

## تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان سازه‌های قاب خمشی فولادی تحت اثر برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین

عباسعلی صادقی

گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران  
حمید کاظمی\*

گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران  
میثم صمدی

گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران  
[kazemi0518@mshdiau.ac.ir](mailto:kazemi0518@mshdiau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۰/۲۰

### چکیده

در چند دهه‌ی اخیر، با گسترش حوادث غیرطبیعی مانند آتش‌سوزی، انفجار و برخورد وسایل نقلیه، مطالعه‌ی رفتار سازه‌ها تحت اثر بارگذاری‌های نامتعارف مورد توجه پژوهشگران و مهندسين سازه قرار گرفته است. در این تحقیق، سازه‌های قاب خمشی فولادی ۲ و ۵ طبقه تحت اثر ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مصالح و بارهای اعمالی، به کمک نرم‌افزار *OpenSees* مدل‌سازی گردیده و تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان متغیرهای تصادفی مورد مطالعه در نرم‌افزار *MATLAB* انجام شده است. سپس تأثیر هرکدام از متغیرها با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی براساس توابع شرایط حدی مبتنی بر حداکثر دوران مجاز تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده‌ی قاب‌ها بررسی گردیده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سازه‌های موردنظر، متغیرهای تصادفی جرم و سرعت وسیله‌ی نقلیه و مقاومت تسلیم مصالح، تأثیرگذارترین متغیرها در محاسبه‌ی احتمال خرابی بوده‌اند و روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل (*CSS*) نسبت به روش مونت‌کارلو (*MCS*)، با تعداد نمونه‌ی کمتر و زمان اجرای کوتاه‌تر، احتمال خرابی را با خطای قابل قبولی تخمین زده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات ساختمان، احتمال خرابی آن در اثر برخورد وسیله‌ی نقلیه افزایش می‌یابد به طوری که براساس نتایج این مطالعه، مقدار پارامتر دوران تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده‌ی قاب ۵ طبقه نسبت به ۲ طبقه تحت توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب معادل ۵۵، ۱۸ و ۳۳ درصد افزایش یافته است.

**کلید واژگان:** ضربه، قاب خمشی فولادی، برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین، تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان.

## ۱- مقدمه

پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که رفتار ستون تحت برخورد وسیله‌ی نقلیه به صورت عمده به جزئیات اتصال ستون به پی ساختمان بستگی دارد. هادیان فر و همکاران [۹]، به بررسی و تحلیل قابلیت اطمینان ستون‌های فولادی  $H$  شکل تحت اثر بارگذاری انفجاری پرداخته‌اند. در این مطالعه، به منظور ارزیابی احتمال خرابی، از روش  $MCS$  استفاده شد و نتایج نشان داد که با تغییر تکیه‌گاه ستون‌ها از مفصلی به گیردار، احتمال خرابی در مد خمشی کاهش یافته است. جاویدان و همکاران [۱۰]، به ارزیابی احتمالاتی اثر ضربه‌ی وسیله‌ی نقلیه به ستون گوشه‌ی طبقه‌ی همکف یک سازه‌ی قاب خمشی فولادی ۳ طبقه پرداختند و میزان خسارت وارده را با استخراج منحنی‌های شکست در سرعت‌های مختلف وسیله‌ی نقلیه به دست آوردند. کالا و والس [۱۱]، تأثیر حساسیت متغیرهای تصادفی مصالح و هندسی را بر روی مقاومت یک ستون فولادی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بیان‌گر این است که متغیرهای تصادفی مورد مطالعه هم به بار تسلیم و هم به بار کماتش ستون‌ها موثرند. نجی [۱۲]، تحلیل حساسیت اثر غیر قطعی بودن پارامترهای بار زنده بار مرده، ضریب ارتجاعی و تنش تسلیم فولاد بر روی تغییر مکان نقطه متصل به ستون حذف شده انجام شده است. برای تحلیل حساسیت از سه روش شبیه سازی  $MCS$ ، منحنی‌های تورنادو و روش لنگر دوم مرتبه اول استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده تغییر مکان نقطه متصل به ستون حذف شده بیشتر به تغییرات بار مرده و تنش تسلیم فولاد حساس می باشد. مرادی و همکاران [۱۳]، حساسیت زمان پایداری قاب بتن آرمه در بارگذاری متوالی حذف ناگهانی ستون و آتش‌سوزی پس‌از آن نسبت به متغیرهای تصادفی بررسی نمودند. نتایج نشان داده است در سناریوی حذف ناگهانی ستون، بار مرده و در سناریوی آتش‌سوزی پس از آن، بار مرده و پوشش آرماتورها بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترها ایجاد کرده‌اند. همچنین حداکثر خطای تحلیل حساسیت به روش  $FOSM$  نسبت به روش  $MCS$  برابر با ۱۱٪ محاسبه شده است. مرادی و توکلی [۱۴]، به ارزیابی حساسیت قاب‌های فولادی با مهاربند همگرا نسبت به متغیرهای تصادفی تحت یک رکورد زلزله پرداخته‌اند. د این تحقیق از دو روش تحلیل حساسیت  $MCS$  و  $FOSM$  استفاده شده و حساسیت پاسخ آن‌ها نسبت به متغیرهای تصادفی ارزیابی شده است. همچنین دقت تحلیل حساسیت به روش  $FOSM$  نسبت به تحلیل  $MCS$  مقایسه شده است. نتایج نشان داد تأثیر متغیرهای تصادفی بر ماکزیمم جابجایی بام بیشتر از ماکزیمم برش پایه و زمان تناوب سازه است. سانتوس و همکاران [۱۵]، به بررسی خرابی انواع اتصالات متداول تیر به ستون قاب خمشی فولادی تحت اثر ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه پرداخته و نتایج نشان داد که اتصال تیر کاهش یافته  $(RBS)$  باعث مکانیسم تسلیم تیر شده و عملکرد بهتری در برابر ضربه ایفا می‌کند. صادقی و همکاران [۱۶]، به بررسی رفتار سازه‌های قاب خمشی فولادی ۲، ۵، ۸ و ۱۲ طبقه تحت بارهای ضربه‌ای ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سبک و سنگین پرداخته‌اند و منحنی‌های شکنندگی برای سطوح مختلف خسارت ارائه شده است. در نهایت پاسخ‌های سازه‌های مورد

در دهه‌ی گذشته، با توجه به افزایش تهدیدهای تروریستی در نقاط مختلف جهان، توجه زیادی به طراحی و تحلیل سازه‌های مقاوم در برابر بارهای نامتعارف شده است. به‌طور سنتی، مهندسان سازه، ساختمان‌ها را در برابر بارهای جانبی متعارف مانند زلزله و باد طراحی و تحلیل می‌کنند، اما در برخی موارد، بررسی عملکرد غیرخطی سازه‌ها در برابر بارهای غیرمتعارف مانند ضربه‌ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه و انفجار نیز حائز اهمیت می‌باشد [۱]. با توجه به این که اطمینان از عملکرد سازه‌ها همیشه به‌عنوان یک اصل کلیدی برای مهندسین محاسب و طراحان مطرح بوده و از آنجا که اطمینان کامل از کمیت یک حادثه‌ی بالقوه‌ی طبیعی یا غیرطبیعی قابل حصول نیست، در نتیجه استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر احتمالات، قابلیت اطمینان همراه با اعمال عدم قطعیت‌های مختلف مانند هندسه، مصالح، بارهای اعمالی و ... منطقی به نظر می‌رسد [۲]. اخیراً، توجه پژوهشگران زیادی به حساسیت پاسخ‌های سازه‌ای به بارهای جانبی مختلف جلب شده و تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام شده است. پرتو و همکاران [۳]، به تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های شتاب طیفی، جزئیات زلزله‌ها، جرم، میرایی و رفتار نیرو-تغییر شکل سازه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها حساسیت میزان خسارات را نسبت به تغییر متغیرهای تصادفی مذکور سنجیده‌اند. شتاب طیفی و جزئیات زمین‌لرزه‌ها از پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه‌ی خسارت بوده‌اند. کالا [۴]، بر روی حساسیت اعضای قاب خمشی فولادی تحت بارهای فشاری با استفاده از روش سوپول تحقیق کردند. در این مطالعه، مشخصات مصالح و هندسی قاب خمشی فولادی به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد که پاسخ میزان باربری این اعضا تحت بارهای محوری فشاری تا حدود زیادی می‌تواند تحت تأثیر تغییرات ناشی از متغیرهای تصادفی قرار گیرد. پارک و همکاران [۵]، به تحلیل حساسیت<sup>۲</sup> پارامترهای طراحی قاب خمشی فولادی تحت اثر حذف ستون پرداختند. این پارامترها عبارت‌اند از مقاومت تسلیم تیر، ستون و مهاربند، میرایی، مدول الاستیسیته و بارهای ثقی می‌باشند. در این مطالعه، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۳</sup> ( $MCS$ ) و روش لنگر دوم مرتبه‌ی 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. حاجی‌رسولی‌ها و همکاران [۶]، تأثیر متغیرهای تصادفی مقاومت برشی طبقات و نسبت میرایی را بر طراحی بهینه‌ی لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر متغیر تصادفی مقاومت برشی طبقات بر طراحی بهینه سازه‌های مهاربندی موثرتر است. کیم و کانگ [۷]، به بررسی اثر ضربه‌ی وسیله‌ی 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. کیم و کانگ [۸]، به بررسی خسارت ستون فولادی تحت اثر ضربه‌ی کامیون

