حدی، دارای دقت قابل قبولی نسبت به روش MCS می باشد و عملکرد آن با هر سه تابع شرایط حدی بهتر از روشهای دیگر می باشد. مطابق جدول ۶، روش CSS با کاهش زمان اجرای تحلیلیها دارای دقت مناسبی نسبت به روش MCS در محاسبه ی احتمال خرابی قاب مذکور در کلیه ی توابع شرایط حدی تحت

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت مدل قاب خمشی فولادی تحت اثر بارهای ضربه ای

Table 6. The sensitivity analysis results of steel moment-resisting frame model subjected to impact loads

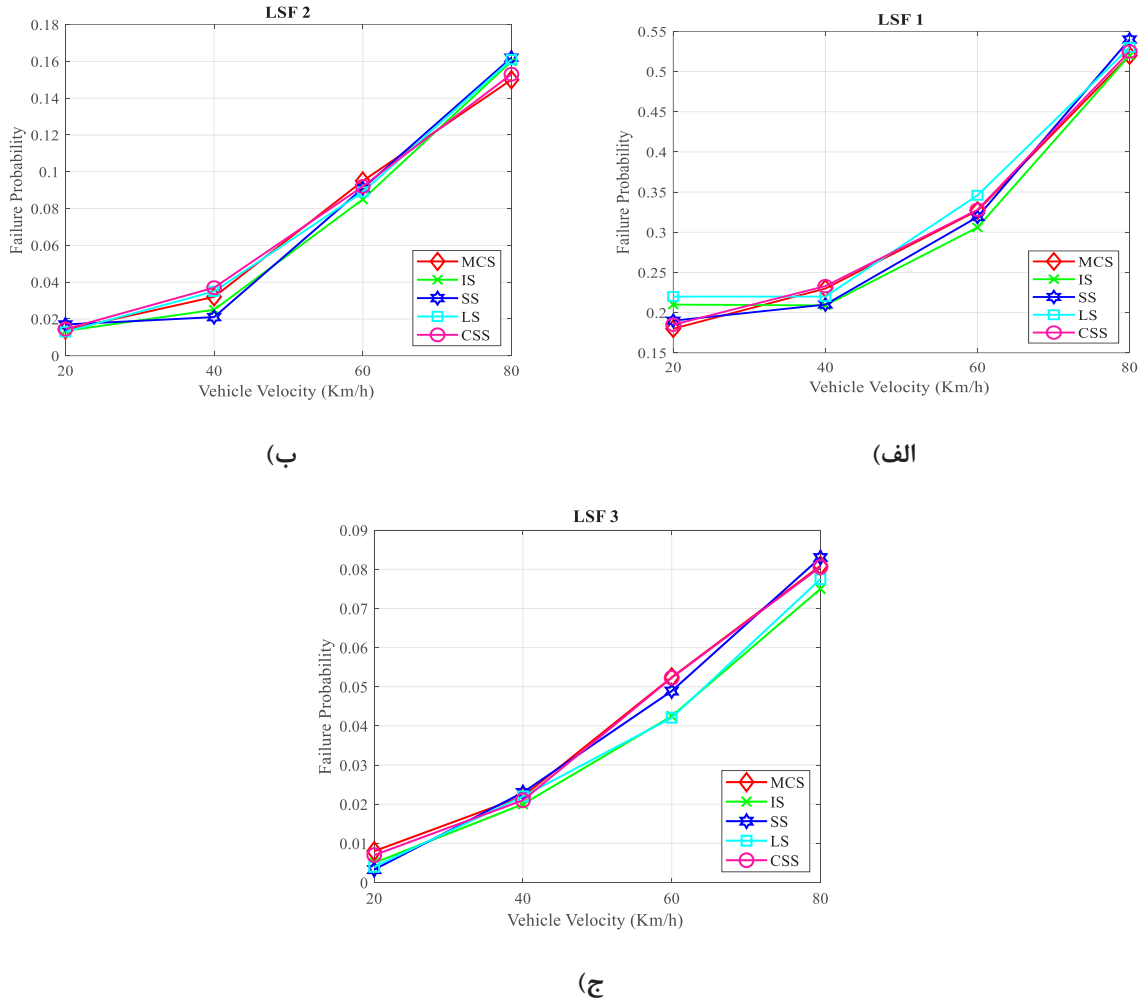
روش شبیه‌سازی	MCS	IS	SS	LS	CSS
<b>LSF<sub>1</sub></b>					
