

F. Safari Honar

School of Civil Engineering, Iran
University of Science and
Technology.

e-mail:

fatemesafarieng@yahoo.com

**E. Mohammadi
Dehcheshmeh**

School of Civil Engineering, Iran
University Science and
Technology.

e-mail:

esmaeil_mohammadi@civileng.iust.ac.ir

V. Broujerdian*

Assistant Professor, School of
Civil Engineering, Iran
University Science and
Technology.

e-mail:

broujerdian@iust.ac.ir

M. Torabi

School of Civil Engineering, Iran
University of Science and
Technology.

e-mail:

mehrantorabi.best@gmail.com

Nonlinear Dynamic Behavior of Three-Dimensional Moment Steel Frames and Dual System under Vehicle Impact

In this study, the potential of progressive collapse of a four-story steel structure due to the collision of an 8-ton truck with the ground floor columns was investigated. For this purpose, a 4-story steel structure (with intermediate steel moment frame system and special concentric steel bracing in the x-direction and intermediate steel moment frame system in the y-direction) was modeled and designed in ETABS software. ABAQUS finite element software was used to simulate the structure under collision scenarios. In this research, 6 scenarios of truck collision with adjacent columns of the structure have been considered by performing nonlinear dynamic analyzes. The vehicle speed is assumed to be 20 meters per second. The results showed that corner columns are more vulnerable to impact than perimeter columns. The presence of braces reduces the collapse and deformation in the desired scenario. The horizontal displacement in the impacted column in the direction of the moment frame was about 3 times that of in the direction of the dual system. this shows the positive effect of bracing system in reducing the structural responses to impact.

Keywords: Progressive Collapse, Impact, Truck Collision, Nonlinear Dynamic Analysis, ABAQUS.

* Corresponding author

Received 21 August 2021, Revised 18 September 2021, Accepted 12 October 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7270.1287

رفتار دینامیکی غیر خطی قاب‌های خمشی و دوگانه فولادی سه‌بعدی تحت اثر برخورد وسیله نقلیه

خرابی پیشرونده شاخه‌ای از تحقیقات است که در چند سال اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این تحقیق به بررسی پتانسیل تخریب پیشرونده سازه فولادی چهار طبقه تحت اثر برخورد کامیون دارای وزن ۸ تن نیرو با ستون‌های طبقه همکف پرداخته شده است. سرعت وسیله نقلیه برابر با ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. این سازه فولادی چهار طبقه (در یک‌جهت دارای سیستم قاب خمشی فولادی متوسط و مهاربند همگرای ویژه فولادی و جهت دیگر دارای سیستم قاب خمشی فولادی متوسط) در نرم‌افزار ETABS مدل‌سازی و طراحی گردید. برای شبیه‌سازی سازه تحت سناریوهای برخورد از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. مدل‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شد. در این تحقیق، شش سناریوی برخورد کامیون به ستون‌های مجاور مختلف سازه با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که ستون‌های گوشه نسبت به ستون‌های پیرامونی در برابر برخورد آسیب‌پذیرتر هستند. همچنین وجود مهاربندها باعث کاهش خرابی و تغییر شکل در سناریوی موردنظر می‌شود. به‌طوری‌که جابه‌جایی افقی در ستون گوشه مورد ضربه در سناریوی چهار (در جهت قاب خمشی) حدود سه برابر سناریوی یک (در جهت سیستم دوگانه) است. این موضوع تأثیر مثبت مهاربند را در کاهش پاسخ‌های سازه در مقابل ضربه نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: تخریب پیشرونده، ضربه، برخورد کامیون، تحلیل دینامیکی غیرخطی، ABAQUS

فاطمه صفری هنر

کارشناسی ارشد مهندسی سازه،
دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه علم و صنعت ایران.

پست الکترونیک:

fatemesafarieng@yahoo.com

اسماعیل محمدی

ده‌چشمه

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله،
دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه علم و صنعت ایران.

پست الکترونیک:

esmaeil_mohammadi
@civileng.iust.ac.ir

وحید بروجردیان*

استادیار گروه سازه، دانشکده
مهندسی عمران، دانشگاه علم و
صنعت ایران.

پست الکترونیک:

broujerdian@iust.ac.ir

مهران ترابی

کارشناسی ارشد مهندسی زلزله،
دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه علم و صنعت ایران.

پست الکترونیک:

mehrantorabi.best
@gmail.com

۱- مقدمه

خرابی پیشرونده، گسترش خرابی‌های زنجیروار در یک سازه است که از حداقل یک عضو بحرانی سازه شروع شده و در نهایت، موجب خرابی کل سازه یا بخش وسیعی از آن می‌شود [۱]. وقتی که یک عضو باربر سازه‌ای دچار شکست یا از دست دادن مقاومت می‌شود، بار عضو از طریق مسیری جایگزین به اعضای مجاور منتقل می‌شود. آزاد شدن انرژی داخلی به دلیل حذف یا آسیب عضو

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۵/۳۰، بازنگری ۱۴۰۰/۰۶/۲۷، پذیرش ۱۴۰۰/۰۷/۲۰.
(DOI): 10.22091/cer.2021.7270.1287 شناسه دیجیتال

سازه‌ای منجر به افزایش نیروهای داخلی دینامیکی در اعضای مجاور می‌شود. یکی از عواملی که باعث ایجاد ضربه در سیستم می‌شود، برخورد وسیله نقلیه با ستون‌های سازه است. موضوع برخورد کامیون به ستون‌های سازه‌ای جزو بررسی تعدادی از محققان در چند سال گذشته بوده است [۲ و ۳]. روش‌ها و رویکردهای متفاوتی برای بررسی رفتار و خرابی این اعضا در حین ضربه توسعه داده شده است.

در سال ۱۹۶۸ نشت گاز در ساختمان رونان پینت^۱ باعث ایجاد خرابی پیشرونده در این سازه شد. به دنبال آن توجه محققین زیادی به موضوع خرابی پیشرونده جلب شد. پس از آن در سال ۱۹۷۳ در ساختمان تجاری پلازا^۲ به هنگام بتن‌ریزی، خرابی پیشرونده رخ داد. از نمونه‌های دیگر تخریب پیشرونده در چند دهه گذشته، بمب‌گذاری ساختمان مورا^۳ در سال ۱۹۹۵، برج‌های خوار در عربستان سعودی در سال ۱۹۹۶ و تخریب مرکز تجارت جهانی WTC در سال ۲۰۰۱ را می‌توان نام برد [۱].