<sup>4</sup> the First-Order Second Moment Method

<sup>5</sup> Reduced Beam Section

<sup>1</sup> Reliability

<sup>2</sup> Sensitivity Analysis

<sup>3</sup> Monte Carlo Simulation Method

آن‌ها بر خروجی‌ها سنجیده می‌شود، یا با استفاده از روش الحاقی مطالعه اثر فضای پارامتر مبتنی بر مشتقات پارامترها انجام می‌شود. در این حالت می‌توان به‌طور هم‌زمان نتایج و تأثیر مقادیر محاسبه‌شده را با استفاده از اطلاعات مشتقات جزئی به دست آورد. مزیت این روش و همه روش‌های محلی این است که تنها اطلاعات محلی پیرامون پارامتر یا پارامترهای مورد نظر را مورد توجه قرار می‌دهد. معمولاً پارامترهای تحلیل خطر در محدوده وسیعی تغییر می‌کنند. بررسی حساسیت احتمال خرابی به متغیرهای تصادفی، از نکات کلیدی و مهم در ساده‌سازی و طراحی بهینه بخصوص در مسائل با تعداد متغیرهای تصادفی زیاد می‌باشد. عموماً در مباحث طراحی بر اساس قابلیت اطمینان، گام اول یافتن اهمیت هر یک از متغیرها در مسئله و تأثیر آن بر احتمال خرابی سازه می‌باشد. چنانچه تأثیر متغیر تصادفی بر احتمال خرابی جزء سازه‌ای ناچیز باشد، جهت ساده‌سازی و کاهش ابعاد مسئله می‌توان آن متغیر را به صورت قطعی حذف نمود و مسئله را ساده‌تر نمود [۲۱] و [۲۲]. در روش‌های شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت اغلب با ارزیابی نرخ تغییر احتمال خرابی به تغییرات هر متغیر تصادفی انجام می‌شود [۲۳]. با استفاده از این روش، نرخ تغییرات را می‌توان با یک‌بار شبیه‌سازی (که برای برآورد احتمال خرابی انجام می‌پذیرد) به‌صورت رابطه‌ی (۱) محاسبه نمود.

$$\frac{\partial P_f}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \int I[g(x) < 0] f_{x(p)}(x) dx \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)،  $P_f$  احتمال خرابی،  $P$  متغیر تصادفی،  $g(x)$  تابع شرایط حدی،  $f_x(x)$  تابع چگالی احتمال توأم متغیرها و  $I$  بردار شمارنده می‌باشند.

## ۲-۱- روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)

روش MCS، یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها در برآورد احتمال خرابی سازه‌ها به شمار می‌رود که توسط متروپولیس و یولام<sup>۵</sup> [۲۴] ارائه شده است. احتمال خرابی سازه‌ها  $P_f$  بر اساس روش MCS مطابق رابطه‌ی (۲) ارائه شده است [۲۵ و ۲۶]:

$$P_f = \int_{g(x) < 0} f_x(x) dx = \int_X I_{g(x) \leq 0}(x) f_x(x) dx = \mathbb{E}_f(I_{g(x) \leq 0}(x)) \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)،  $f_x(x)$  تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای  $X$ ،  $g(x)$  تابع عملکردی،  $X$  متغیرهای تصادفی،  $\mathbb{E}_f$  امید ریاضی،  $g(x) \leq 0$  بیانگر مجموعه نمونه‌های خراب و در نهایت  $I_{g(x) \leq 0}$  تابع شمارنده می‌باشد، که به صورت رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود:

$$I_{g(x) \leq 0}(x) = \begin{cases} 0, & x^i \notin (g(x) > 0) \\ 1, & x^i \in (g(x) \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

تابع شمارنده که مقدار آن برای نمونه‌های تولید شده در ناحیه‌ی خرابی  $[g(x) < 0]$  برابر یک و برای نمونه‌های تولید شده در ناحیه‌ی سلامت  $[g(x) > 0]$  برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۲- روش سوبول

این روش یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل حساسیت سراسری است که بر مبنای تجزیه واریانس پایه‌گذاری شده است. هدف آن کمی کردن اثر پارامترهای ورودی بر واریانس خروجی سیستم است. این روش

## فصلنامه آنالیز سازه- زلزله

مطالعه تحت اثر ضربه‌ی برخورد با سرعت‌های مختلف تا رخداد ناپایداری دینامیکی بررسی و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سبک با سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت و ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین با سرعت‌های ۵۰، ۶۰، ۸۰ و ۷۰ کیلومتر بر ساعت، به ترتیب باعث رخداد ناپایداری دینامیکی در قاب‌های ۲، ۵، ۸ و ۱۲ طبقه‌ی موردنظر شده است.

بررسی شواهد و مطالعات نشان می‌دهد که ضربه‌ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه به ستون‌های خارجی ساختمان‌ها می‌تواند یکی از عوامل ایجاد ناپایداری در سازه‌ها باشد [۱۷]. لذا از آنجا که در سناریوی ضربه‌ی ناشی از برخورد وسایل نقلیه، در نظر گرفتن عدم قطعیت در مصالح و بارهای اعمالی بر عملکرد سازه تأثیرگذار می‌باشند، برای بررسی حساسیت متغیرهای تصادفی بر عملکرد سازه‌ها در برابر این نوع بارگذاری‌ها معمولاً استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان اجتناب‌ناپذیر می‌باشد [۱۸].

در این تحقیق، مسئله‌ی برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین به ستون خارجی ساختمان فولادی به‌عنوان یک سناریوی تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور برآورد احتمال خرابی، عدم قطعیت‌ها در مصالح و بارهای اعمالی در نظر گرفته شده و به‌منظور تحلیل حساسیت از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی قابلیت اطمینان به‌عنوان دقیق‌ترین روش‌های ارزیابی، استفاده شده است. در این مسیر، سازه‌های قاب خمشی فولادی ۲ و ۵ طبقه با شکل‌پذیری متوسط مطابق آئین‌نامه‌های موجود، طراحی شده و تحلیل‌های غیر ارتجاعی به کمک نرم‌افزار *OpenSees* 2.5.0 [۱۹] انجام شده است. به‌منظور کاهش زمان تحلیل‌ها، فرضیات ساده‌کننده‌ای مانند قاب خمشی دو بعدی کوتاه مرتبه در نظر گرفته شده است. تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان مدل مذکور با استفاده از روش‌های مونت کارلو (MCS)، سوبول<sup>۱</sup>، زیرمجموعه‌ای<sup>۲</sup> (SS)، کریجینگ<sup>۳</sup> و روش زیرمجموعه‌ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل (CSS) با اعمال عدم قطعیت در مصالح، بارهای ثقیل و ضربه‌ای با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB 2013* [۲۰] انجام گردیده تا متغیرهایی که بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را در محاسبه‌ی احتمال خرابی دارند با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های زمانی و محاسباتی مشخص شوند و احتمال خرابی قاب‌ها با افزایش تعداد طبقات بر مبنای تحلیل قابلیت اطمینان بررسی گردند.