$\beta$	۰/۴۴۸	۰/۵۰۷	۰/۴۷۰	۰/۳۹۶	۰/۴۴۵
$P_f$	۰/۳۲۷	۰/۳۰۶	۰/۳۱۸	۰/۳۴۶	۰/۳۲۸
تعداد فراخوانی	۱۰ <sup>۵</sup>	۱۵۰۰	۱۴۰۰۰	۳۱۰۰	۹۰۰
زمان محاسبه (s)	۱۷۳۰۰۰۰	۲۵۹۵۰	۲۴۲۲۰۰	۵۳۶۳۰	۱۵۵۷۰
<b>LSF<sub>2</sub></b>					
$\beta$	۱/۳۱۰	۱/۳۷۲	۱/۳۳۴	۱/۳۴۶	۱/۳۲۸
$P_f$	۰/۰۹۵	۰/۰۸۵	۰/۰۹۱	۰/۰۸۹	۰/۰۹۲
تعداد فراخوانی	۱۰ <sup>۵</sup>	۱۵۰۰	۱۴۰۰۰	۳۱۰۰	۹۰۰
زمان محاسبه (s)	۱۷۳۰۰۰۰	۲۵۹۵۰	۲۴۲۲۰۰	۵۳۶۳۰	۱۵۵۷۰
<b>LSF<sub>3</sub></b>					
$\beta$	۱/۶۲۲	۱/۷۲۹	۱/۶۵۵	۱/۷۲۶	۱/۶۲۳
$P_f$	۰/۰۵۲	۰/۰۴۱	۰/۰۴۸	۰/۰۴۲	۰/۰۵۲
تعداد فراخوانی	۱۰ <sup>۵</sup>	۱۵۰۰	۱۴۰۰۰	۳۱۰۰	۹۰۰
زمان محاسبه (s)	۱۷۳۰۰۰۰	۲۵۹۵۰	۲۴۲۲۰۰	۵۳۶۳۰	۱۵۵۷۰