پژوهشگران عملکرد ساختمان فولادی با قاب خمشی را تحت اثر بار ضربه‌ای بررسی کردند. نتایج این تحقیق‌ها نشان داد که اثر بارهای ضربه‌ای بر سازه، بیشتر از بارهای استاتیکی است. انرژی منتقل شده به سازه در اثر بارهای ضربه‌ای باعث خرابی در سازه می‌شود و در بارهای ضربه‌ای سرعت همراه با نیرو باعث پاسخ‌های غیرخطی می‌شود. این در حالی است که، اکثر آیین‌نامه‌ها بار ضربه‌ای را به صورت بار استاتیکی معادل در نظر می‌گیرند. همچنین خرابی به دست آمده از برخورد با ستون گوشه بسیار بیشتر از برخورد با ستون پیرامونی است [۴، ۵ و ۶].

کیان^۴ و همکاران، فقیه ملکی و همکاران، لیو و ژو^۵، جیانگ و جیان^۶ نشان دادند که وجود مهاربندها می‌تواند

باعث کاهش پاسخ دینامیکی سازه در برابر حذف ستون و اتلاف انرژی شود. از این‌رو، استفاده از مهاربندها در سیستم سازه‌ای، مقاومت سازه در برابر تخریب پیشرونده را افزایش می‌دهد [۷-۱۱]. سلماسی و شیدایی به بررسی تأثیر نوع مهاربند (شورون، X شکل و V شکل) بر خرابی پیشرونده در یک ساختمان فولادی شش طبقه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مهاربند شورون، به دلیل فراهم کردن مسیرهای جایگزین مناسب، بیشتر و توانایی بهتر توزیع مفاصل پلاستیک در سازه، نسبت به مهاربندهای V شکل و X شکل در برابر خرابی پیشرونده مقاوم‌تر است [۱۲].

اخیراً موضوع ضربه وسیله نقلیه با پایه‌های پل‌ها مورد مطالعه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این راستا، کو^۷ و همکاران و آیونگ^۸ و همکاران به بررسی رفتار پایه پل تحت اثر برخورد وسیله نقلیه پرداختند. در این مطالعه برای طراحی پل‌ها از روش طراحی ظرفیت استفاده شده است. این روش، به عنوان یک روش جدید برای پایه‌های آسیب‌پذیر در برابر برخورد کامیون سنگین ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که استفاده از این روش طراحی، خرابی برشی در پل‌ها را در اثر برخورد وسیله نقلیه به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. در پایان نشان دادند که پارامترهای سرعت وسیله نقلیه، قطر پایه پل و آرماتورهای عرضی، بر عملکرد پایه پل‌ها به هنگام برخورد وسیله نقلیه تأثیرگذار است [۳ و ۱۳].

محققان دیگری نیز خرابی پیشرونده را در قاب‌های خمشی فولادی ارزیابی نمودند. آنها نشان دادند که حذف ستون در طبقات بالاتر نسبت به طبقه اول، باعث جابه‌جایی عمودی بیشتری می‌شود. همچنین آنالیز استاتیکی به دلیل در نظر نگرفتن اثر دینامیکی، ظرفیت بیشتری را برای مدل پیش‌بینی می‌کند. در تحقیقات

^۶ - Jiang and jian

^۷ - Cao

^۸ - Auyeung

^۱ - Ronan Point

^۲ - Skyline plaza

^۳ - Murrah Federal Building

^۴ - Qian

^۵ - Liu and Zhu

مذکور با افزایش تعداد طبقات پتانسیل خرابی پیشرونده کاهش یافته است. همچنین با کاهش طول دهانه، مقاومت سازه در برابر تخریب پیشرونده افزایش می‌یابد [۱۴ و ۱۵]. همچنین ژی^۹ و همکاران رفتار قاب فولادی سه‌طبقه را تحت اثر سناریو حذف ناگهانی ستون بررسی نمودند. نتایج نشان داد که سازه تغییرشکل دینامیکی زیادی را تحمل کرده است و مسیر جایگزین در تیرها به‌ویژه تیرهای طبقه اول ایجاد گردیده است [۱۶].

۱-۱- هدف تحقیق

در بیشتر مطالعات گذشته، به عامل تخریب پیشرونده توجهی نشده است [۴ و ۱۴]. یکی از عوامل ایجاد تخریب پیشرونده برخورد وسیله نقلیه با ستون سازه است. معمولاً در بررسی سازه‌ها در مقابل تخریب پیشرونده، سازه‌های کوتاه‌مرتبه در مقابل این پدیده، بحرانی‌تر هستند [۱۴ و ۱۵]. در این تحقیق به بررسی یک ساختمان کوتاه‌مرتبه چهار طبقه (در یک‌جهت دارای سیستم قاب خمشی فولادی متوسط و مهاربند همگرای ویژه فولادی و در جهت دیگر دارای سیستم قاب خمشی فولادی متوسط) پرداخته شده است. بدین منظور، شش سناریوی مختلف برخورد کامیون (دارای جرم ۸ تن و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه) با ستون‌های در موقعیت مجاور سازه در نرم‌افزار ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها به‌صورت سه‌بعدی با لحاظ اثر غیرخطی مصالح و هندسه انجام شده است. تحلیل‌های مورد بررسی شامل سناریوهای برخورد به‌صورت دینامیکی غیرخطی می‌باشد. در نهایت، تنش‌های ایجاد شده در اعضای مهاربند و چشمه اتصال ناشی از ضربه مورد بررسی قرار گرفته شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی روش طراحی

در تحقیق حاضر ابتدا به تحلیل و طراحی یک سازه فولادی چهار طبقه در نرم‌افزار ETABS طبق آیین‌نامه‌های موجود لرزه‌ای پرداخته شده است. سپس صحت‌سنجی توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی ABAQUS مطابق پژوهش‌های قبلی صورت گرفته است. مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها، که از طراحی تعیین شده است، جهت بررسی تخریب پیشرونده در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی گردیده است. در این تحقیق شش سناریوی ضربه در سازه موردنظر مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. در نهایت، موقعیت ستون مورد ضربه و تأثیر مهاربند در شش سناریوی مورد بررسی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۲- نحوه مدل‌سازی