## ۲- تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان

رهیافت‌های انجام تحلیل حساسیت را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود: تعینی و احتمالی؛ که بعضاً به‌عنوان رهیافت‌های محلی و کلی نیز شناخته شده‌اند. اگر مدل بسیار پیچیده بوده و نتوان با روش مونت کارلو آن را تحلیل نمود، معمولاً از روش آنالیز حساسیت تعینی استفاده می‌شود. در این حالت مدل با تعداد آنالیز کم، با ترکیب مختلف پارامترها که هر بار یکی از آن‌ها تغییر می‌کند و با تحلیل ابتدایی تأثیر

<sup>4</sup> Control Variates-based Subset Simulation Method

<sup>5</sup> Metropolis and Ulam

<sup>1</sup> Sobol'

<sup>2</sup> Subset Simulation Method

<sup>3</sup> Kriging

مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل کریجینگ  $\hat{y}(x)$  در نقاط تعریف شده ورودی، از رابطه‌ی (۹) به دست آمده است:

$$\hat{y}(x) = f(x)^T \cdot \beta^* + r(x)^T (Y - F \cdot \beta^*) \quad (9)$$

که در آنجا  $Y$  یک ماتریس ستونی با  $m$  مولفه که حاوی مقادیر فرکانس‌های نمونه‌های ورودی حاصل شده از حل دقیق سه بعدی می‌باشد.  $F$  ماتریس  $m \times p$  از ورودی‌ها می‌باشد یعنی  $F_{ij} = f_j(x_i)$  نیز یک بردار می‌باشد که همبستگی بین نقاط طراحی و  $x$  را مشخص می‌کند:

$$r(x)^T = [R(\theta, x_1, x), \dots, R(\theta, x_m, x)]^T \quad (10)$$

رگرسیون  $F \cdot \beta \cong Y$  به روش حداقل کردن مربعات تعمیم یافته حاصل شده است:

$$\beta^* = (F^T \cdot R^{-1} F)^{-1} F^T \cdot R^{-1} Y \quad (11)$$

واریانس تخمین زده شده از رابطه زیر حاصل شده است:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} (Y - F \cdot \beta^*)^T \cdot R^{-1} \cdot (Y - F \cdot \beta^*) \quad (12)$$

ماتریس  $R$  و در نتیجه  $\beta^*$  و  $\sigma^2$  وابسته به  $\theta$  می‌باشند [۳۱].

### ۲-۵- روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای بر مبنای تکنیک متغیر کنترل (CSS)

روش CSS، که برای محاسبه‌ی مقادیر احتمال خرابی کم مناسب می‌باشد، با معرفی تابع چگالی احتمال متغیر کنترل، انتگرال اصلی احتمال خرابی بر اساس تکنیک متغیر کنترل بازنویسی می‌شود. در واقع با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای تعمیم‌یافته و روش نمونه‌گیری با اهمیت به همراه تکنیک متغیر کنترل به صورت پهنه به تخمین احتمال خرابی می‌پردازد. محاسبه‌ی احتمال خرابی طبق رابطه‌ی (۱۳) ارائه شده است [۲۶].

$$P_f = P_f |_{subsim}^{n\sigma} \cdot \mathbb{E} \left( \frac{f_X(X_{Failed})}{k_X(X_{Failed})} \right) \quad (13)$$

$$= \left[ \prod_{i=1}^m P_i^{n\sigma} \right] \cdot \mathbb{E} \left( \frac{f_X(X_{Failed})}{k_X(X_{Failed})} \right)$$

رابطه‌ی (۱۳) نشان می‌دهد که تابع  $P_i^{n\sigma} = P_f |_{subsim}^{n\sigma}$  احتمال خرابی تخمین زده‌شده توسط روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای  $(k(x))$  می‌باشد،  $\mathbb{E}(X)$  امید ریاضی و تابع  $\{x: g(x) < 0\}$   $X_{Failed}$  نمونه‌های واقع در ناحیه‌ی خرابی را بیان می‌کند [۲۶].

### ۳- روش تحقیق

در این تحقیق، سازه‌های ۲ و ۵ طبقه‌ی سه بعدی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط در دو جهت طولی و عرضی در نظر گرفته شده است. این سازه‌ها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۳۲] روی خاک نوع II در پهنه‌ی خطرپذیری خیلی زیاد ( $A=0/35$  g) فرض شده و مطابق آئین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی ایران (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۳۳ و ۳۴]) به روش LRFD،

مطابق رابطه‌ی (۴) ارائه شده است. در این رابطه پارامتر  $Y$  به‌عنوان خروجی عددی و تابعی از متغیرهای  $X$  نسبت به واریانس خروجی کلی می‌باشد،  $E$  امید ریاضی و  $V(Y)$  نیز شاخص مرتبه‌ی اول قابلیت اطمینان است. برای مطالعه بیشتر می‌توان به مراجع [۲۷ و ۲۸] رجوع کرد.

$$S_i = \frac{V(E(Y|x_i))}{V(Y)} \quad (4)$$

### ۳-۲- روش شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای (SS)

کاربرد روش SS، به دلیل ناکارآمدی روش مونت کارلوی مستقیم، در دستیابی به احتمالات گسیختگی کوچک و تولید نمونه‌های نادری است که در ناحیه‌ی گسیختگی قرار دارند. این مسئله منجر به این سؤال اساسی شده است که چگونه می‌توان از شبیه‌سازی نمونه‌های نادر، در محاسبات احتمالات گسیختگی کوچک اجتناب نمود. ایده‌ی ساده اما اساسی که در شبیه‌سازی زیرمجموعه‌ای نهفته است، این است که یک احتمال گسیختگی کوچک، به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از احتمالات گسیختگی شرطی بزرگ‌تر، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مسئله‌ی شبیه‌سازی شامل رویدادهای نادر، به مسائل شبیه‌سازی شامل رویدادهای متناوب‌تر، تبدیل می‌شود، لذا کاربرد آن در یافتن احتمال خرابی پایین، مشهود است. مقادیر مختلف مثبت بر روی تابع شرایط حدی انتخاب می‌شود و احتمال خرابی برای هر کدام محاسبه می‌گردد. این مقادیر مثبت به‌صورت  $b_1 > b_2 > \dots > b_m = 0$  نمایش داده می‌شوند. رخدادهای خرابی را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۵) بیان نمود:

$$F_k = \{x: g(x) < b_k\}; (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

بنابراین اگر  $F$  ناحیه‌ی گسیختگی باشد آنگاه رابطه‌ی  $F_1 \supset F_2 \supset \dots \supset F_m$  مجموعه‌ای نزولی از نواحی گسیختگی هستند، به‌گونه‌ای که رابطه‌ی  $F_k = \bigcap_{i=1}^k F_i$  بین رخدادهای خرابی حد واسط برقرار باشد. بنا بر نظریه‌ی مجموعه‌ها، می‌توان احتمال خرابی به‌دست‌آمده از روش زیرمجموعه‌ای را به صورت رابطه‌ی (۶) ارائه نمود.

$$P(F) = P(F_m) = P(F_m | F_{m-1}) \cdot P(F_{m-1}) = \dots = P(F_1) \prod_{i=1}^{m-1} P(F_{i+1} | F_i) \quad (6)$$

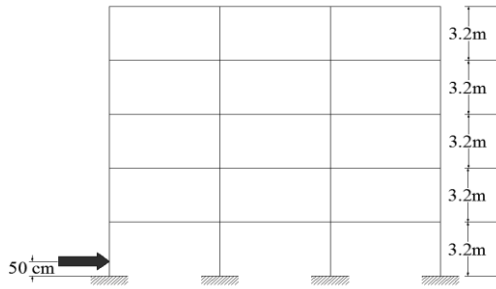
رابطه‌ی (۶) نشان می‌دهد که به جای محاسبه‌ی مستقیم احتمال کوچک  $P(F)$ ، می‌توان احتمال  $P(F_i)$  و  $P(F_{i+1} | F_i)$  را محاسبه نموده و نتایج آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. مزیت اصلی این کار، در این مسئله نهفته است که می‌توان احتمالات در نظر گرفته‌شده را بزرگ‌تر از  $P(F)$  فرض نمود و از شبیه‌سازی رویدادهای نادر اجتناب ورزید. در نهایت رابطه‌ی (۶) را می‌توان به‌صورت ساده‌شده در قالب رابطه‌ی (۷) ارائه نمود [۲۹ و ۳۰].

