

تحلیل دینامیکی غیرخطی اجزاء محدود قاب فولادی سه بعدی با شکل پذیری متوسط تحت اثر برخورد وسیله نقلیه

Original Article

مهران ترابی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

وحید بروجردیان* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

در پژوهش حاضر، شروع و گسترش خرابی سازه به علت برخورد وسیله نقلیه با یکی از ستون‌های گوشه به صورت دینامیکی مدل سازی و بررسی شده است. به این منظور، یک قاب خمشی سه بعدی ۴ طبقه فولادی با شکل پذیری متوسط با استفاده از نرم افزار ETABS تحت بارگذاری متعارف مرده، زنده و زلزله طراحی شد و سپس در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری ضربه‌یی قرار گرفت. با در نظر گرفتن صحت سنجی‌های لازم، انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی، اثر ضربه‌ی ناشی از برخورد وسیله نقلیه با جرم و سرعت‌های مختلف شبیه سازی شد. نتایج نشان داد جرم و سرعت، تأثیر به‌سزایی در خرابی ساختمان دارند و هنگام برخورد، فقط ستون ضربه‌دیده آسیب نمی‌بیند، بلکه تمامی اعضاء سازه تحت تأثیر بار دینامیکی مذکور قرار می‌گیرند و تعداد قابل توجهی از آن‌ها وارد ناحیه‌ی خمیری می‌شوند و از استانداردهای آیین‌نامه خارج می‌شوند. در نتیجه، حذف فقط یک ستون و اعمال بارگذاری استاتیکی به سازه، دقت خوبی از تخریب پیش‌رونده به دست نمی‌دهد.

واژگان کلیدی: تخریب کششی، تخریب برشی، کماتش، ضربه، حذف ستون، آباکوس.

۱. مقدمه

برخورد شدید به ستون‌های پیرامونی سازه است؛ به عبارت دیگر، در صورت چنین اتفاقی ممکن است یک یا چند عضو کلیدی در سازه آسیب ببینند و سازه دچار خرابی پیش‌رونده شود.

یکی از پژوهش‌های انجام‌گرفته (۲۰۰۹)^[۱] مطالعه روی ساختمان فولادی اتحادیه‌ی دانشجویی اوهایو واقع در کمپ دانشگاه ایالت اوهایو است که با حذف ۴ ستون طبقه‌ی اول از یکی از قاب‌های محیطی با طول زیاد، قبل از تخریب برنامه‌ریزی‌شده‌ی ساختمان آزمایش شد. سیستم سازه‌ی ساختمان متشکل از قاب‌های خمشی در هر دو جهت اصلی بود. اول، گروهی از دو ستون نزدیک مرکز از طرف طول زیاد، به دنبال یک ستون گوشه و ستون مجاور آن حذف شد. هر ستون فولاد، اول از سطح مقطع آن نزدیک نوک و ته سوزانده یا قطع شدند و سپس با کمک ماشین ساختمان‌سازی سریعاً حذف شدند. در شکل ۱، فازهای آزمایش مشاهده می‌شوند. تغییر شکل در محدوده‌ی اطراف ستون‌های حذف‌شده با کرنش سنج و ویدیو با وضوح بالا مانیتور شد. ساختمان متلاشی نشد و معیارهای GSA را حتی بعد از حذف ستون چهارم برآورده کرد.

مطالعات اندکی بر رفتار و مدهای خرابی ستون‌های تحت فشار محوری در معرض ضربه‌ی عرضی صورت گرفته است. در میان مطالعات مذکور، یک مجموعه

در چند دهه‌ی اخیر، وقوع حملات تروریستی، خصوصاً در برج‌های دوقلوی تجارت جهانی، مسئله‌ی ارزیابی و پتانسیل وقوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مهم موجود و سازه‌هایی که در فاز طراحی هستند، را به صورت گسترده‌یی در بین پژوهشگران سراسر جهان مطرح کرده است. امنیت سازه همیشه در طراحی پروژه‌های مهندسی عمران، امری کلیدی برای مهندسان بوده است. یکی از مکانیزم‌هایی که می‌تواند منجر به شکست سازه شود و در دهه‌ی گذشته توجه زیادی به آن شده است، تخریب پیش‌رونده است که در آن یک یا چند عضو سازه ناگهان به علت تصادف یا حمله‌ی تروریستی دچار شکست می‌شوند و ساختمان به شکل پیش‌رونده‌یی دچار فروریزش می‌شود.

خرابی پیش‌رونده وضعیتی است که در آن بروز یک خرابی موضعی در یک عضو سازه‌ی، منجر به شکست اعضاء مجاور آن و فروریزش‌های پی در پی در ساختمان می‌شود.^[۱] عوامل مختلفی می‌توانند باعث خرابی موضعی و نهایتاً شروع خرابی پیش‌رونده در سازه باشند. از جمله مهم‌ترین آن‌ها، وقوع انفجار در سازه و یا

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۵/۱۰/۱۳۹۵، اصلاحیه ۲۴/۱۲/۱۳۹۵، پذیرش ۲۹/۱/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1916.2016

خرابی برشی ممکن است در ستون‌های تحت فشار محوری در اثر ضربه‌ی عرضی رخ دهند.