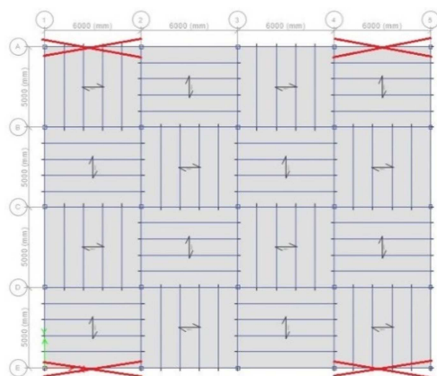
ساختمان مورد بررسی، ساختمانی فولادی چهار طبقه است که دارای پلان یکسان در طبقات می‌باشد. فواصل دهانه‌ها در راستای x ۶ متر، در راستای y ۵ متر و ارتفاع طبقات $3/2$ متر در نظر گرفته شده است. سقف سازه از نوع کامپوزیت می‌باشد. سیستم باربر جانبی این سازه در راستای x سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی متوسط و مهاربند همگرای ویژه فولادی و در راستای y ، قاب خمشی فولادی متوسط است. در شکل ۱ پلان و نمای سه‌بعدی ساختمان مورد نظر نشان داده شده است. طراحی سازه با استفاده از نرم‌افزار ETABS و آیین‌نامه‌های AISC، ASCE7 و استاندارد لرزه‌ای ۲۸۰۰ ایران صورت گرفته است [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. محل ساختمان در تهران با شتاب مبنای زلزله طراحی ۰/۳۵ است. همچنین نوع خاک محل پروژه، C، مطابق ASCE7 می‌باشد. بار مرده اضافی^{۱۰}، زنده و پارتیشن طبقات به ترتیب برابر با ۰/۰۲۱، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱ نیوتن بر میلی‌مترمربع در نظر گرفته شده است. بار مرده اضافی و

¹⁰- Super dead

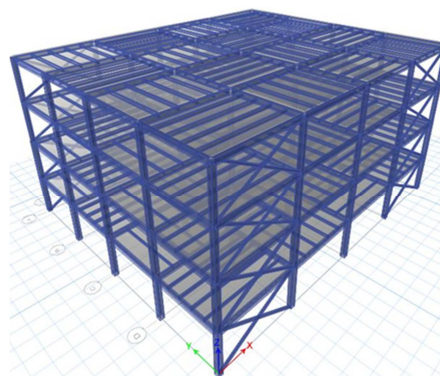
⁹- Xie

نیوتن بر میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نتایج طراحی ساختمان مذکور در جدول ۱ نشان داده شده است.

زنده بام نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۰۲۵ و ۰/۰۰۱۵ نیوتن بر میلی‌مترمربع فرض شده است. بار مرده دیوارهای پیرامونی طبقات و بام به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۷ و ۰/۰۰۳۵



(ب)



(الف)

شکل ۱- سازه مورد بررسی، (الف) نمای سه‌بعدی و (ب) پلان طبقات.

جدول ۱- مقاطع اعضای سازه مورد نظر

اعضا	طبقات ۱ و ۲	طبقات ۳ و ۴
ستون	BOX300X12	BOX250X10
تیر	F300X12-W220X12	F300X8-W200X12
تیر فرعی	IPE180-IPE200	IPE180-IPE200
مهاربند	2UNP120	2UNP100

میلی‌مترمربع، تنش گسیختگی ۴۸۰ مگاپاسگال و کرنش نهایی ۰/۲۱۳۵ است.

۳-۲- صحت‌سنجی

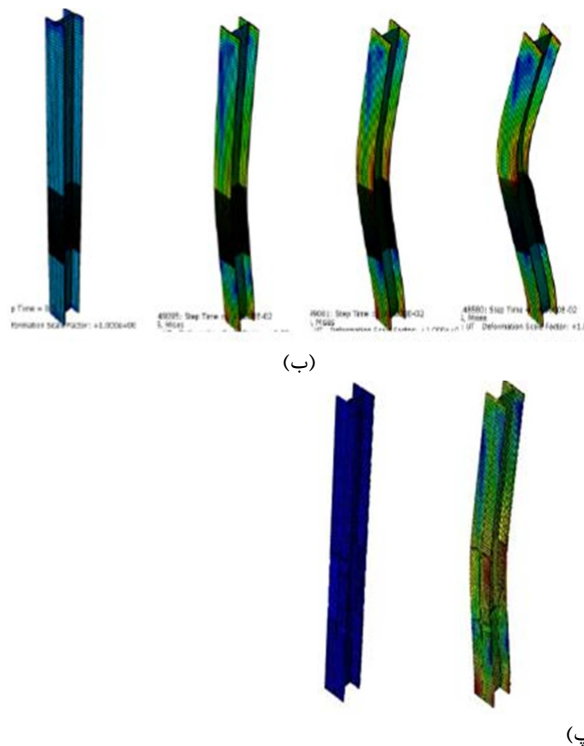
جهت بررسی روش مدل‌سازی نیاز به صحت‌سنجی نرم‌افزاری است. در این تحقیق اصلی‌ترین مسئله‌ای که می‌بایست صحت‌سنجی شود، چگونگی اعمال ضربه و درگیری تماس بین کامیون و ستون سازه فلزی است.

به‌منظور صحت‌سنجی ستون فولادی از تحقیق الثابری و ونگ^{۱۱} استفاده شده است [۲]. بار فشاری محوری در این مدل‌سازی، ۴۲۵۰۰۰۰ نیوتن در نظر گرفته شده است. طول المان ۴۰۰۰ میلی‌متر بوده و برای شبیه‌سازی تماس از ضریب اصطکاک ۰/۶ استفاده شده