$$P(F) = \prod_{i=1}^{m-1} P_i \quad (7)$$

### ۴-۲- روش کریجینگ

مدل کریجینگ یک روش درون‌یابی برای پیش‌بینی پاسخ داده‌های مشخص می‌باشد. روش کریجینگ، یک تابع را با استفاده از ترکیبی از توابع مبنا تقریب می‌زند. در این روش تابع پاسخ مجهول مورد نظر  $y(x)$  که از  $n$  متغیر با دامنه  $x \in D \subseteq R^n$  تشکیل شده است، حاصل مجموع یک تابع رگرسیونی  $y_r(x)$  و یک تابع آماری  $F(x)$  به صورت رابطه‌ی (۸) می‌باشد:

$$y(x) = y_r(x) + F(x) \quad (8)$$



(ج)

شکل ۱- الف) پلان سازه‌ی مورد مطالعه، ب) نمایش قاب دو بعدی ۲ طبقه تحت ضربه ج) ب) نمایش قاب دو بعدی ۵ طبقه تحت ضربه

جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب مقاطع طراحی شده قاب‌های ۲ و ۵ طبقه را نشان می‌دهند. در این تحقیق، مقاطع تیرها I شکل (HEB) و مقاطع ستون‌ها جعبه‌ای (BOX) در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱- مقاطع طراحی شده قاب ۲ طبقه

اعضا	طبقه ۱	طبقه ۲
تیر کناری	HE200B	HE180B
تیر میانی	HE220B	HE200B
ستون کناری	BOX200*20	BOX200*18
ستون میانی	BOX200*20	BOX200*18

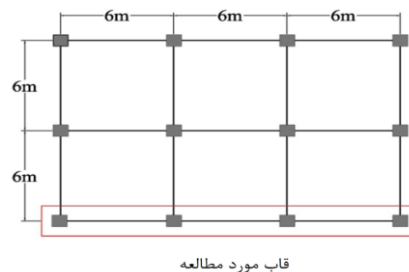
جدول ۲- مقاطع طراحی شده قاب ۵ طبقه

اعضا	طبقه ۱ و ۲	طبقه ۳ و ۴	طبقه ۵
تیر کناری	HE260B	HE240B	HE220B
تیر میانی	HE280B	HE260B	HE240B
ستون کناری	BOX200*22	BOX200*18	BOX200*16
ستون میانی	BOX200*25	BOX200*20	BOX200*16

### ۳-۱- راستی آزمایشی بار ضربه‌ای

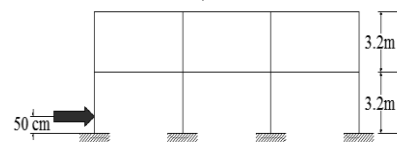
در این مطالعه، جهت صحت‌سنجی مدل بار ضربه‌ای از تحقیق کیم و کانگ [۸] استفاده شده است. سازه‌ی سه طبقه‌ی سه دهانه مطابق شکل ۲ الف) ارائه شده و ستون فولادی گوشه‌ی طبقه‌ی اول مطابق شکل ۲ ب) تحت بار ضربه‌ای ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی به وزن ۸ تن و سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، منحنی جابجایی-زمان مدل تهیه شده و مدل مرجع [۸]، مطابقت نسبتاً خوبی با یکدیگر داشته‌اند.

طراحی شده‌اند. بارگذاری ثقلی مرده و زنده‌ی طبقات به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع اعمال شده‌اند و معیار بحرانی در طراحی ساختمان‌های موردنظر، کنترل جابجای نسبی بوده است، لذا با بررسی نتایج، نسبت تقاضا به ظرفیت در تمامی اعضای سازه‌ای آن‌ها، مقادیری به مراتب کمتر از واحد داشته‌اند. نسبت میرایی رایلی به صورت  $(0.5) =$  برای تمام مدهای ارتعاشی سازه لحاظ شده و اثر اعضای غیرسازه‌ای در نظر گرفته نشده است. کلیه‌ی ضوابط لرزه‌ای برای سازه‌های مذکور لحاظ شده است. سپس قاب دو بعدی محور کناری استخراج و جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت بارهای ضربه‌ای در نرم‌افزار *OpenSees* مدل‌سازی شده است. مصالح به کار رفته در تیرها و ستون‌ها همگی از نوع *ST37* با مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب برابر ۲۰۰۰۰، ۲۴۰ و ۳۷۰ مگاپاسکال، در نظر گرفته شده است. مصالح فولادی تک‌محوری دو خطی با سخت شوندگی سینماتیکی و سختی ایزوتروپیک بر اساس مدل *Steel01* با میزان سخت‌شدگی ۳ درصد فرض شده‌اند [۵]. برای اعضای سازه‌ای از مقطع رشته‌ای (فایبر) به صورت مدل پلاستیسیته‌ی گسترده استفاده شده است. 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 و اتصالات تیر به ستون و ستون به پی، همگی صلب فرض شده است. سپس عملکرد قاب‌های مورد نظر تحت اثر بارهای ضربه‌ای ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین و با اعمال اثر  $P-A$  ارزیابی شده است. در ادامه، پلان مشترک سازه‌های مذکور و نمای قاب‌های دو بعدی محور کناری تحت سناریوی ضربه‌ی برخورد به ستون گوشه در شکل ۱ الف)، ب) و ج) نشان داده شده است.



قاب مورد مطالعه

(الف)



(ب)

با توجه به انتخاب وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین، مطابق مطالعات قبلی، جرم آن ۲۰ تن و برخورد وسیله‌ی نقلیه در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متری ستون کناری قاب‌های مورد مطالعه، با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت فرض شده است [۳۵ و ۳۶]. نیروی ضربه بر حسب سرعت، سختی و جرم وسیله‌ی نقلیه و مدت زمان ضربه به ترتیب از روابط (۱۴) و (۱۵) به دست آمده است [۳۵ و ۳۷]:

$$F = V\sqrt{km} \quad (14)$$

$$\Delta t = \frac{m \cdot v}{F} \quad (15)$$

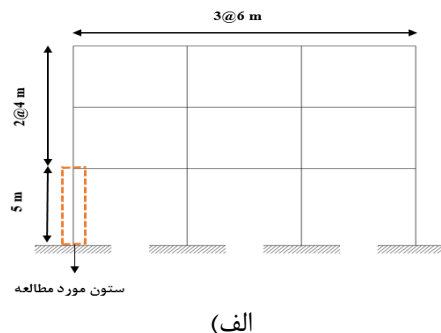
#### ۴- معرفی متغیرهای تصادفی و تابع شرایط حدی

برای محاسبه‌ی احتمال خرابی، از روش‌های مختلف شبیه‌سازی استفاده شده و در نهایت میزان دقت هر کدام از روش‌ها با روش MCS مقایسه گردیده است. بدین منظور ابتدا نمونه‌های موجود در ناحیه‌ی سلامت و خرابی مشخص شده و با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، تابع شرایط حدی مسئله‌ی قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در هر بار تحلیل سازه‌ای، متغیرهای تصادفی تعریف شده بر اساس توزیع انتخابی، مقادیری را به خود اختصاص می‌دهند. متغیرهای تصادفی مورد مطالعه در ۳ گروه شامل بار ثقلی، مشخصات فولاد مورد استفاده و بار ضربه‌ای ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین طبقه‌بندی شده‌اند. این متغیرها شامل: مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته مصالح، بارهای زنده، مرده و ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین می‌باشند. ضمناً در این تحقیق، دوران پلاستیک به‌عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته نشده است. از یکسو شاخص‌های عملکردی سازه برای امکان نتیجه‌گیری منطقی، ثابت فرض شده‌اند تا مقایسه‌ی پارامترهای خصوصیات احتمالاتی میسر باشد و از سوی دیگر به‌طور معمول این شاخص‌ها مبتنی بر سطوح عملکردی مرتبط با سطوح خسارت، مقادیری مشخص هستند که در آئین‌نامه‌ها و مراجع فنی تعریف شده‌اند. در جدول ۳، متغیرهای تصادفی و مشخصات آماری آن‌ها شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و شکل تابع توزیع چگالی احتمال در قاب‌های خمشی فولادی موردنظر تحت بار ضربه‌ای ارائه شده است.