همچنین مجموعه‌ی بی‌سازگی از مطالعات پیرامون برخورد وسیله‌ی نقلیه به ستون فلزی در سال‌های اخیر انجام شده است که به دلیل ارتباط بیشتر با پژوهش حاضر در اینجا به مختصر بیان شده است: وانگ و الثابری در پژوهشی، به بیان نیروهای استاتیکی و دینامیکی انجام‌شده در ستون فولادی که تحت اثر برخورد وسیله‌ی نقلیه قرار گرفته است، پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که روش استاتیک معادل بیان‌شده در آیین‌نامه یوروکد^۳ فقط برای ساختمان‌های کمتر از طبقه ۱۰ که ستون‌های با اندازه‌ی کوچک یا متوسط دارند، محافظه‌کارانه است اما برای ستون‌های بزرگ‌تر، استفاده از روش مذکور غیرایمن است، چرا که در حالت دوم باید آثار دینامیکی ضربه‌ی وارده به ستون در نظر گرفته شود.^[۱۶]

در مطالعه‌ی دیگری، روش‌هایی برای ارزیابی غیرخطی ستون‌های فولادی تحت بارگذاری‌های گوناگون بررسی و با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۴، تجزیه و تحلیل غیرخطی شکست موضعی ستونی که ابتدا تحت بار محوری و سپس تحت بار عرضی قرار گرفته است، انجام شده و در پایان به اثر سرعت برخورد، جرم ضربه‌زننده، محل ضربه و شرایط قبل از بارگذاری در چگونگی شکست موضعی ستون‌های فولادی اشاره شده است.^[۱۷]

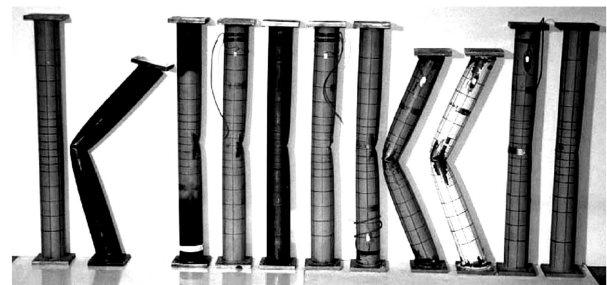
در سال ۲۰۱۴، برخورد وسیله‌ی نقلیه به ستون فلزی، ساده‌سازی شد به گونه‌یی که از ۳ عنصر برای وارد کردن ضربه به ستون استفاده شده است: الف) از جسم صلبی برای بیان جرم ضربه‌زننده، ب) از فنری برای شبیه‌سازی سختی وسیله نقلیه‌ی ضربه‌زننده (ج) از صفحه‌ی نازک و بدون جرم برای بیان سطح ضربه‌زننده (مثلاً سپر خودرو) و در نهایت پژوهش مذکور با سایر مطالعات مشابه که از خود خودرو برای شبیه‌سازی استفاده کرده بودند، مقایسه و تشابه بسیار خوبی به دست آورده شد.^[۱۸] در پژوهش حاضر، تخریب ناشی از ضربه‌ی عرضی وسیله‌ی نقلیه به یک ساختمان فولادی قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط بررسی و تأثیر جرم وسیله‌ی نقلیه در خرابی نشان داده شده است؛ همچنین تأثیر ضربه بر روی سایر اعضا ساختمان بررسی و سناریوی حذف تک ستون به چالش کشیده شده است.

۲. مدل‌سازی عددی و روش تحلیل

مدل‌سازی اعمال ضربه‌ی وسیله‌ی نقلیه به ستون یک ساختمان، در کل شامل دو قسمت اصلی است: قسمت اول در واقع مهم‌ترین قسمت، اعمال ضربه به ستون موردنظر، مشاهده و بررسی آسیب‌ها، خرابی‌ها و تنش‌های ایجادشده در ستون؛ و قسمت دوم، تأثیر و انتقال خرابی و تنش‌های ایجادشده در ستون به کل سازه است. جهت کسب اطمینان از انجام صحیح قسمت اول، یعنی اعمال ضربه و تعریف درست انواع آسیب‌پذیری در ستون و سازه‌ی موردنظر، ابتدا ۳ مدل خرابی کماتش خمیری سراسری، تخریب برشی و تخریب کششی جداگانه‌ی هر کدام طبق مراجع و آزمایش‌های مربوط به خود در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و صحت‌سنجی شدند این همین فرایندهای آسیب دقیقاً به همین صورتی که صحت‌سنجی شده‌اند، در نرم‌افزار وارد شوند و بعد از آن قسمت دوم پژوهش که مدل‌سازی یک ساختمان ۴ طبقه در نرم‌افزار آباکوس است، به صورت سه‌بعدی انجام شده است. مدل‌سازی مراحل ذکرشده به صورت جداگانه ابتدا در قسمت حاضر شرح داده شده و سپس در قسمت بعدی، هر کدام به صورت جداگانه صحت‌سنجی و در آخر نتیجه‌گیری به عمل آمده است.^[۱۹]