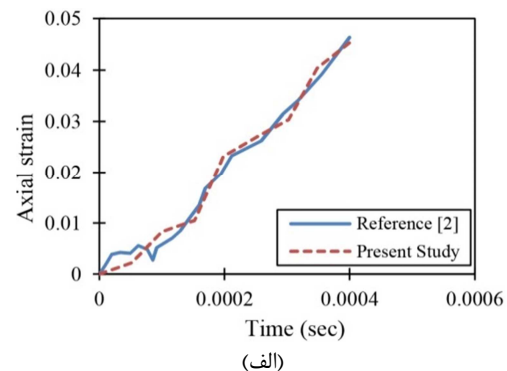
به‌عنوان مثال در جدول ۱، BOX300X12 معرف مقطع ستون به‌صورت تیوب دارای ارتفاع و عرض ۳۰۰ و ضخامت ورق ۱۲ میلی‌متر است. همچنین مقطع F300X12-W220X12 مربوط به تیر به‌صورت تیرورق با ابعاد جان ۳۰۰×۱۲ و ابعاد بال ۲۲۰×۱۲ میلی‌متر است. از طرفی، مقاطع تیرهای فرعی دارای دهانه‌های ۵۰۰ میلی‌متر از پروفیل IPE180 و در دهانه‌های ۶۰۰ میلی‌متر از پروفیل IPE200 استفاده شده است. همچنین برای مقاطع مهاربندها از دابل ناودانی استفاده شده است. به‌طور مثال 2UNP120 مربوط به دابل ناودانی ۱۲۰ است. فولاد مورد استفاده در اعضای سازه‌ای این تحقیق دارای وزن مخصوص ۷۸۵۰ e-8 نیوتن بر میلی‌مترمکعب، ضریب پواسون ۰/۳، مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ نیوتن بر میلی‌مترمربع، تنش تسلیم ۳۳۱ نیوتن بر

¹¹- Al-Thairy and Wang

شکل ۲، کانتور تنش در ستون فولادی مورد ضربه و خرابی برشی ایجاد شده در ستون مورد نظر را نشان می‌دهد. در این حالت، جرم ضربه‌زننده ۶ تن و سرعت برخورد آن ۴۰ کیلومتر بر ساعت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل‌سازی عددی مرجع با مدل‌سازی تحقیق‌ها کانتورهای تنش نسبتاً نزدیک می‌باشند [۲]. شکل ۲، مقایسه کرنش محوری تیر فولادی در نقطه ضربه در تحقیق مرجع و تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، مطابقت خوبی بین نتایج تحقیق حاضر با تحقیق مرجع مشاهده شده است.



است [۲]. کرنش پلاستیک در شروع آسیب ۰/۲۹۵، حداکثر تنش سه محوره ۱/۸۵، حداکثر نرخ کرنش ۳۲۰ یک بر ثانیه، کرنش نهایی پلاستیک ۰/۶۵ و جابه‌جایی نهایی پلاستیک ۰/۴۱۵ میلی‌متر به‌عنوان ثوابت تخریب برشی در نظر گرفته شده است. المان مورد ضربه از نوع المان C8D3R و جسم ضربه‌زننده از نوع صلب، Discrete rigid مدل‌سازی شده است و ابعاد جسم ضربه‌زننده ۵۰۰×۳۰۰×۱۵۰۰ میلی‌متر است. در ناحیه محل ضربه در المان با توجه به حساسیت بیشتر و افزایش دقت مدل‌سازی، مش‌بندی ریز انجام شده است.



شکل ۲- (الف) نمودار کرنش محوری برحسب زمان در تحقیق حاضر و تحقیق مرجع [۲]، (ب) کانتور تنش در تحقیق مرجع [۲] و (پ) کانتور تنش در تحقیق حاضر

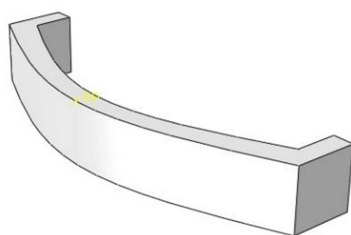
مطابق مشخصات طراحی در شبیه‌سازی است. در تخریب کششی، کرنش پلاستیک در شروع آسیب ۰/۱۱۵، حداکثر تنش سه محوره ۰/۷، حداکثر نرخ کرنش ۱۴/۲ (1/sec)، کرنش نهایی پلاستیک ۰/۱۴۵ و جابه‌جایی نهایی پلاستیک ۰/۲۹۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین در تخریب برشی، کرنش پلاستیک در شروع آسیب ۰/۲۹۵، حداکثر تنش سه محوره ۱/۸۵، حداکثر

۲-۴- مدل‌سازی ضربه

۲-۴-۱- خصوصیات مدل

در نرم‌افزار آباکوس تمامی المان‌های تیر، ستون و مهاربند از نوع المان کانتینیوم با تابع درجه ۱ و انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح وارد شده در نرم‌افزار آباکوس،

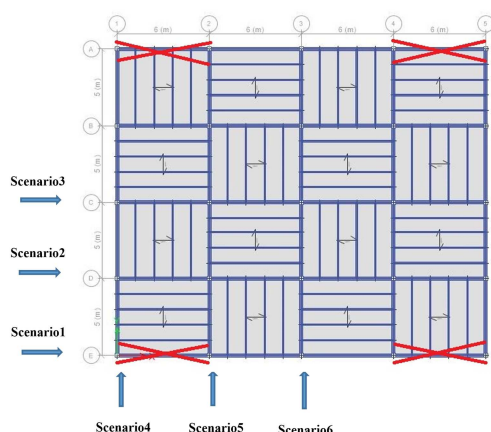
تحقیق، مش‌بندی ستون‌ها با اندازه ۵۰ میلی‌متر انجام شده است؛ اما ستون مورد ضربه به دلیل حساسیت بیشتر و برای حصول نتیجه بهتر و دقیق‌تر مش‌بندی متفاوتی از سایر ستون‌ها دارد. به این صورت که مش‌بندی در نواحی ستون مورد ضربه به ابعاد یک سانتی‌متر تغییر می‌کند. بال و جان تیرها دارای ابعاد مش‌بندی حدود ۵۰ میلی‌متر می‌باشند. مهاربندها نیز به دارای ابعاد مش‌بندی ۵۰ میلی‌متری می‌باشند.



(ب)

شکل ۳- (الف) نمای سه‌بعدی سازه مدل شده در آباکوس و (ب) ضربه زننده مدل شده

برخورد با ستون پیرامونی E2 در جهت قاب خمشی و سناریوی ۶ برخورد با ستون پیرامونی E3 در جهت قاب خمشی است.