جدول ۳- متغیرهای تصادفی در مدل‌های قاب خمشی فولادی تحت اثر بار ضربه‌ای

مرجع	انحراف معیار یا ضریب تغییرات	میانگین	*توزیع احتمالاتی	واحد	تعریف متغیر	پارامتر	نماد متغیر	گروه
[۳۸ و ۱۰]	۰/۱	۱۵۰۰	N	kg/m	بار مرده	X <sub>1</sub>	DL	بار ثقلی
[۳۹ و ۱۰]	۰/۴	۶۰۰	G	kg/m	بار زنده	X <sub>2</sub>	LL	
[۳۹ و ۱۰]	۰/۰۷	۲۴۰	LN	MPa	مقاومت تسلیم	X <sub>3</sub>	F <sub>y</sub>	مشخصات فولاد مصرفی
[۴۱ و ۴۰]	۰/۰۳	۲*۱۰ <sup>۵</sup>	LN	MPa	مدول الاستیسیته	X <sub>4</sub>	E	
[۴۰ و ۳۵]	(kg) ۲۰۰۰	۲۰۰۰۰	N	kg	جرم	X <sub>5</sub>	M	مشخصات وسیله نقلیه
[۴۰ و ۳۵]	(km/h) ۸	۴۰	LN	km/h	سرعت	X <sub>6</sub>	V	

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



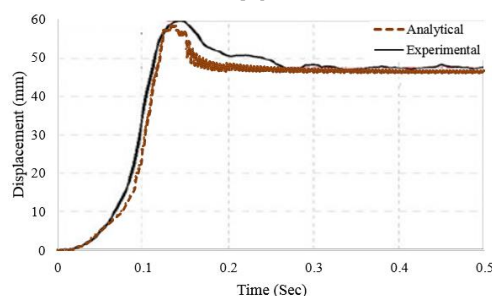
(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) سازه‌ی مدل کیم و کانگ [۸]، ب) نمای شماتیک برخورد

[۸]



شکل ۳- مقایسه‌ی منحنی جابجایی-زمان مدل تحلیلی و مدل مرجع

#### ۲-۳- بار ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین

بار ضربه‌ای، به‌صورت دینامیکی و با شدت زیاد و طی زمان کوتاهی به سازه اعمال می‌گردد. از انواع بارهای ضربه‌ای، بار ناشی از برخورد وسایل نقلیه به ستون‌های ساختمان‌های فولادی و بتنی و پایه‌های پل یا ضربه‌ی ناشی از شروع یا توقف ناگهانی جرثقیل یا آسانسور می‌باشد.

در ادامه، تابع شرایط حدی پیشنهادی ( $LSF$ ) بر مبنای معیار حداکثر دوران مجاز تیر دهانه‌ی آسیب دیده مطابق جدول ۴ و روابط (۱۶) تا (۱۸) در نظر گرفته شده است [۱۰ و ۴۱]. این حالات حدی و معیار خرابی مرتبط با ۳ سطح خسارت سازه‌های فولادی تحت اثر بارهای ناگهانی<sup>۱</sup> به صورت کم، متوسط و شدید ارائه گردیده است.

جدول ۴- معیار خرابی سازه‌های فولادی تحت بار ضربه‌ای [۱۰ و ۴۱]

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

$$LSF_1 = 0.05 - (\text{Max(Beam Rotation)}) \quad (16)$$

$$LSF_2 = 0.12 - (\text{Max(Beam Rotation)}) \quad (17)$$

$$LSF_3 = 0.25 - (\text{Max(Beam Rotation)}) \quad (18)$$

پارامتر  $Max(Beam Rotation)$  در روابط (۱۶) تا (۱۸) بیانگر حداکثر دوران مجاز تیر دهانه‌ی آسیب دیده در تحلیل غیرخطی در هر سطح خرابی (متناسب با توابع شرایط حدی مرتبط) می‌باشد. چنانچه پس از انجام تحلیل  $LSF > 0$  شود، نمونه در ناحیه‌ی سلامت و چنانچه  $LSF \leq 0$  گردد، نمونه در ناحیه‌ی خرابی قرار می‌گیرد.

## ۵- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج مربوط به تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی قاب‌های خمشی فولادی ۲ و ۵ طبقه تحت اثر ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین با استفاده از روش‌های  $MCS$ ، سوپول،  $SS$ ، کریجینگ و  $CSS$  ارائه شده است. در این روش‌ها به ترتیب  $10^5$ ،  $12000$ ،  $18000$ ،  $6000$  و  $3000$  نمونه‌ی تصادفی با توجه به نوع توزیع آماری مشخص شده برای هر متغیر مطابق جدول ۳، نمونه‌گیری شده است. سپس نتایج تحلیل حساسیت مدل‌های مورد مطالعه براساس روش‌های مبتنی بر قابلیت اطمینان مطابق جدول‌های ۵ و ۶ از دو منظر تغییرات احتمال خرابی نسبت به میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند. در نهایت، کارایی و دقت روش  $CSS$  نسبت به سایر روش‌ها با توجه به کاهش زمان اجرا و کاهش تعداد فراخوانی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی روش  $CSS$  نسبت به روش‌های  $MCS$  و  $SS$  با توجه به تعداد فراخوانی‌های تابع شرایط حدی بالاتر می‌باشد. نتایج روش  $CSS$  به روش  $MCS$  نزدیک‌تر می‌باشد. در جدول‌های ۵ و ۶ پارامترهای

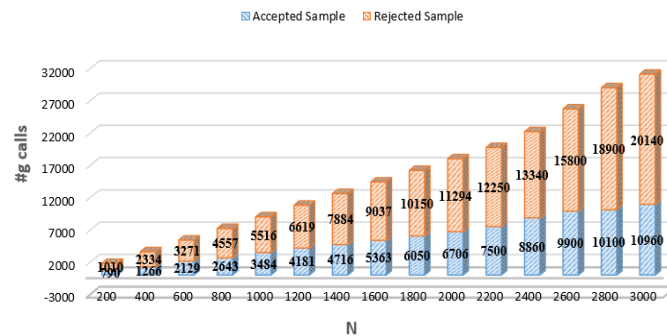
شکل‌های ۴ تا ۷ نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب و دقیق روش  $CSS$  برای محاسبه‌ی احتمال خرابی قاب‌های مورد مطالعه با توجه به تعداد نمونه‌های قابل قبول و رد شده می‌باشد. تعداد نمونه‌های قابل قبول و رد شده در قیاس با روش  $SS$  به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر است. ضریب تغییرات ( $COV$ ) هدف برای محاسبه‌ی احتمال خرابی در قاب‌های مورد مطالعه معادل ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در ادامه، درصد خطای احتمال خرابی روش‌های قابلیت اطمینان مورد مطالعه در این تحقیق نسبت به روش  $MCS$  که کاربردی‌ترین و دقیق‌ترین روش شبیه‌سازی می‌باشد، مطابق شکل‌های ۸ و ۹ برای توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب برای قاب‌های ۲ و ۵ طبقه ارائه شده و مشخص است که به طور کلی روش  $CSS$  کمترین درصد خطای احتمال خرابی را در کلیه‌ی توابع شرایط حدی تحت سرعت برخورد ۴۰ کیلومتر بر ساعت دارا می‌باشد. همچنین روش  $SS$  بعد از روش  $CSS$  عملکرد بهتری داشته ولی متامدل کریجینگ در زمینه‌ی تحلیل حساسیت قاب‌های مذکور مناسب نبوده است. در قاب ۲ طبقه، حداکثر و حداقل درصد خطا متعلق به روش‌های کریجینگ و  $CSS$  و به ترتیب معادل ۱۴ و ۴ درصد می‌باشد. همچنین در قاب ۵ طبقه، حداکثر و حداقل درصد خطا متعلق به روش‌های  $SS$  و  $CSS$  و به ترتیب معادل ۱۳ و ۵ درصد می‌باشد. ضمناً پارامتر دوران تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده و شاخص قابلیت اطمینان قاب‌های مدنظر مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای توابع شرایط حدی مختلف براساس روش  $CSS$  ارائه شده‌اند. مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، با افزایش ارتفاع قاب‌ها، پارامتر دوران تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده و شاخص قابلیت اطمینان به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