لحاظ نمی‌شوند، اما با گسترش حملات تروریستی در نقاط مختلف جهان، مطالعه و بررسی رفتار سازه‌ها در مقابل بارگذاری‌های غیرمتعارف مانند انفجار و ضربه‌ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه مورد توجه پژوهشگران و مهندسان سازه قرار گرفته است. در این تحقیق، احتمال خرابی سازه به علت برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سبک با یکی از ستون‌های گوشه بر مبنای قابلیت اطمینان محاسبه و بررسی شده است. به این منظور، با مدل‌سازی سازه‌ی قاب خمشی فولادی ۲ طبقه در نرم افزار OpenSees، تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی مورد نظر با روش MCS انجام شده است. در

۱۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دوران مجاز تیر دهانه‌ی آسیب دیده، احتمال خرابی قاب مورد مطالعه کاهش یافته و نرخ رشد آن نیز به تدریج کاهش می‌یابد.

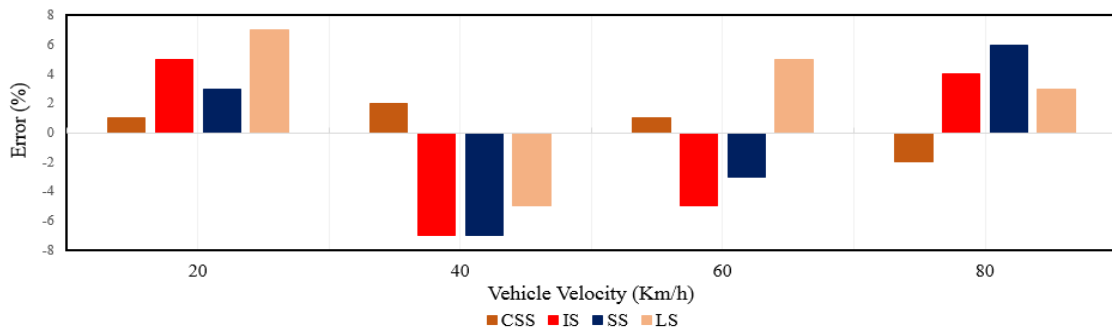
### ۵- نتیجه‌گیری

ساختمان‌ها در طول بهره‌برداری خود تحت تأثیر انواع نیروهای طبیعی و غیرطبیعی قرار دارند. ضربه‌ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه به سازه‌ها از جمله نیروهای خارجی غیرطبیعی بوده که معمولاً در طراحی سازه‌ها



شکل ۱۳. مقایسه ی احتمال خرابی در روش های مختلف شبیه سازی برای (LSF۱، LSF۲ و LSF۳)

Fig. 13. The failure probability comparison in different simulation methods for LSF1, LSF2 and LSF3



شکل ۱۴. درصد خطای روش های شبیه سازی نسبت به روش MCS در سرعت های مختلف برخورد برای (LSF۱)

Fig. 14. The error rate of simulation methods versus MCS method in different velocities of collision for LSF1

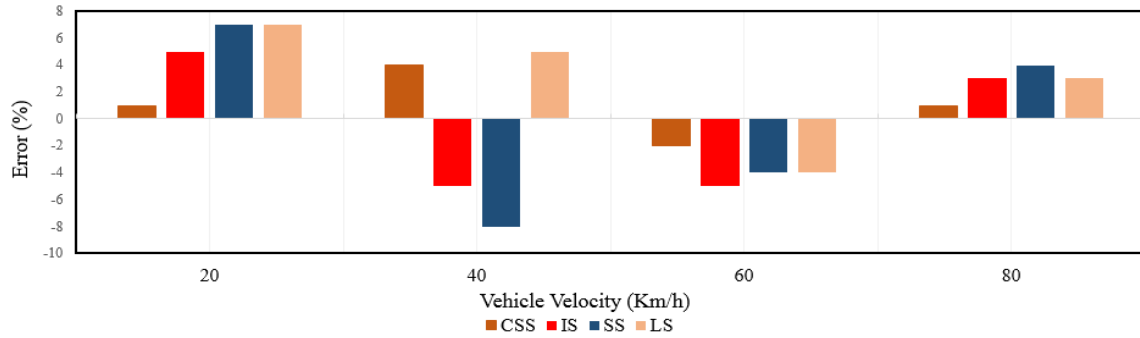


Fig. 15. The error rate of simulation methods versus MCS method in different velocities of collision for LSF2

شکل ۱۵. درصد خطای روش های شبیه سازی نسبت به روش MCS در سرعت های مختلف برخورد برای LSF2

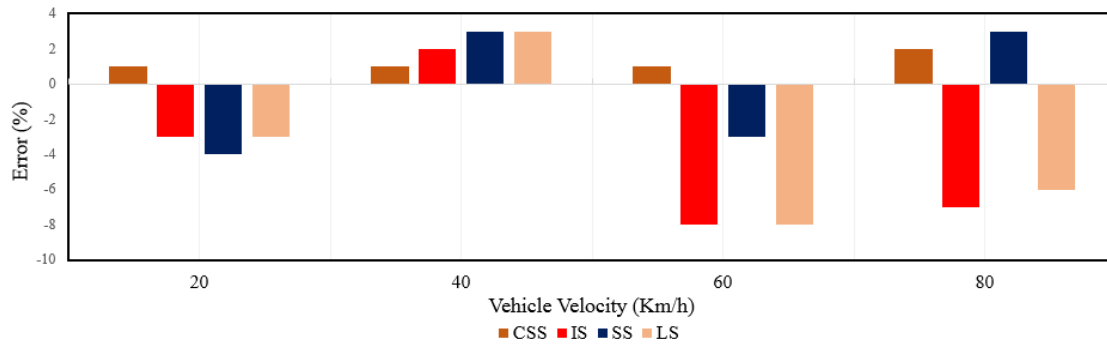


Fig. 16. The error rate of simulation methods versus MCS method in different velocities of collision for LSF3