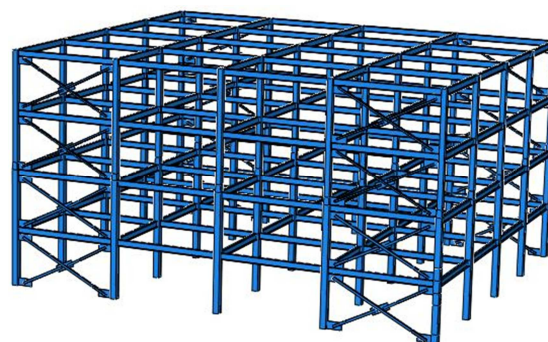
شکل ۴- موقعیت سناریوهای مختلف برای برخورد وسیله نقلیه

۳- نتایج تحقیق و بحث در نتایج

۳-۱- تنش ایجاد شده در مهاربندها تحت سناریوهای مختلف

نرخ کرنش ۳۲۰ (1/sec)، کرنش نهایی پلاستیک ۰/۶۵ و جابه‌جایی نهایی پلاستیک ۰/۴۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جهت مدل‌سازی کامیون، سپر کامیون را مدل‌سازی نموده و نوع المان به صورت Discrete rigid مدل‌سازی شده است (شکل ۳). دقت شود از تغییر شکل ایجاد شده و جذب انرژی توسط وسیله نقلیه اجتناب شده است.

مدل‌سازی سه‌بعدی سازه مورد بررسی در نرم‌افزار ABAQUS در شکل ۳ نشان داده شده است. در این

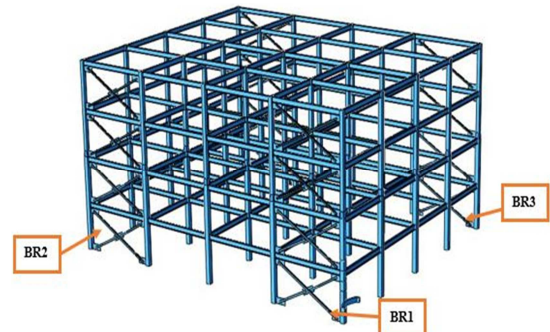


(الف)

۲-۴-۲- سناریوهای ضربه

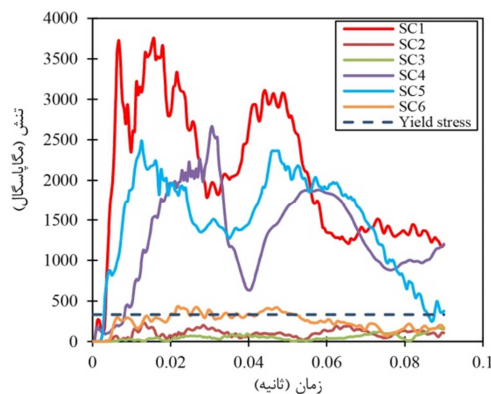
برای بررسی اثر مهاربند و موقعیت ستون مورد ضربه بر سازه مورد ضربه، شش سناریو برخورد مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. این سناریوها شامل برخورد وسیله نقلیه به ستون‌های پیرامونی و گوشه است. جهت بررسی و مقایسه سیستم قاب خمشی و سیستم دوگانه، سناریوها در دو جهت X و Y معرفی شده است. شش سناریوی موردنظر، با مشخصات ضربه زننده شامل: جرم ۸ تن، سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و ارتفاع برخورد از سطح زمین برابر با ۱۲۵۰ میلی‌متر مورد بررسی و تحقیق قرار می‌گیرد. به طوری که سناریوی ۱، مربوط به برخورد ضربه‌زننده با ستون گوشه E1 در جهت سیستم دوگانه، سناریوی ۲، برخورد با ستون پیرامونی D1 در جهت سیستم دوگانه، سناریوی ۳، برخورد با ستون پیرامونی C1 در جهت سیستم دوگانه، سناریوی ۴، برخورد با ستون گوشه E1 در جهت قاب خمشی، سناریوی ۵

جهت بررسی رفتار مهاربندها، در این تحقیق نام‌گذاری آن‌ها مطابق شکل ۵ در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. بدین منظور از نتایج تحلیل مربوط به جرم ضربه‌زننده ۸ تن، سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و موقعیت ضربه‌زننده ۱۲۵۰ میلی‌متری استفاده شده است.

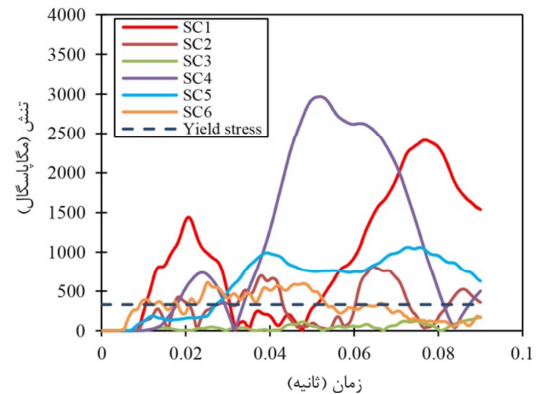


شکل ۵- موقعیت مهاربندهای مورد بررسی

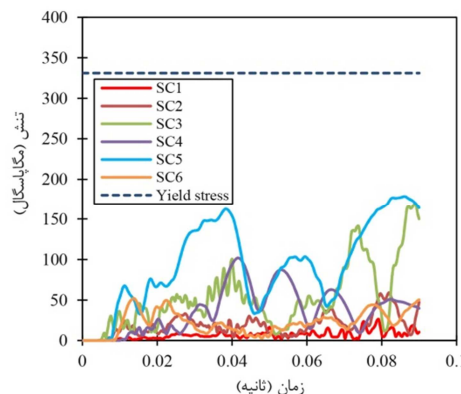
شکل ۶- الف، تنش در مهاربند نزدیک محل برخورد (BR1) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تنش در مهاربند BR1 در سناریوهای ۱، ۲، ۴ و ۵ بیشتر از تنش گسیختگی (۴۸۸ مگاپاسکال) شده است. شکل



(ب)



(الف)

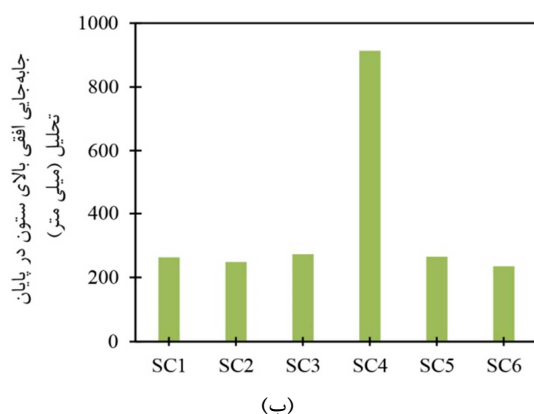


(پ)