<sup>1</sup> Extreme Loads

جدول ۵- نتایج تحلیل حساسیت مدل قاب خمشی فولادی ۲ طبقه تحت اثر بار ضربه‌ای

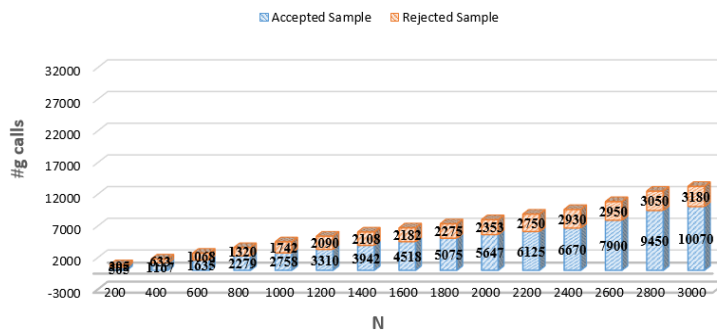
Outputs	MCS	Sobol'	SS	Kriging	CSS
$P_f$	۰/۰۰۳۲۱	-	۰/۰۰۲۹۰	۰/۰۰۳۷۰	۰/۰۰۳۴۵
$\beta$	۲/۷۲۵۵	-	۲/۷۵۸۹	۲/۶۷۸۳	۲/۷۰۱۶
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_1}}$	-۰/۰۰۹۷۵۲۳	۰/۰۰۸۳۴۵	-۰/۰۰۶۹۴۳	-۰/۰۰۷۷۵۲۳	-۰/۰۰۸۸۲۶۳
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_2}}$	-۰/۰۰۱۹۲۱۴	۰/۰۰۲۷۶۳۴	-۰/۰۰۲۱۲۴۴	۰/۰۰۳۷۰۱۴	-۰/۰۰۱۵۶۱۴
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_3}}$	-۰/۰۰۴۳۱۵۷	-۰/۰۰۳۳۴۳۷	-۰/۰۰۳۳۸۵۷	-۰/۰۰۳۴۳۱۷	-۰/۰۰۵۹۹۶
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_4}}$	-۰/۰۰۳۱۲۸۶	۰/۰۰۴۲۴۶۱	۰/۰۰۴۱۶۷۶	۰/۰۰۵۷۶۵	۰/۰۰۳۱۷۶۶
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_5}}$	۰/۳۶۲۲۱	-۰/۲۶۴۲۱	۰/۴۷۸۱	۰/۵۷۱۶	۰/۳۰۰۲۱
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_6}}$	-۰/۰۰۸۴۱۲۵	-۰/۰۰۴۱۹۶	۰/۰۰۶۶۵۴	۰/۰۰۵۷۹۴۳	-۰/۰۰۸۲۰۴۶
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_1}}$	-۰/۰۰۸۷۵۳۱۲	-۰/۰۰۷۷۳۱۹۲	-۰/۰۰۵۷۳۴۲	-۰/۰۰۶۵۴۳۱۲	-۰/۰۰۹۳۱۲
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_2}}$	-۰/۰۰۱۵۵۴۷۹	۰/۰۰۳۳۵۷۱	-۰/۰۰۳۲۱۶۲	۰/۰۰۲۴۷۲۹	-۰/۰۰۱۵۳۹۱
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_3}}$	-۰/۰۰۳۷۱۶۳۲	-۰/۰۰۴۶۷۱۹	-۰/۰۰۶۴۱۵۳	-۰/۰۰۳۷۷۳۲	-۰/۰۰۱۷۴۲۲
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_4}}$	۰/۰۰۷۱۶۴۸۳	۰/۰۰۶۱۴۱۳	۰/۰۰۳۶۴۱۲	۰/۰۰۳۴۶۸۲	۰/۰۰۵۱۷۴۳
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_5}}$	-۰/۵۴۱۲۶۸	۰/۷۴۹۲۶۱	۰/۷۶۱۲۳	-۰/۲۹۴۵۱۸	۰/۵۴۷۶۴
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_6}}$	-۰/۰۰۴۰۲۵۸	۰/۰۰۳۹۷۸۸	-۰/۰۰۱۴۶۵۸	-۰/۰۰۷۳۹۴۳	-۰/۰۰۶۰۴۲۸
# g calls	۱۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۰	۶۰۰۰	۳۰۰۰

## SS



شکل ۴- تعداد نمونه‌های قابل قبول و رد شده در روش SS برای قاب ۲ طبقه

## CSS



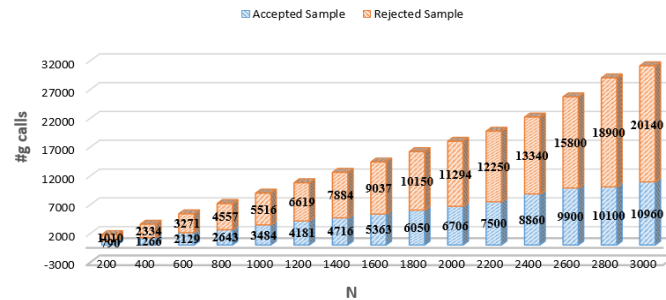
شکل ۵- تعداد نمونه‌های قابل قبول و رد شده در روش CSS برای قاب ۲ طبقه



جدول ۶- نتایج تحلیل حساسیت مدل قاب خمشی فولادی ۵ طبقه تحت اثر بار ضربه‌ای

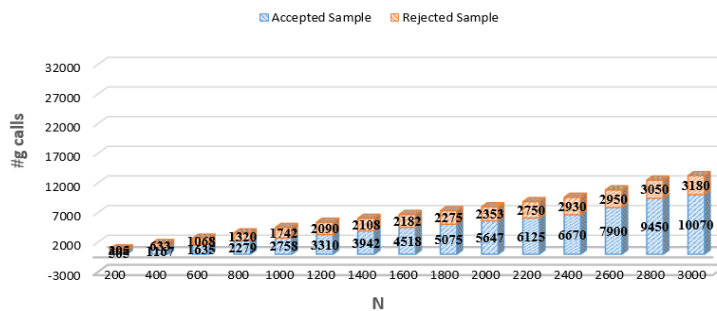
Outputs	MCS	Sobol'	SS	Kriging	CSS
$P_f$	۰/۰۰۳۷۵	-	۰/۰۰۳۲۵	۰/۰۰۴۳۰	۰/۰۰۴۰۵
$\beta$	۲/۶۷۳۸	-	۲/۷۲۱۴	۲/۶۲۷۶	۲/۶۴۷۹
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_1}}$	۰/۰۰۲۲۴	۰/۰۰۳۰۱	۰/۰۰۲۴۸	۰/۰۰۳۸۸	۰/۰۰۱۶۹
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_2}}$	۰/۰۰۱۰۲۲۳	۰/۰۰۸۵۳	۰/۰۰۷۱۲	۰/۰۰۸۰۵	۰/۰۰۹۱۱
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_3}}$	-۰/۰۴۵۵	-۰/۰۳۴۸	-۰/۰۳۵۳	-۰/۰۳۶۱	-۰/۰۶۳۳
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_4}}$	۰/۰۰۳۲۳	۰/۰۰۴۴۴	۰/۰۰۴۳۳	۰/۰۰۵۸۹	۰/۰۰۳۴۵
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_5}}$	۰/۳۷۸	۰/۲۷۸	۰/۵۰۴	۰/۵۹۲	۰/۳۲۴
$\frac{\partial P_f}{\partial \mu_{x_6}}$	۰/۰۸۸۸	۰/۰۴۳۳	۰/۰۶۸۶	۰/۰۵۹۰	۰/۰۸۴۴
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_1}}$	۰/۰۰۸۸۵	۰/۰۰۷۹۶	۰/۰۰۵۹۱	۰/۰۰۶۷۶	۰/۰۰۷۹۲
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_2}}$	۰/۰۰۱۶۵	۰/۰۰۳۶۵	۰/۰۰۳۵۵	۰/۰۰۲۶۷	۰/۰۰۱۷۷
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_3}}$	-۰/۰۰۳۸۹	۰/۰۰۴۸۷	۰/۰۰۶۷۲	۰/۰۰۵۵۷	۰/۰۰۱۹۳
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_4}}$	۰/۰۰۷۲۵	۰/۰۰۶۲۹	۰/۰۰۳۸۹	۰/۰۰۳۶۹	۰/۰۰۵۳۸
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_5}}$	۰/۵۵۱	۰/۷۷۱	۰/۷۹۰	۰/۳۲۱	۰/۵۶۵
$\frac{\partial P_f}{\partial \sigma_{x_6}}$	۰/۰۴۲۲	۰/۰۴۱۱	۰/۰۱۶۷	۰/۰۷۴۶	۰/۰۶۲۳
# g calls	۱۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۰	۶۰۰۰	۳۰۰۰