شکل ۱۶. درصد خطای روش های شبیه سازی نسبت به روش MCS در سرعت های مختلف برخورد برای LSF3

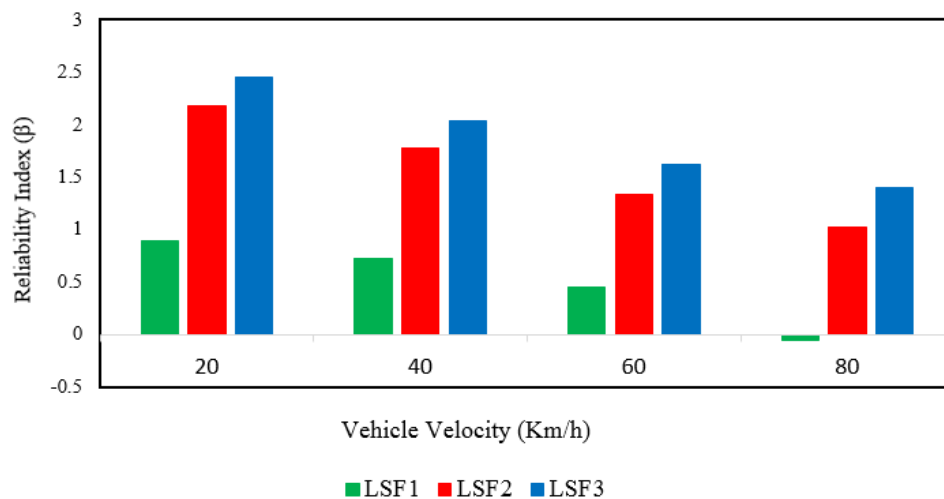


Fig. 17. The comparison of reliability index for 3 limit state functions in different velocities using CSS method

شکل ۱۷. مقایسه ی شاخص قابلیت اطمینان برای سه تابع شرایط حدی در سرعت های مختلف با استفاده از روش CSS



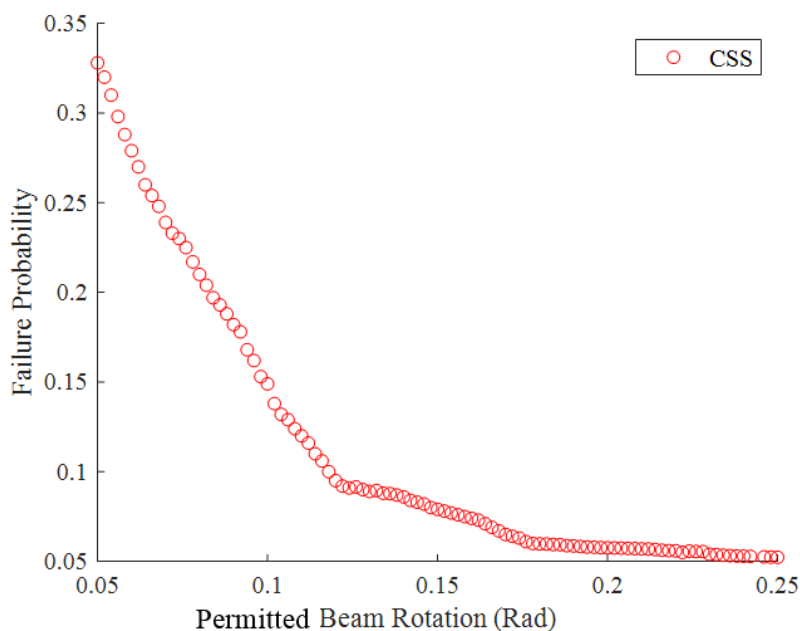


Fig. 18. The failure probability comparison of the studied frame with considering different limit state functions using CSS method

شکل ۱۸. مقایسه ی احتمال خرابی قاب مورد مطالعه با در نظر گرفتن توابع شرایط حدی مختلف با استفاده از روش CSS

مقاطع و بار ثقلی زنده ی قاب کمترین اثر را در احتمال خرابی سازه ی مورد نظر داشته اند.