شکل ۱. آزمایش اتحادیه‌ی اوهایو: قبل از حذف ستون (سمت چپ)، بعد از حذف ستون (وسط)، در طول تخریب (سمت راست).^[۲]



شکل ۲. نمایی از ستون‌های تغییرشکل یافته بعد از اعمال ضربه.^[۶]

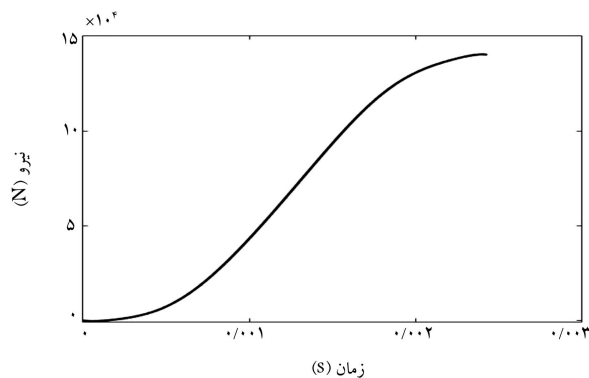
بررسی‌های تجربی و عددی برای مطالعه‌ی پاسخ لوله‌های فولادی پیش فشار محوری در ضربه‌ی عرضی سرعت پایین انجام شده،^[۳-۷] و دو مدل خرابی از نتایج تجربی به دست آمده است: کماتش سراسری^۱ پلاستیک تحت نیروی فشاری محوری زیاد، و فرورفتن موضعی و آسیب ناحیه‌ی ضربه، هنگامی که نیروی محوری کم و لوله نازک باشد (شکل ۲).

به‌طور خاص، رفتار تیرهای مقید محوری تحت ضربه‌ی عرضی به دفعات مطالعه شده است.^[۸-۱۴] تیرهای مقید محوری به کرات به عنوان اعضاء جاذب انرژی ضربه، در کاربردهای اساسی نظیر موانع تصادف خودرو استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، اگرچه ستون‌های تحت نیروی فشاری ممکن است در حادثه‌ی تصادف خودرو وجود داشته باشند، تأکید بیشتر بر مقاومت سازه‌ی خودرو برای محافظت سرنشین شده است. البته با مقاومت سازه‌ی مهم برای جامعه‌ی پژوهش مهندسی سازه‌ی رفتار ستون‌ها تحت ضربه‌ی خودرو نیازمند توجه است. با وجود این، اگرچه رفتار ستون‌های تحت فشار محوری در معرض ضربه‌ی عرضی از تیرهای مقید محوری تحت کشش محوری متفاوت است، مطالعه‌ی رفتار تیر می‌تواند به فهم برخی جنبه‌های رفتار ستون فولادی کمک کند.

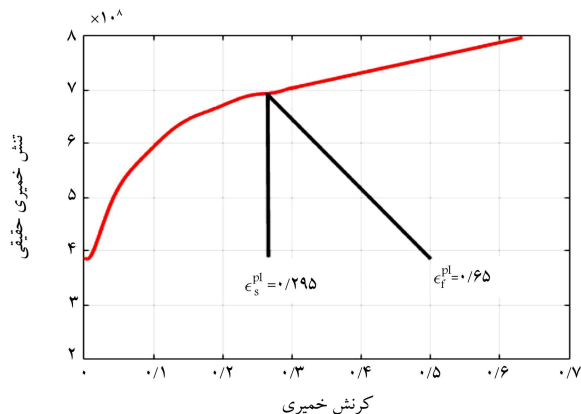
یک مطالعه‌ی تجربی در سال ۱۹۷۳،^[۱۲] سه مدل خرابی برای تیرهای آلومینیومی مقید در معرض نیروی دینامیکی نوسانی عرضی را مشخص کرده است. مدهای خرابی مذکور اساساً به شدت نوسان بستگی دارند:

- فرم بزرگ حالت خمیری کل تیر با شکل‌گیری مکانیزم لولای خمیری،
- خرابی پارگی کششی تحت رفتار زنجیری^۲،
- خرابی برشی عرضی در تکیه‌گاه‌ها.

خرابی عرضی خالص با تغییر فرم‌های قابل چشم‌پوشی در بخش مرکزی مشخص می‌شوند. البته بعضاً هم‌پوشانی میان مدهای خرابی برش عرضی و کششی مشاهده شده است. تعداد زیادی از مطالعات پژوهشی بررسی کرده‌اند که چگونه سه مدل خرابی ذکرشده می‌توانند تحت تأثیر پارامترهای مختلفی، نظیر: اثر پیش کشش،^[۱۵] نوع ماده و موقعیت ضربه،^[۸، ۹، ۱۰، ۱۳-۱۵] سرعت ضربه،^[۱۱] انواع مختلف سطح مقطع،^[۸] کمی‌سازی شوند. از بین سه مدل خرابی مذکور، خرابی سراسری و