SS

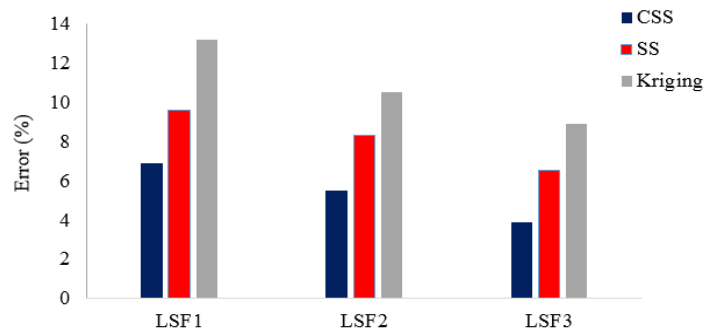


شکل ۶- تعداد نمونه‌های قابل قبول و رد شده در روش SS برای قاب ۲ طبقه

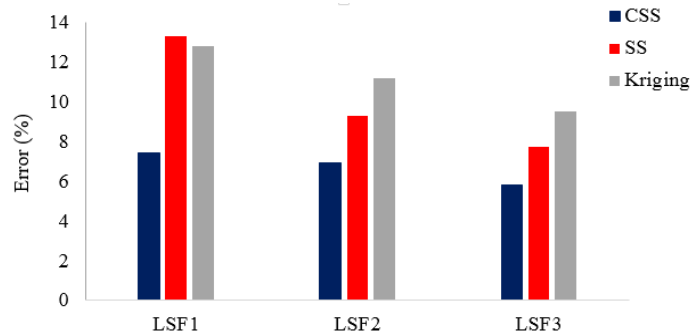
CSS



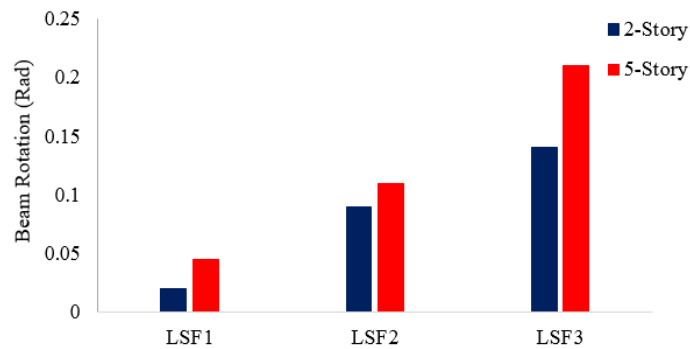
شکل ۷- تعداد نمونه‌های قابل قبول و رد شده در روش CSS برای قاب ۲ طبقه



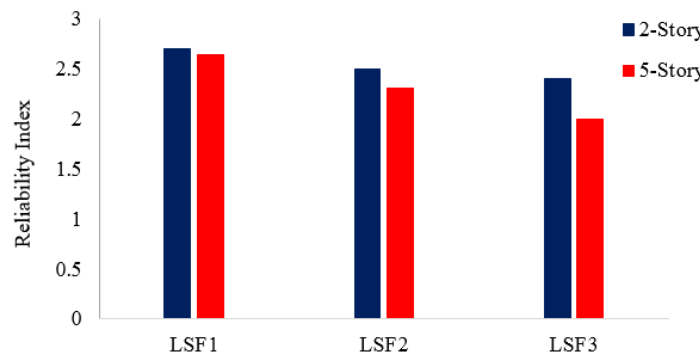
شکل ۸- درصد خطای روش‌های شبیه‌سازی نسبت به روش *MCS* در قاب ۲ طبقه تحت توابع شرایط حدی مختلف



شکل ۹- درصد خطای روش‌های شبیه‌سازی نسبت به روش *MCS* در قاب ۵ طبقه تحت توابع شرایط حدی مختلف



شکل ۱۰- پارامتر دوران تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده در روش *CSS* برای قاب‌های ۲ و ۵ طبقه تحت توابع شرایط حدی مختلف



شکل ۱۱- شاخص قابلیت اطمینان در روش *CSS* برای قاب‌های ۲ و ۵ طبقه تحت توابع شرایط حدی مختلف

- با بررسی پارامتر دوران تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده بر اساس روش *CSS*، افزایش دوران تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده‌ی قاب ۵ طبقه نسبت به ۲ طبقه تحت توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب معادل ۵۵، ۱۸ و ۳۳ درصد می‌باشد.
- حداکثر درصد خطای روش *CSS* نسبت به روش *MCS* در قاب ۵ طبقه نسبت به ۲ طبقه تحت توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  معادل ۵/۸۲، ۴/۲۴ و ۲/۴۱ می‌باشد.

### مراجع

- [1] Mehdizadeh K, Sadeghi A, Hashemi S.V. The Performance Investigation of Steel Moment Frames with Knee Braces subjected to Vehicle Collision. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2019. (In Persian).
- [2] Sadeghi A, Kazemi H, Samadi M. Reliability Analysis of Steel Moment-Resisting Frame Structure under the Light Vehicle Collision. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2020. (In Persian).
- [3] Porter KA, Beck JL, Shaikhutdinov RV. Sensitivity of building loss estimates to major uncertain variables. *Earthquake Spectra*. 2002; 18(4): 719–743.
- [4] Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression. *Engineering Structures*. 2009; 31(6): 1344–1348.
- [5] Kim J, Park J, Lee T. Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss. *Engineering Structures*. 2011; 33(2): 421–432.
- [6] Hajirasouliha I, Pilakoutas K, Mohammadi RK. Effects of uncertainties on seismic behavior of optimum designed braced steel frames. *Steel and Composite Structures*. 2016; 20(2): 317–335.
- [7] Kim J, Kang H. Progressive Collapse of Steel Moment Frames Subjected to Vehicle Impact. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015; 29(6).
- [8] Kim J, Kang H. Response of a steel column-footing connection subjected to vehicle impact. *Structural Engineering and Mechanics*. 2017; 63(1): 125–136.
- [9] Hadianfard MA, Malekpour S, Momeni M. Reliability analysis of H-section steel columns under blast loading. *Structural Safety*. 2018; 75: 45–56.
- [10] Javidan MM, Kang H, Isobe D, Kim J. Computationally efficient framework for probabilistic collapse analysis of structures under extreme actions. *Engineering Structures*. 2018; 17(2): 440–452.
- [11] Kala Z, Valeš J. Imperfection sensitivity analysis of steel columns at ultimate limit state.