- نتایج ارزیابی احتمالاتی و تحلیل قابلیت اطمینان نشان می دهد که با توجه به مقدار کم احتمال خرابی قاب تحت اثر ضربه ی ناشی از وسیله ی نقلیه، روش CSS با تعداد نمونه ی کمتر و زمان اجرای کوتاهتر، احتمال خرابی را با خطای قابل قبولی نسبت به روش MCS تخمین زده است.

- با محاسبه ی احتمال خرابی تحت سرعتهای مختلف برخورد وسیله ی نقلیه برای سه تابع شرایط حدی، مشخص می شود که با افزایش سرعت، احتمال خرابی افزایش یافته و شاخص قابلیت اطمینان کاهش می یابد.

- در محاسبه ی تابع شرایط حدی، با افزایش مقدار دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده، احتمال خرابی کاهش می یابد.

- مطابق روش CSS، حداقل تغییرات احتمال خرابی با افزایش سرعت وسیله ی نقلیه از ۲۰ به ۴۰ کیلومتر بر ساعت، برای توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب ۱۳، ۵۰ و ۵۰ درصد افزایش و حداکثر تغییرات احتمال خرابی با افزایش سرعت وسیله ی نقلیه از ۶۰ به ۸۰ کیلومتر بر ساعت، به ترتیب، ۵۹، ۵۷ و ۵۴ درصد افزایش را نشان می دهد.

- مطابق روش CSS، حداقل تغییرات شاخص قابلیت اطمینان با

نهایت توابع شرایط حدی بر مبنای حداکثر دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده ارائه گردیده و احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان قاب مذکور در سطوح عملکردی مختلف تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک با سرعتهای برخورد ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت بررسی و مقایسه شده است. سپس ارزیابی احتمالاتی و تحلیل مبتنی بر قابلیت اطمینان با استفاده از روشهای مختلف شبیه سازی مانند MCS، IS، SS، LS و CSS انجام شده است. با بررسی و مقایسه ی نتایج حاصل از تحلیل های احتمالاتی موارد ذیل قابل ذکر است:

- در این تحقیق به بررسی احتمالاتی ایمنی در قاب خمشی فولادی تحت اثر ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک با استفاده از نرم افزارهای OpenSees و Matlab پرداخته شده و احتمال خرابی با استفاده از روشهای شبیه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان پیچیده و دقیق محاسبه شده است. در تحقیق حاضر، حجم کار زیاد و زمان اجرای تحلیلیها طولانی بوده و کلیه ی نتیجه گیری ها و یافته های ارائه شده در محدوده ی قاب دو بعدی مورد مطالعه می باشد و قابل توسعه به سایر مدل های واقعی سه بعدی نمی باشد.

- نتایج تحلیل حساسیت نشان می دهد که جرم و سرعت وسیله ی نقلیه و مقاومت تسلیم مقاطع بیشترین اثر و نسبت پواسون، وزن مخصوص