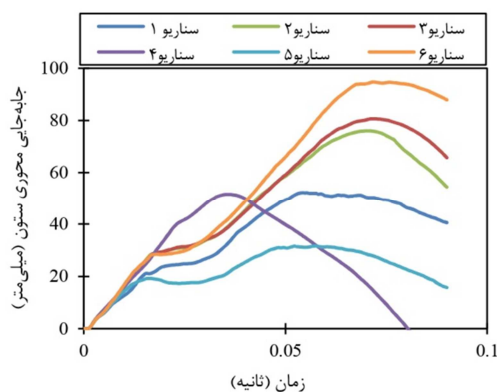
شکل ۶- نمودار تنش برحسب زمان، (الف) BR1، (ب) BR2 و (پ) BR3

پیرامونی بحرانی‌تر است، زیرا در ستون گوشه تعداد اجزای متصل (تیرها) نسبت به ستون‌های پیرامونی کمتر است. همچنین بازتوزیع نیرو کمتر صورت می‌گیرد. سناریوی ۱ نیز برخورد با ستون گوشه است، اما همانگونه که مشخص است، جابه‌جایی در این حالت نسبت به سناریوی ۴ بسیار کمتر است که این موضوع تأثیر مثبت مهاربندها بر میزان جابه‌جایی در ستون مورد ضربه را نشان می‌دهد.

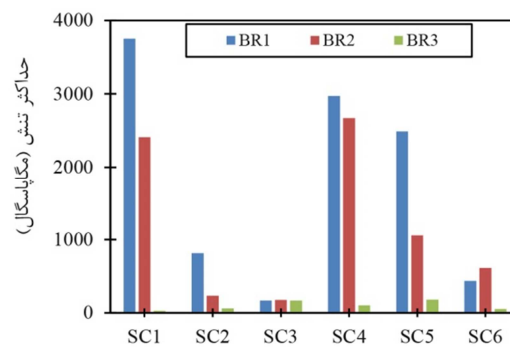
شکل ۸- ب، نمودار میله‌ای جابه‌جایی افقی در بالای ستون مورد ضربه در سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان حداکثر جابه‌جایی در سناریوی ۴، حدود سه برابر سایر سناریوها است. بنابراین میزان خرابی در این سناریو بسیار زیاد بوده و ستون گوشه در جهت قاب خمشی نسبت به سایر ستون‌ها وضعیت بحرانی‌تری دارد.



شکل ۸- نمودار جابه‌جایی افقی بالای ستون مورد ضربه (الف) برحسب زمان و (ب) در پایان تحلیل در سناریوهای مختلف



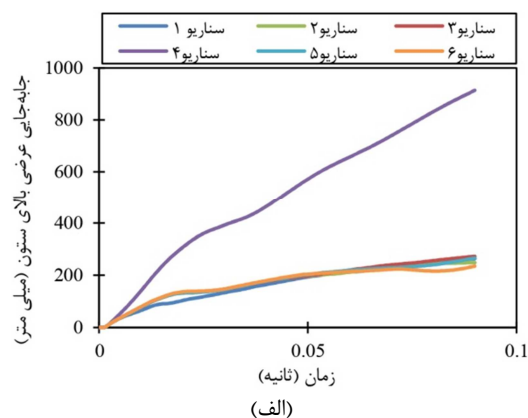
شکل ۹- نمودار جابه‌جایی محوری ستون مورد ضربه برحسب زمان در سناریوهای مختلف



شکل ۷- حداکثر تنش در BR1, BR2, BR3 و

۳-۲- بررسی جابه‌جایی در ستون مورد ضربه تحت سناریوهای مختلف

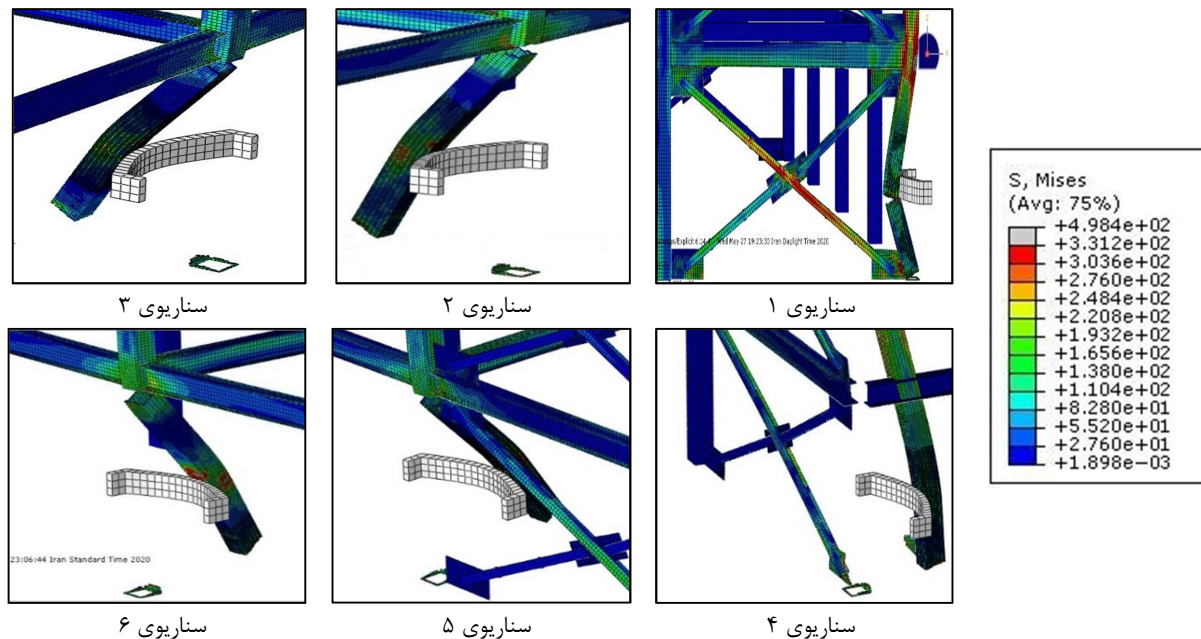
مطابق شکل ۸- الف، حداکثر جابه‌جایی افقی در ستون مورد ضربه در سناریوی ۴ رخ داده است، زیرا در این سناریو ضربه‌زننده با ستون گوشه در جهت قاب خمشی برخورد داشته است. بنابراین در قاب‌های خمشی مورد ضربه، برخورد با ستون گوشه نسبت به ستون‌های



شکل ۹، جابه‌جایی‌های قائم در بالای ستون حذف شده را نشان می‌دهد. سناریوی ۶ که مربوط به ستون پیرامونی جهت قاب خمشی است بحرانی‌تر از سایر سناریوها است. در ستون‌های جهت سیستم دوگانه نیز سناریوی ۳ مربوط به ستون پیرامونی بحرانی‌تر از نظر ایجاد جابه‌جایی هست. به‌طوری‌که جابه‌جایی محوری در ستون مورد ضربه در سناریوهای ۲ و ۳ به ترتیب ۳۴ و ۶۲ درصد نسبت به سناریو ۱ افزایش یافته است. هر دو سناریو (سناریو ۳ و ۶) مربوط به ستون‌های پیرامونی در میانه عرض قاب هستند.