شکل ۴. تابع دامنه‌ی هموار برای اعمال بارگذاری شبه استاتیکی. [۷]



شکل ۵. خصوصیات مربوط به فولاد S۳۵۵ مورد استفاده در این پژوهش. [۲۲]

به منظور شبیه‌سازی عددی ضربه‌ی وارد بر ستون فولادی تحت پیش‌بار فشاری در پژوهش حاضر از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. در پژوهش حاضر، دو مرتبه شبیه‌سازی انجام شد و در مجموع، شبیه‌سازی عددی شامل دو مرحله است: در مرحله اول، پیش‌بار اولیه به ستون فولادی اعمال و در مرحله بعد به وسیله یک پرتابه به ستون ضربه وارد شده است. در شبیه‌سازی اول، لوله‌ی با شعاع ۴۹ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۱ متر و سپس پرتابه‌ی با ابعاد ۴۰ × ۱۰۰ × ۱۶ میلی‌متر (با یک لبه‌ی تیز با زاویه‌ی ۹۰ درجه) همانند شکل ۳ مدل‌سازی شد.

۲.۲. تخریب برشی

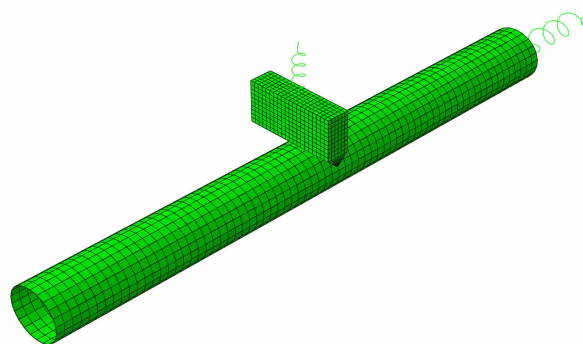
برای اطمینان از صحت روش مورد استفاده، ابتدا نتایج عددی مربوط به مدل‌سازی ضربه‌ی جانبی یک ستون تحت بارگذاری محوری با نتایج مربوط به پژوهش قبلی [۲۲] مقایسه شد. از ضریب اصطکاک ۰/۶ در شبیه‌سازی تماس مطابق مرجع [۲۲] استفاده شد. در مدل مذکور به دلیل آزاد بودن یک سر تیر تخریب کششی تأثیر چندانی ندارد، به همین منظور فقط در شبیه‌سازی‌ها تخریب برشی مدنظر قرار گرفت. بار فشاری محوری طراحی در شبیه‌سازی‌های مذکور ۴۲۵۰ کیلو نیوتن در نظر گرفته شد. همچنین طول ستون ۴ متر بود. [۲۲] نمودار تنش کرنش فولاد مورد استفاده در تحلیل ذکر شده مطابق شکل ۵ است. ثابت‌های مورد استفاده در تخریب برشی مطابق جدول ۲ است.

۳.۲. تخریب کششی

یکی از اصلی‌ترین مدهای خرابی در ستون فلزی، خرابی کششی است. این مد خرابی با مرجع قرار دادن برخی پژوهش‌ها، صحت‌سنجی شده است. [۲۰] برای مدل‌سازی، یک تیر فولادی و توخالی مربعی دو سرگیردار به طول ۷۰۰ میلی‌متر و ابعاد ۵۰ × ۵۰ × ۱/۶ میلی‌متر مطابق شکل ۶ مدل‌سازی شده و مورد اصابت پرتابه‌ی با جرم ۶۰۰ کیلوگرم و سرعت اولیه‌ی برخورد ۶/۲ متر بر ثانیه قرار گرفته

جدول ۱. خصوصیات فولاد مورد استفاده برای ستون.

چگالی (kg/m^3)	تنش تسلیم (GPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)
۷۸۵۰	۵۰۰	۰/۳	۲۰۰



شکل ۳. شبیه‌سازی عددی پرتابه و ستون فولادی جهت صحت‌سنجی با مدل آزمایشگاهی.

۱.۲. کماتش خمیری سراسری

به منظور صحت‌سنجی، نتایج حل عددی حاصل از پژوهش حاضر برای مود تخریب ذکر شده با نتایج پژوهشی در سال ۱۹۹۹، [۳] مقایسه شده است. در آزمایش کنونی، یک ستون لوله‌ی فولادی تحت اثر ضربه‌ی جانبی قرار گرفته و خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین پرتابه به صورت جسم صلب مدل شده است.

به منظور شبیه‌سازی عددی ضربه‌ی وارد بر ستون فولادی تحت پیش‌بار فشاری در پژوهش حاضر از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. در پژوهش حاضر، دو مرتبه شبیه‌سازی انجام شد و در مجموع، شبیه‌سازی عددی شامل دو مرحله است: در مرحله اول، پیش‌بار اولیه به ستون فولادی اعمال و در مرحله بعد به وسیله یک پرتابه به ستون ضربه وارد شده است. در شبیه‌سازی اول، لوله‌ی با شعاع ۴۹ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۱ متر و سپس پرتابه‌ی با ابعاد ۴۰ × ۱۰۰ × ۱۶ میلی‌متر (با یک لبه‌ی تیز با زاویه‌ی ۹۰ درجه) همانند شکل ۳ مدل‌سازی شد.