- and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century, *Engineering Structures*, 173 (2018) 122-149.
- [5] F. Kiakojoori, V. De Biagi, B. Chiaia, and M. R. Sheidai, Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects, *Engineering Structures*, 206 (2020).
- [6] J. Kim, J. Park, and T. Lee, Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss, *Engineering Structures*, 33(2) (2011) 421-432.
- [7] S. Szyniszewski, and T. Krauthammer, Energy flow in progressive collapse of steel framed buildings, *Engineering Structures*, 42 (2012) 142-153.
- [8] H. Sharma, S. Hurlbaas, and P. Gardoni, Performance-based response evaluation of reinforced concrete columns subject to vehicle impact, *International Journal of Impact Engineering*, 43 (2012) 52-62.
- [9] H.R. Tavakoli, and A.A. Rashidi Alashti, Evaluation of progressive collapse potential of multi-story moment resisting steel frame buildings under lateral loading, Sharif University of Technology, *Scientia Iranica*, 20(1) (2013) 77-86.
- [10] J. Kim and H. Kang, Progressive Collapse of Steel Moment Frames Subjected to Vehicle Impact, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6) (2015).
- [11] C.H. Chung, J. Lee, and J. Ho Gil, Structural performance evaluation of a precast prefabricated bridge column under vehicle impact loading, *Structure and Infrastructure Engineering Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 10(6) (2014) 777-791.
- [12] P. Jiříček, and M. Foglar, Numerical analysis of a bridge pier subjected to truck impact, *Structural Concrete*, 17(6) (2016) 936-946.
- [13] J. Kim, and H. Kang, Response of a steel column-footing connection subjected to vehicle impact, *Structural Engineering and Mechanics*, 63(1) (2017) 125-136.
- [14] M. A. Hadianfard, S. Malekpour, and M. Momeni, Reliability analysis of H-section steel columns under افزایش سرعت وسیله ی نقلیه از ۲۰ به ۴۰ کیلومتر بر ساعت، برای توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب ۱۸، ۱۸ و ۱۷ درصد کاهش و حداکثر تغییرات شاخص قابلیت اطمینان با افزایش سرعت وسیله ی نقلیه از ۴۰ به ۶۰ کیلومتر بر ساعت، به ترتیب ۳۸، ۲۵ و ۶۲ درصد کاهش را نشان می دهد.
- سازه ی مورد مطالعه که برای زلزله طراحی شده است، در برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت، بر اساس حداکثر دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده معادل ۵ درصد، شاخص قابلیت اطمینان آن کمتر از صفر گردیده و احتمال خرابی قاب مذکور با افزایش سرعت به ۸۰ کیلومتر بر ساعت، نسبت به سرعت های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۱۵۰، ۱۳۸ و ۷۱ درصد افزایش یافته است.
  - با افزایش سرعت وسیله ی نقلیه تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت، بیشینه ی احتمال خرابی در توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب مقادیر ۰/۱۴۵ و ۰/۰۸ بوده است. لذا مشخص می شود در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت، معیار دوران مجاز معادل ۵ درصد تجاوز کرده و سازه دچار خرابی شده است.
  - در رخداد ضربه ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه به ستون خارجی ساختمانها می توان حداکثر احتمال خرابی آنها را متناسب با سرعت های برخورد مختلف با استفاده از روشهای شبیه سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان بر حسب سطوح خرابی حداکثر دوران مجاز تیر دهانه ی آسیب دیده تعیین نمود که در این صورت ممکن است سازه های مدنظر با فروریزش پیش رونده نیز مواجه گردند. اما در تحقیق حاضر، با توجه به بررسی سناریوهای ضربه ی ناشی از برخورد وسیله ی نقلیه ی سبک، پدیده ی فروریزش پیش رونده رخ نداده است.

## منابع

- [1] [1] K. Mehdizadeh, A. Sadeghi, and S. V. Hashemi, The Performance Investigation of Steel Moment Frames with Knee Braces subjected to Vehicle Collision, *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2019). (In Persian).
- [2] Y.G. Zhao, and T. Ono, Moment methods for structural reliability, *Structural Safety*, 23(1) (2001) 47-75.
- [3] ASCE. SEI/ASCE 7-05, minimum design loads for buildings and other structures. Washington DC: American Society of Civil Engineers, (2005).
- [4] J. M. Adam, F. Parisi, J. Sagasetta, and X. Lu, Research