۳-۳- کانتور تنش اعضای مورد آسیب تحت سناریوهای مختلف

در این تحقیق، ضربه زننده در سناریوهای مختلف با جرم ۸ تن، سرعت ۲۰ متر بر ثانیه و ارتفاع ۱۲۵۰ متر از سطح زمین در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، کانتور تنش و مکانیزم خرابی ستون‌ها تحت ضربه‌زننده‌های مختلف مشاهده می‌شود. در سناریوی ۱ شکست در محل برخورد و نیز در پایه به علت سختی بالای گاست پلیت مهاربند اتفاق افتاده است. در سناریوی ۲، ۳، ۵ و ۶، گسیختگی در بالا و پایین ستون اتفاق افتاده است. قبل از گسیختگی در نقاط موردنظر در سناریوهای ۱، ۲، ۳، ۵ و ۶، در ناحیه چشمه اتصال بالای ستون مورد برخورد، تنش‌ها فراتر از تنش تسلیم (۳۳۲ مگاپاسکال) رفته است. در این سناریوها، اگر نیروی ثقلی در تیرهای متصل به ستون مورد برخورد زیاد باشد، ممکن است



شکل ۱۰- کانتور تنش (مگاپاسکال) اعضای مورد آسیب تحت سناریوهای ضربه

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر برخورد به ستون در سیستم سازه‌های فولادی دارای قاب خمشی و سیستم دوگانه پرداخته شد. فرآیند صحت‌سنجی نرم‌افزار

گسیختگی در ناحیه اتصال اتفاق بیفتد؛ به‌طوری‌که می‌توان اثر تیرهای متصل به ستون در طبقه همکف را ناچیز در نظر گرفت. در سناریوی ۴ که مربوط به ستون گوشه در جهت قاب خمشی است، مشاهده می‌شود که گسیختگی در تیرهای متصل به ستون و نیز گسیختگی در پای ستون اتفاق افتاده است. با توجه به گسیختگی در تیرهای همکف در سناریوی ۴ و نیز عبور تنش از حد تسلیم در چشمه اتصال، می‌توان اثر تیرهای طبقه همکف را ناچیز در نظر گرفت. این موضوع برخلاف روش حذف ستون آیین‌نامه‌های GSA و UFC (حذف ستون در پایین چشمه اتصال) است [۲۰ و ۲۱]. این آیین‌نامه‌ها تخریب پیشرونده را بدون حذف چشمه اتصال بالای ستون محذوف پیشنهاد می‌دهند. حذف ستون براساس این آیین‌نامه‌ها در روش تحلیل دینامیکی با حذف ستون ناگهانی بدون در نظر گرفتن عامل آسیب انجام می‌شود.

ABAQUS با مقایسه نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. سازه‌های کوتاه‌تر مطابق تحقیقات گذشته مقاومت کمتری در مقابل پدیده تخریب پیشرونده از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق یک سازه کوتاه‌مرتبه چهار طبقه جهت بررسی در مقابل ضربه اعمالی توسط کامیون انتخاب شده

است. سازه موردنظر در نرم‌افزار عناصر محدود ETABS و مطابق آیین‌نامه‌های سازه‌های فولادی و لرزه‌ای طراحی شد. سپس شبیه‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS به صورت سه‌بعدی انجام گردید. شش سناریوی مختلف برای اعمال ضربه به ستون‌های گوشه و پیرامونی در نظر گرفته شده است. در ادامه به نتایج به دست آمده از این تحقیق پرداخته می‌شود:

۱- در سناریوی ۱ که مجاور مهاربند و در جهت سیستم دوگانه است، جابه‌جایی قائم و افقی کمتری در ستون مورد ضربه ایجاد شده است. در جهت سیستم دوگانه، هرچه فاصله از مهاربند بیشتر باشد، جابه‌جایی قائم و افقی در ستون مورد ضربه افزایش می‌یابد. به طوری که جابه‌جایی محوری در ستون مورد ضربه در سناریوهای ۲ و ۳ به ترتیب ۳۴ و ۶۲ درصد نسبت به سناریوی ۱ افزایش یافته است؛ اما در میان جابه‌جایی افقی بالای ستون در سه سناریوی مذکور تفاوت محسوسی دیده نشده است. همچنین در سناریوهایی که در جهت قاب خمشی هستند، نسبت به سناریوهایی که در جهت دوگانه هستند، جابه‌جایی قائم و افقی بیشتری در ستون مورد ضربه ایجاد شده است. به طور مثال، جابه‌جایی افقی در ستون مورد ضربه گوشه در سناریوی ۴ (در جهت قاب خمشی) حدود سه برابر سناریوی ۱ (در جهت سیستم دوگانه) است. این موضوع تأثیر مثبت مهاربند را در کاهش پاسخ‌های سازه در مقابل ضربه نشان می‌دهد. جابه‌جایی افقی ستون در سناریوی ۴ نسبت به سایر سناریوها بیشترین مقدار و حدود سه برابر سایر سناریوها است. در این سناریو برخورد با ستون گوشه و در جهت قاب خمشی است. پس ستون گوشه نسبت به ستون‌های پیرامونی در جهت قاب خمشی بحرانی‌تر است.