یک انتهای ستون به فنری با سختی $1e6(N/m)$ متصل شده است تا به وسیله آن کاهش مقدار نیرو در اثر جابه‌جایی ستون در هنگام ضربه شبیه‌سازی شود. همچنین برای شبیه‌سازی اصطکاک پرتابه و ریل هادی آن، از یک فنر با سختی بسیار کم $5(N/m)$ استفاده شده است.

تماس بین ستون و ضربه‌زننده از نوع سطح به سطح تعریف شده است. مقدار ضریب اصطکاک بین سطوح دو جسم مذکور، ۰/۴۷ در نظر گرفته شده است. انتهای از ستون که بدون فنر است، کاملاً گیردار بوده و در انتهای دیگر، به سر آزاد فنر جابه‌جایی در امتداد طولی ستون اعمال شده است که با استفاده از یک دامنه‌ی هموار^۵ در طی زمان اعمال می‌شود (شکل ۴) تا حالت بارگذاری برای ایجاد پیش‌فشار اولیه در ستون به صورت شبه استاتیکی برای $(P/P_y = 0.5)$ باشد. بقیه‌ی درجه‌های آزادی انتهای فنر مذکور مقید شده است. انتهای آزاد فنر متصل به ضربه‌زننده در تمامی راستاها غیر از راستای حرکت مقید و ستون فولادی با المان‌های پوسته‌ی S۴R و ضربه‌زننده با المان‌های آجری C۳D۸R شبکه‌بندی شده‌اند. سرعت اولیه‌ی پرتابه ۷ متر بر ثانیه است. همچنین مقدار شتاب جاذبه

جدول ۲. خصوصیات مربوط به تخریب برشی فولاد S355 مورد استفاده در پژوهش حاضر.

u_f^{pl}	ϵ_f^{pl}	بیشینه‌ی		کرنش خمیری در ابتدای آسیب
		نرخ کرنش (sec^{-1})	نسبت تنش برشی	
۰/۰۰۶۵	۰/۶۵	۱۶/۵	۱/۸۵	۰/۲۹۵

جدول ۳. خصوصیات فولاد مورد استفاده در مدل عددی.

ابعاد مقطع (mm)	طول تیر (mm)	تنش تسلیم واقعی (N/mm^2)	تنش نهایی واقعی (N/mm^2)	کرنش تسلیم واقعی
$50 \times 50 \times 1.6$	۷۰۰	۴۵۶	۵۸۴/۶۴	۰/۱۴۵

جدول ۴. خصوصیات فولاد مورد استفاده در مدل عددی.

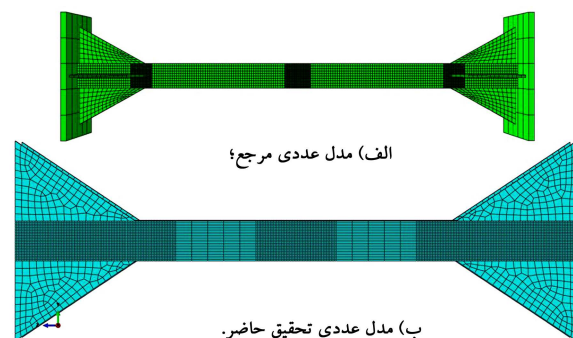
u_f^{pl}	ϵ_f^{pl}	بیشینه‌ی		کرنش خمیری در ابتدای آسیب
		نرخ کرنش (sec^{-1})	تنش سه محوره	
۰/۰۰۰۲۹۱	۰/۱۴۵	۱۴/۲	۰/۷	۰/۱۱۵

صورت گرفته است، اما برای به دست آوردن نرخ کرنش و بیشینه‌ی تنش سه محوری از مدل ساختاری حالت خمیری فلز همگن استفاده شده است.^[۲۰] کلیه‌ی ویژگی‌های استفاده شده در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی خرابی کششی در جدول ۴ ارائه شده است.

۴.۲. مدل‌سازی ساختمان فولادی

پس از بررسی رشد مودهای مختلف آسیب به صورت مجزا، تمامی پارامترها برای شبیه‌سازی یک ساختمان با ابعاد واقعی به کار گرفته شد. ساختمان فولادی مورد نظر، یک پلان یکسکان در طبقات داشته و ارتفاع کلیه‌ی طبقات آن ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۷). سیستم باربر جانبی ساختمان در هر دو جهت x و y ، قاب خمشی متوسط است. اتصال تیرها به ستون به صورت صلب و اتصال پای ستون به پی گیردار است. کف سازه نیز از نوع دال با تیرهای مختلط فرض شده و همه‌ی اجزاء سازه از فولاد ساختمانی St37 با تنش نهایی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع انتخاب شده‌اند. طراحی متعارف سازه به کمک نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران و تحت اثر بارهای مرده، زنده و زلزله که براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان محاسبه شده‌اند، صورت پذیرفت.