- software and calculation tools: a review, *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(29) (2020).
- [26] J. Ramon Gaxiola-Camacho, H. Azizoltani, A. Haldar, S. M. Vazirizade, and F. Javier Villegas-Mercado, Chapter 13 - Novel concepts for reliability analysis of dynamic structural systems, *Handbook of Probabilistic Models*, Butterworth-Heinemann, (2020) 305-346.
- [27] C. A. Cornell, A probability based structural code, *Journal Proceedings, ACI*, 66(12) (1969) 974-985.
- [28] B. Fiessler, H. J. Neumann, and R. Rackwitz, Quadratic limit states in structural reliability, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 105(4) (1979) 661-674.
- [29] K. Breitung, Asymptotic approximations for multinormal integrals, *Journal of Engineering Mechanics*, 110(3) (1984) 357-366.
- [30] S. Saravani, and B. Keshtegar, Random - weighted Monte Carlo Simulation Method for Structural Reliability Analysis, *Computational Methods in Engineering* Isfahan University of Technology (IUT), 37(2) (2019) 41-60. (in Persian).
- [31] B. Fiessler, R. Rackwitz, and H.J. Neumann, Quadratic Limit States in Structural Reliability, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 105(4) (1979) 661-676.
- [32] N. Metropolis, and S. Ulam, the Monte Carlo Method, *Journal of the American Statistical Association*, 44(247) (1949) 335-341.
- [33] B. Keshtegar, and P. Hao, Enriched self-adjusted performance measure approach for reliability-based design optimization of complex engineering problems, *Applied Mathematical Modelling*, 57 (2018) 37–51.
- [34] M. Rashki, Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability, *Applied Mathematical Modelling*, 60 (2018) 220-234.
- [35] H. Azarkish, and M. Rashki, Reliability and reliability-based sensitivity analysis of shell and tube heat exchangers using Monte Carlo simulation. *Applied Thermal Engineering*, 159 (2019).
- blast loading, *Structural Safety*, 75 (2018) 45-56.
- [15] M.M. Javidan, H. Kang, D. Isobe, and J. Kim, Computationally efficient framework for probabilistic collapse analysis of structures under extreme actions, *Engineering Structures*, 17(2) (2018) 440-452.
- [16] W. Zhao, J. Qian, and J. Wang, Performance of bridge structures under heavy goods vehicle impact, *Computers and Concrete*, 22(6) (2018) 515-525.
- [17] MG. Stewart, Reliability-based load factor design model for explosive blast loading, *Structural Safety*, 71 (2018) 13-23.
- [18] A. F. Santos, A. Santiago, M. Latour, and G. Rizzano, Robustness analysis of steel frames subjected to vehicle collisions, *Structures*, 25 (2020) 930-942.
- [19] T. Kim, J. Kim, and J. Park, Investigation of progressive collapse-resisting capability of steel moment frames using push-down analysis, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(5) (2009) 27-35.
- [20] J. Kim, S. Lee, and H. Choi, Progressive collapse resisting capacity of moment frames with viscous dampers. *The Structural Design of Tall Special Buildings*, 22(5) (2013) 399-414.
- [21] F. Feng, 3D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings — Parametric study, *Engineering Structures*, 32(2) (2010) 3974-3980.
- [22] MG. Stewart, Reliability-based load factors for air blast and structural reliability of reinforced concrete columns for protective structures, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(5) (2019) 634-646.
- [23] OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation Manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, (2007). <http://opensees.berkeley.edu>.
- [24] MATLAB (matrix laboratory), Multi paradigm numerical computing environment and proprietary programming language developed by Math Works, (2013). <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
- [25] F. El Hajj Chehade, and R. Younes, Structural reliability