۲- تأثیر ضربه بر مهاربندهای طبقه همکف نشان داد که تنش در مهاربندهای نزدیک به محل ضربه بیشتر از تنش گسیختگی است که این موضوع منجر به گسیختگی کامل مهاربند شده است. درصد کاهش تنش در سناریوهای ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ در مهاربند BR1 نسبت به سناریوی ۱ به ترتیب برابر ۷۷، ۸۹، ۶۷، ۶۰ و ۹۰ درصد است. بنابراین با افزایش فاصله از محل برخورد، تنش در مهاربندها کاهش می‌یابد. به طور کلی، برخی از مهاربندها وارد ناحیه پلاستیک شده و برخی در ناحیه الاستیک باقی می‌مانند.

۳- آیین‌نامه‌های GSA و UFC تخریب پیشرونده را بدون حذف چشمه اتصال بالای ستون محذوف پیشنهاد می‌دهند. حذف ستون براساس این آیین‌نامه‌ها در روش تحلیل دینامیکی با حذف ستون ناگهانی بدون در نظر گرفتن عامل آسیب انجام می‌شود. در حالی که در تحقیق حاضر، تحلیل دینامیکی غیرخطی صورت گرفته است و مشاهده شد که چشمه اتصال دچار تسلیم می‌شود و حتی می‌تواند کارایی خود را از دست دهد که این در روند تخریب پیشرونده می‌تواند خیلی مؤثر باشد و باعث حذف اثر تیرهای متصل به محل حذف ستون شود. پس می‌توان گفت که فرض آیین‌نامه بدون حذف چشمه اتصال در بالای ستون در برخورد با جرم ضربه‌زننده زیاد، قابل قبول نیست.

در اکثر تحقیقات، موضوع تخریب پیشرونده به صورت حذف ناگهانی ستون مطرح بوده است. بیشتر روش‌های حذف ستون آیین‌نامه‌ای با فرض عدم توسعه آسیب در چشمه اتصال در سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحقیقات مربوط به تخریب پیشرونده به عامل تخریب توجهی نمی‌شود. یکی از عوامل ایجادکننده تخریب پیشرونده برخورد وسیله نقلیه با ستون سازه است. در این تحقیق به بررسی تخریب پیشرونده به صورت

پیشرونده ناشی از نیروی جانبی، پیشنهاد می‌شود حذف ستون به همراه با چشمه اتصال بالای آن صورت گیرد. این بدان معناست که از باربری تیرهای طبقه همکف به‌عنوان مسیرهای انتقال بار صرف‌نظر نمود. در ادامه تحقیق حاضر تخریب پیشرونده با حذف چشمه اتصال از روش‌های متداول آیین‌نامه‌ای پیشنهاد می‌شود.

برخورد وسیله نقلیه به ستون یک سازه فولادی چهار طبقه پرداخته شده است. عامل نیروی جانبی تخریب پیشرونده در چشمه اتصال نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد. در این حالت ممکن است بازتوزیع نیرو بین تیرها از طریق چشمه اتصال به خطر بیفتد. بنابراین برای قضاوت مهندسی بهتر سیستم‌های سازه‌ای در مقابل تخریب

مراجع

- [1] Adam, J. M., Parisi, F., Sagaseta, J., & Lu, X. (2018). "Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century", *Engineering Structures*, 173, 122-149.
- [2] Al-Thairy, H. A., & Wang, Y. C. (2014). *Behaviour and design of steel columns subjected to vehicle impact*, Trans Tech Publications Ltd, 566, 193-198.
- [3] Cao, R., El-Tawil, S., Agrawal, A. K., Xu, X., & Wong, W. (2019). "Behavior and design of bridge piers subjected to heavy truck collision", *Journal of Bridge Engineering*, 24(7), 04019057.
- [4] Kang, H., & Kim, J. (2015). "Progressive collapse of steel moment frames subjected to vehicle impact", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(6), 04014172.
- [5] Cravotta, S., & Grimalizzi, E. (2015). "Simulation of vehicle impact into a steel building: A parametric study on the impacted column end-connections", *Engineering*, Corpus ID: 106606557.
- [6] Broujerdian, V., & Torabi, M. (2017). "A Parametric Study on the Progressive Collapse Potential of Steel Buildings under Truck Collision", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 5(1), 96-106.
- [7] Qian, K., Lan, X., Li, Z., Li, Y., & Fu, F. (2020). "Progressive collapse resistance of two-storey seismic configured steel sub-frames using welded connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 170, 106117.
- [8] Qian, K., Lan, X., Li, Z., & Fu, F. (2021). "Effects of steel braces on robustness of steel frames against progressive collapse", *Journal of Structural Engineering*, 147(11), 04021180.
- [9] Faghihmaleki, H., Nejati, F., Zarkandy, S., & Masoumi, H. (2017). "Evaluation of progressive collapse in steel moment frame with different braces", *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11(2), 290-298.
- [10] Liu, Z., & Zhu, Y. (2019). "Progressive collapse of steel frame-brace structure under a column-removal scenario", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 218(1), 012083.
- [11] Jiang, J., & Li, G. Q. (2019). "Mitigation of fire-induced progressive collapse of steel framed structures using bracing systems", *Advanced Steel Construction*, 15(2), 192-202.
- [12] Salmasi, A. C., & Sheidaii, M. R. (2017). "Assessment of eccentrically braced frames strength against progressive collapse", *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 543-551.
- [13] Auyeung, S., Alipour, A., & Saini, D. (2019). "Performance-based design of bridge piers under vehicle collision", *Engineering Structures*, 191, 752-765.
- [14] Kiakojour, F., Sheidaii, M. R., De Biagi, V., & Chiaia, B. (2020). "Progressive collapse assessment of steel moment-resisting frames using static-and dynamic-incremental analyses", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3), 04020025.
- [15] Rezvani, F. H., Yousefi, A. M., & Ronagh, H. R. (2015). "Effect of span length on progressive collapse behaviour of steel moment resisting frames", *Structures*, 3, 81-89.
- [16] Xie, F., Gu, B., & Qian, H. (2021). "Experimental study on the dynamic behavior of steel frames during progressive collapse", *Journal of Constructional Steel Research*, 177, 106459.
- [17] ANSI/AISC 360-16. (2016) *Specification for Structural Steel Buildings*, An American National Standard, Printed in the United States of America.
- [18] ASCE. (2013). *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- [19] BHRC. (2016). *Seismic Design Code of Buildings*, 4th Edition, Building and Housing Research Center, Ministry of Roads and City Planning, Islamic Republic of Iran.
- [20] GSA. (2003). *Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects*. Washington, DC.
- [21] UFC. (2016). *Unified Facilities Criteria*. WBDG, Whole Building Design Guide.