مقادیر بارهای مرده، زنده‌ی طبقات، و بام در جدول ۵ ارائه شده است. بارهای ناشی از زلزله با این فرض به دست آمده‌اند که سازه در شهر تهران قرار دارد و بر روی زمین با خاک تیپ II بنا شده است. طراحی در چند مرحله صورت گرفته است تا از یک سو، انتخاب مقاطع نزدیک حالت بهینه و از سوی دیگر، طراحی اجزاء ساده و یکنواخت باشد. همچنین طراحی به روش LFRD انجام شده است. مدل‌سازی نهایی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. برای تمامی تیرها و ستون‌ها از المان‌های تغییرشکل‌پذیر و آجری C3D8R استفاده شده است. این المان سه بعدی، ۸ گره‌یی، با ۶ درجه آزادی در هر گره و انتگرال‌گیری به صورت کاهش یافته است. کل فرایند در دو گام استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته است. در قسمت دینامیکی، جسم ضربه‌زننده به عنوان یک جسم صلب و به شکل سپر یک خودرو طراحی شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در تحلیل ذکر شده نیز مشابه موارد ارائه شده در جدول‌های ۱ الی ۴ است. مدل اجزاء محدود ساختمان مذکور در شکل ۸ مشاهده می‌شود.^[۱۹]



شکل ۶. نمایشی از تیر مدل شده.

است. مطابق با مدل ساخته شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،^[۲۱] مش بندی به صورت منظم و در دو طرف تیر (تکیه‌گاه‌ها) و در وسط تیر که محل برخورد است، به صورت ریز و در بقیه‌ی تیر به صورت درشت‌تر بوده است، همچنین براکت‌های دو طرف تیر که کارگرداری را انجام می‌دهند، به صورت صلب طراحی شده و مش بندی در آن‌ها به صورت نامنظم بوده است. نمایشی از تیر و گسست‌های مدل شده در دو مدل پژوهش ذکر شده،^[۲۱] و پژوهش حاضر در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

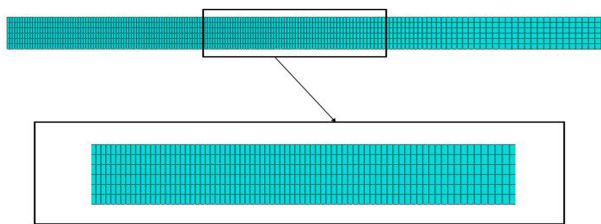
رفتار ماده‌ی تیر فلزی با استفاده از مدل حالت خمیری فاز کلاسیک ایزوتروپیک موجود در آباکوس شبیه‌سازی و همچنین از آسیب کششی پیش‌رونده^۷ برای مدل‌سازی خرابی کششی استفاده شده است.

آثار نرخ کرنش و همچنین کرنش سختی با استفاده از تنش و کرنش به دست آمده توسط آزمایشی در سال ۲۰۰۸،^[۲۱] لحاظ شده است. به دلیل سادگی تحلیل و همچنین اینکه گسست پلیت‌ها و جسم ضربه‌زننده تغییرشکلی نداشته‌اند، خواص حالت خمیری برای آن‌ها تعریف نشده است. چگالی (kg/m^3) ۷۸۵۰، مدول کشسانی ۲۰۰ گیگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۳ برای فولاد مورد نظر در نظر گرفته شده است و خلاصه‌ی ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۳ ارائه شده است. حساسیت نرخ کرنش فولاد با به کارگیری معادله‌ی کوپر سایموندز محاسبه شده است که در آن با توجه به نتایج آزمایشگاهی پژوهش اخیر،^[۲۱] از مقدار ۴۰/۴ برای پارامتر D مقدار ۵ برای پارامتر n استفاده شده است.

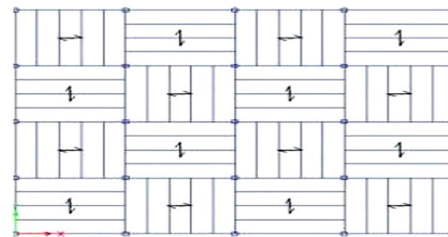
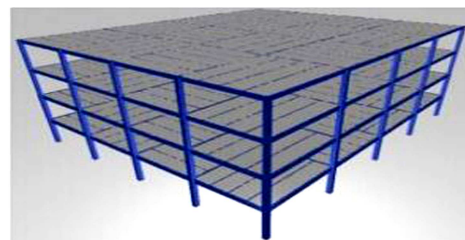
مقدار کرنش خمیری در لحظه‌ی شروع آسیب با استفاده از آزمایش تک محوری کشش به دست آمده است. تحلیل غیرخطی المان محدود با شرایط بارگذاری یکسکان

جدول ۵. مقادیر بارهای مرده، بارهای زنده‌ی طبقات و بام در ساختمان مدل‌سازی شده.