- applications to Earthquake Engineering. Higher Education Press, Beijing, (2007).
- [48] CEN (European Committee for Standardization), Eurocode 1: actions on structures, part 1–7: general actions – accidental actions. Brussels, (2006).
- [49] D. Mestrovic, D. Cizmar, and L. Miculinic, Reliability of Concrete Columns under Vehicle Impact, *Journal of WIT Transactions on The Built Environment*, 98 (2008) 157-165.
- [50] G.Z. Georgiev, Impact Force Calculator, (2020). <https://www.gigacalculator.com/calculators/impact-force-calculator.php>.
- [51] S. Sabouri, and S. R. Asad Sajadi, Experimental Investigation of Force Modification Factor and Energy Absorption Ductile Steel Plate Shear Walls with Stiffeners and without Stiffener, *Journal of Structure and Steel*, 4(3) (2008) 13-25.
- [52] ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, California, U.S.A. (1992).
- [53] B. Ellingwood, TV. Galambos, JG. MacGregor, and CA. Cornell, Development of a probability based load criterion for American National Standard A58 – building code requirement for minimum design loads in buildings and other structures, Washington, DC: National Bureau of Standards, Dept. of Commerce; (1980).
- [54] JCSS (Joint Committee on Structural Safety), Probabilistic model code; (2001).
- [55] CEN (European Committee for Standardization). EN 10034:1993. Structural steel I and H sections – tolerances on shape and dimensions. Brussels; (1993).
- [56] X. Zhang, J. Liu, Y. Yan, and M. Pandey, An Effective Approach for Reliability-Based Sensitivity Analysis with the Principle of Maximum Entropy and Fractional Moments, *Entropy*, 21(7) (2019).
- [57] EJ. Conrath, T. Krauthammer, KA, Marchand, and PF. Mlakar, Structural design for physical security – state of the practice. New York: ASCE; (1999).
- [58] R. E. Melchers, and M. A. Ahammed, fast approximate [36] R. E. Melchers, Structural reliability analysis and prediction, John Wiley & Sons, Chichester, (1999).
- [37] M. Rakhshanimehr, M. Rashki, M. Miri, and M. Azhdari Moghaddam, Reliability Analysis of Flexural Steel Frames by Using the Weighted Simulation Method and Radial Basis Function Interpolation. *Journal of Modeling in Engineering*, 14(47) (2017) 21-32.
- [38] Y. Ibrahim, Observations on applications of importance sampling in structural reliability analysis, *Structural Safety*, 9(4) (1991) 269-281.
- [39] B. Echard, N. Gayton, A. Bignonnet, A reliability analysis method for fatigue design, *International Journal of Fatigue*, 59 (2014) 292-300.
- [40] G. Behnam rad, and H. Shariatmadar, Subset Simulation Method in Active Structural Control, *Journal of Modeling in Engineering*, 16(53) (2018) 279-288. (In Persian).
- [41] F. MiarNaeimi, G. Azizyan and M. Rashki, Reliability sensitivity analysis method based on subset simulation hybrid techniques, *Applied Mathematical Modelling*, 75 (2019) 607-626.
- [42] Z. Z. Lu, S. F. Song, Z. F. Yue, and J. Wang, Reliability sensitivity method by line sampling, *Structural Safety*, 30(6) (2008) 517-532.
- [43] INBC, Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6, (2013) (in Persian).
- [44] INBC, Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10, (2013) (in Persian).
- [45] BHRC, Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings, Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, (2014) (in Persian).
- [46] ETABS-Three Dimensional Analysis of Building Systems. Manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (2016). <https://www.csiamerica.com/>
- [47] A.K. Chopra, Dynamics of Structures, Theory and

- Hosseini, Reliability analysis of Pole Kheshti historical arch bridge under service loads using SFEM, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 4(21) (2019).
- [62] M. Pouraminian, S. Pournakhshian, E. Noroozinejad Farsangi, S. Berenji, S. Keyani Borujeni, M. Moosavi Asl, and M. Moahammad Hosseini, Reliability-Based Safety Evaluation of the BISTOON Historic Masonry Arch Bridge, *Civil And Environmental Engineering Reports* 1(30) (2020) 87-110.
- [63]
- method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability, *Computers & Structures*, 82(1) (2004) 55-61.
- [59] A. Karamchandani, and C. A. Cornell, Sensitivity estimation with first and second order reliability method, *Structural Safety*, 11(1) (1991) 59-74.
- [60] Y. T. Wu, and S. Mohanty, Variable screening and ranking using sampling-based sensitivity measures, *Reliability Engineering & System Safety*, 91(6) (2006) 634-647.
- [61] M. Pouraminian, S. Pournakhshian, and M. Moahammad

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Sadeghi, H. Kazemi, M. Samadi, *Reliability Analysis of Steel Moment-Resisting Frame Structure under the Light Vehicle Collision*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4831-4856.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18565.6901