نتایج تحلیل حساسیت قاب‌های خمشی فولادی مطابق جدول‌های ۵ و ۶ با تعداد فراخوانی مشخص تابع شرایط حدی برای روش‌های *MCS*، سوپول، *SS*، کریجینگ و روش *CSS* ارائه شده است و با ارزیابی نرخ تغییرات احتمال خرابی نسبت به تغییرات هر متغیر تصادفی انجام شده و نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که برای سازه‌های موردنظر تحت بار ضربه‌ای، پارامترهای دارای عدم قطعیت جرم و سرعت وسیله‌ی نقلیه و مقاومت تسلیم مقاطع بیشترین اثر و مدول الاستیسیته مصالح و بار ثقلی زنده‌ی قاب کمترین اثر را بر محاسبه‌ی احتمال خرابی داشته‌اند.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی احتمالاتی ایمنی در قاب‌های خمشی فولادی کوتاه مرتبه‌ی ۲ و ۵ طبقه در نرم‌افزار *OpenSees* تحت اثر ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین پرداخته شده و تحلیل حساسیت پارامترهای خروجی قاب‌های مذکور با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان نظیر روش‌های *MCS*، سوپول، *SS*، کریجینگ و *CSS* در نرم‌افزار *MATLAB* محاسبه شده است. سپس تأثیر پارامترهای تصادفی بر احتمال خرابی بررسی گردیده است. در نهایت توابع شرایط حدی بر مبنای حداکثر دوران مجاز تیر دهانه‌ی آسیب‌دیده‌ی قاب‌ها ارائه گردیده و در نهایت، احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان قاب‌های مذکور تحت اثر ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله‌ی نقلیه‌ی سنگین با سرعت برخورد ۴۰ کیلومتر بر ساعت بررسی و مقایسه شده است. دذر تحقیق حاضر، کلیه‌ی نتیجه‌گیری‌ها و یافته‌های ارائه شده در محدوده‌ی قاب‌های مورد مطالعه می‌باشد. در ادامه، با ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل‌های احتمالاتی موارد ذیل قابل ذکر است:

- نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که جرم و سرعت وسیله‌ی نقلیه و مقاومت تسلیم مقاطع بیشترین اثر و بار ثقلی زنده‌ی قاب‌ها کمترین اثر را در محاسبه‌ی احتمال خرابی سازه‌های مورد نظر داشته‌اند.
- نتایج ارزیابی احتمالاتی و تحلیل قابلیت اطمینان نشان می‌دهد که با توجه به مقدار کم احتمال خرابی قاب‌ها تحت اثر ضربه‌ی ناشی از وسیله‌ی نقلیه، روش *CSS* با تعداد نمونه‌ی کمتر و زمان اجرای کوتاه‌تر، احتمال خرابی را با خطای قابل قبولی نسبت به روش *MCS* تخمین زده است.
- با محاسبه‌ی احتمال خرابی تحت سرعت برخورد ۴۰ کیلومتر بر ساعت برای قاب‌های مورد مطالعه، مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع قاب، احتمال خرابی افزایش یافته است. شاخص قابلیت اطمینان قاب ۵ طبقه نسبت به ۲ طبقه تحت توابع  $LSF_1$ ،  $LSF_2$  و  $LSF_3$  به ترتیب معادل ۲، ۸ و ۱۷ درصد کاهش یافته است.

- problems. *Applied Mathematical Modelling*. 2018; 57: 37–51.
- [26] Rashki M. Hybrid control variates-based simulation method for structural reliability analysis of some problems with low failure probability. *Applied Mathematical Modelling*. 2018; 60: 220–234.
- [27] Sobol, I.M., Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models, *Mat Model*, 1990; 2(1): 112–118.
- [28] Sobol IM. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Math Comput Simul*. 2001; 55: 271–280.
- [29] Behnam rad G, Shariatmadar H. Subset Simulation Method in Active Structural Control. *Journal of Modeling in Engineering*. 2018; 16(53): 279–288. (In Persian).
- [30] MiarNaeimi F, Azizyan G, Rashki M. Reliability sensitivity analysis method based on subset simulation hybrid techniques. *Applied Mathematical Modelling*. 2019; 75: 607–626.
- [31] Kaymaz I. Application of kriging method to structural reliability problems. *Structural Safety*. 2015; 27: 133–51.
- [32] BHRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, 2014. (In Persian).
- [33] INBC. Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6, 2013. (In Persian).
- [34] INBC. Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10, 2013. (In Persian).
- [35] CEN (European Committee for Standardization), Eurocode 1: actions on structures, part 1–7: general actions – accidental actions. Brussels. 2006.
- [36] Mestrovic D, Cizmar D, Miculinic L. Reliability Of Concrete Columns Under Vehicle Impact. *Journal of WIT Transactions on The Built Environment*. 2008; 98: 157–165.
- [37] Georgiev GZ. Impact Force Calculator. 2020. <https://www.gigacalculator.com/calculators/impact-force-calculator.php>.
- [38] Ellingwood B, Galambos TV, MacGregor JG, Cornell CA. 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.
- Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2018; 18(4): 1207–1218.
- [12] Naji A. Sensitivity and fragility analysis of steel moment frames subjected to progressive collapse. *Asian J Civ Eng*. 2018; 19: 595–606.
- [13] Moradi M, Tavakoli H. Evaluation of the seismic sensitivity of steel frame with converging bracing to random variables. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2020. (In Persian).
- [14] Moradi M, Tavakoli H, Abdolazhade G. Sensitivity analysis of RC frame failure time in fire conditions after removal column under progressive collapse. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2019. (In Persian).
- [15] Santos AF, Santiago A, Latour M, Rizzano G. Robustness analysis of steel frames subjected to vehicle collisions. *Structures*. 2020; 25: 930–942.
- [16] Sadeghi A, Kazemi H, Samadi M. The Probabilistic Analysis of Steel Moment-Resisting Frame Structures Performance under Vehicles Impact. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2020. (In Persian).
- [17] Kim J, Lee S, Choi H. Progressive collapse resisting capacity of moment frames with viscous dampers. *The Structural Design of Tall Special Buildings*. 2013; 22(5): 399–414.
- [18] Feng F. 3D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings — Parametric study. *Engineering Structures*. 2010; 32(2): 3974–3980.
- [19] OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation Manual, Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley. CA. 2007. <http://opensees.berkeley.edu>.
- [20] MATLAB (matrix laboratory), Multi paradigm numerical computing environment and proprietary programming language developed by Math Works. 2013. <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
- [21] Melchers RE, Ahammed MA. Fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability. *Computers & Structures*. 2004; 82(1): 55–61.
- [22] Karamchandani A, Cornell CA. Sensitivity estimation with first and second order reliability method. *Structural Safety*. 1991; 11(1): 59–74.
- [23] Wu YT, Mohanty S. Variable screening and ranking using sampling-based sensitivity measures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006; 91(6): 634–647.
- [24] Metropolis N, Ulam S. the Monte Carlo Method, *Journal of the American Statistical Association*. 1949; 44(247): 335–341.
- [25] Keshtegar B, Hao P. Enriched self-adjusted performance measure approach for reliability-based design optimization of complex engineering

[39] JCSS (Joint Committee on Structural Safety), Probabilistic model code. 2001.

[40] CEN (European Committee for Standardization). EN 10034: Structural steel I and H sections – tolerances on shape and dimensions. Brussels. 1993.

[41] Conrath EJ, Krauthammer T, Marchand KA, Mlakar PF. Structural design for physical security – state of the practice. New York: ASCE. 1999.

# Sensitivity based Reliability Analysis of Steel Moment-Resisting Frame Structures under the Impact of the Heavy Vehicle Collision

Abbasali Sadeghi

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

\*Hamid Kazemi

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

Maysam Samadi

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

[kazemi0518@mshdiau.ac.ir](mailto:kazemi0518@mshdiau.ac.ir)

## Abstract

Over recent decades, regarding the spread of unusual events such as fires, explosions, and vehicle collisions, the study of the behavior of structures subjected to abnormal loadings has been taken into account by the researchers and structural engineers. In this study, 2 and 5-story steel moment-resisting frame structures have been considered under the heavy vehicle collision impact. They are modeled in OpenSees software two-dimensionally with regarding to uncertainty in materials and applied loads and the sensitivity based reliability analysis of the studied random parameters is performed in Matlab software. Then, the effect of each of the variables is investigated using simulation-based methods according to limit state functions based on the maximum permitted beam rotation of damaged bay of frames. The results of this study presented that the random variables such as mass and velocity of vehicle and yield strength of material were the most influential parameters in calculating the failure probability in representative structures. Also, the control variates-based subset simulation (CSS) method compared to Monte Carlo Simulation (MCS) approach estimated the failure probability with permissible error rate, less sample number and the minimum computer processing time duration. Furthermore, the results of this research indicated that by increasing the number of stories of the building, the probability of its failure due to vehicle collision increased. According to the results of this study, the value of beam rotation of damaged bay parameter of the 5-story frame compared to 2-story one has increased by 55, 18 and 33% under the LSF1, LSF2 and LSF3 functions, respectively.

**Keywords:** Impact, Steel Moment-Resisting Frame, Heavy Vehicle Collision, Sensitivity based Reliability Analysis.