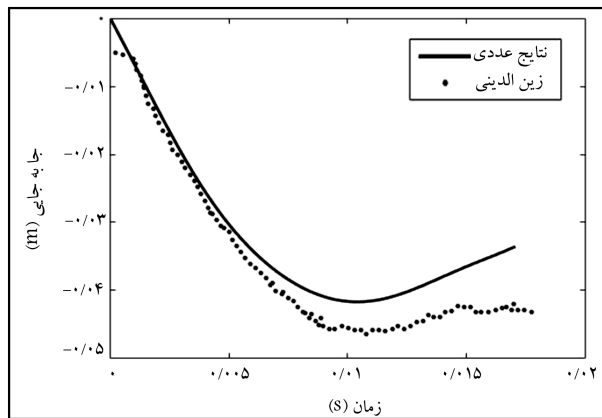
طبقات	ستون‌ها	تیرهای اصلی	تیرهای فرعی
همکف	باکس ۳۰ × ۳۰ × ۱۲	تیر - ورق با ابعاد جان ۵۰ × ۱٫۲ و ابعاد بال ۵۰ × ۱٫۲	IPE۱۸
اول	باکس ۳۰ × ۳۰ × ۱۲	تیر - ورق با ابعاد جان ۵۰ × ۱٫۲ و ابعاد بال ۵۰ × ۱٫۲	IPE۱۸
دوم	باکس ۲۵ × ۲۵ × ۱۰	تیر - ورق با ابعاد جان ۵۰ × ۱٫۲ و ابعاد بال ۵۰ × ۱٫۲	IPE۱۸
سوم	باکس ۲۵ × ۲۵ × ۱۰	تیر - ورق با ابعاد جان ۵۰ × ۱٫۲ و ابعاد بال ۵۰ × ۱٫۲	IPE۱۸



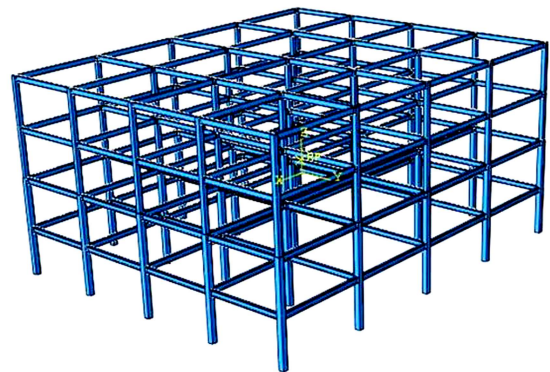
شکل ۹. مش بندی ستون مورد ضربه.



شکل ۷. پلان طبقات و نمای سه بعدی ساختمان فولادی مورد استفاده در این پژوهش.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی جابه‌جایی مربوط به پرتابه در تحلیل ضربه.



شکل ۸. مدل اجزاء محدود ساختمان مورد استفاده جهت تحلیل ضربه.

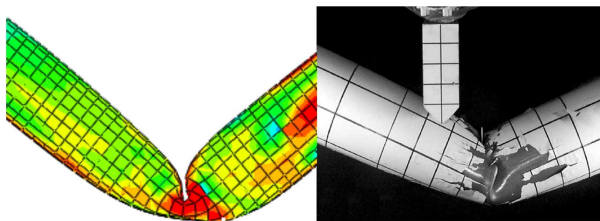
۳. صحت‌سنجی و نتیجه‌گیری

۱.۳. کماتنش خمیری سراسری

نتایج تجربی^[۱] نشان دادند که در اثر ضربه‌ی جانبی، تخریب سراسری در ستون مشاهده می‌شود. در این نوع تخریب، ستون پایداری خود را از دست می‌دهد و تغییرشکل‌های بزرگی در آن مشاهده می‌شود که در نهایت موجب کاهش فاصله‌ی آن از تکیه‌گاه گیردار می‌شود.

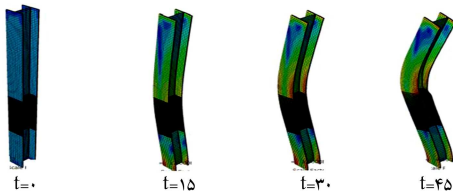
در شکل ۱۰، نتایج تحلیل عددی مربوط به جابه‌جایی پرتابه در ضمن ضربه به ستون فولادی با نتایج مربوط به مرجع ASCE^[۱] نشان داده شده است که مطابق آن پرتابه به دلیل سرعت کم برخورد پس از ضربه به ستون از آن بر می‌گردد که نشان می‌دهد در آن نفوذ نکرده است. در شکل ۱۱، مقدار جابه‌جایی عرضی

مش بندی در ستون مورد ضربه به این‌گونه انجام شده است که اندازه‌ی المان‌ها از پای ستون (تکیه‌گاه) تا محل ضربه به صورت مش ریز (اندازه‌ی ۱ میلی‌متر) انجام شده و از محل ضربه تا بالای ستون، اندازه‌ی مش به صورت دنباله‌دار و آهسته آهسته از ۱ میلی‌متر در محل ضربه تا ۵ میلی‌متر در بالای ستون تغییر یافته است (شکل ۹).

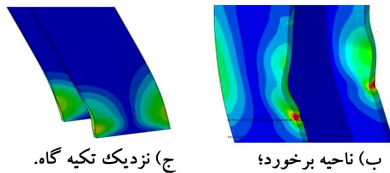


شکل ۱۴. تغییر شکل عرضی ستون فولادی تحت ضربه با سرعت ۷ متر بر ثانیه و پیش بار $(P/P_y = 0.7)$. [۱]

تغییر شکل ستون فولادی حاصل تست ضربه؛ (الف) تغییر شکل حاصل از تحلیل عددی در این تحلیل. (ب)



الف) کل ستون؛



ب) ناحیه برخورد؛ ج) نزدیک تکیه گاه. شکل ۱۵. کانتور کرنش خمیری (PEEQ).

در شکل ۱۴ در نشان داده شده است. در شکل مذکور، تغییر شکل ناشی از ضربه‌ی عرضی حاصل از تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزاء محدود نشان داده شده است. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مطابقت خوبی دارد.

۲.۳. تخریب برشی

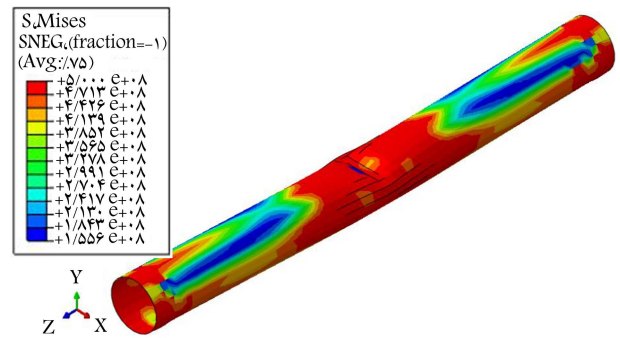
مطابق پژوهشی در سال ۲۰۱۴ [۲۰]، تحت بارگذاری انجام شده، ستون هم شامل تخریب سراسری و هم تخریب محلی شد. کانتور تنش در لحظات مختلف و همچنین کانتور کرنش خمیری فلنج در ناحیه‌ی برخورد در نزدیکی تکیه‌گاه به صورت شکل ۱۵ است. شایان ذکر است که موقعیت ضربه‌زنده در ۱/۵ متری از پایین ستون و جرم ضربه‌زنده ۶ تن و سرعت آن ۴۰ کیلومتر بر ساعت است.

۳.۳. تخریب کششی

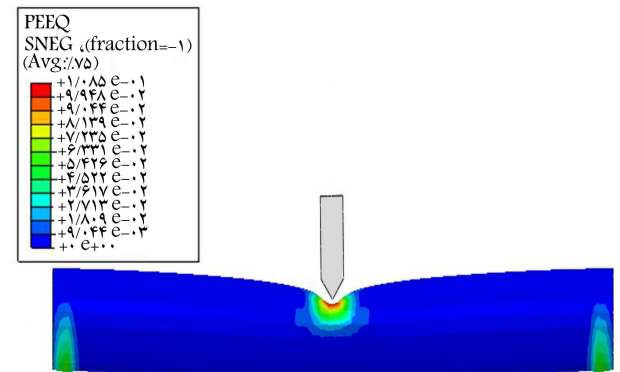
نتایج مدل‌سازی و اعمال ضربه با مقایسه‌ی کانتورهای تنش در زمان‌های مختلف اعمال ضربه و همچنین نمودار معیار آسیب کششی بر حسب زمان در نقطه‌ی اعمال ضربه و همچنین در تکیه‌گاه‌ها انجام شد. شکل ۱۶ و ۱۷، نتایج صحت‌سنجی بخش حاضر از پژوهش را نشان می‌دهند.

۴.۳. تخریب در ساختمان فولادی

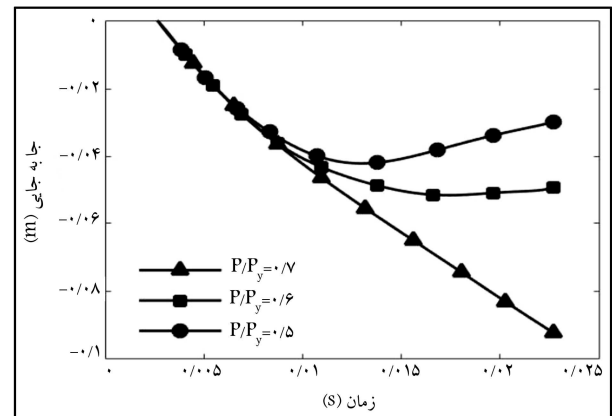
شکل ۱۸، نمودار تغییر مکان محوری بر حسب زمان در ستون مورد ضربه را نشان می‌دهد که مطابق آن در لحظه‌ی پس از برخورد، جابه‌جایی محوری ستون مورد نظر و در واقع گوشه‌ی ساختمان به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر در اثر ضربه‌های ۴،



شکل ۱۱. کانتور تنش لوله‌ی فولادی پس از ضربه.



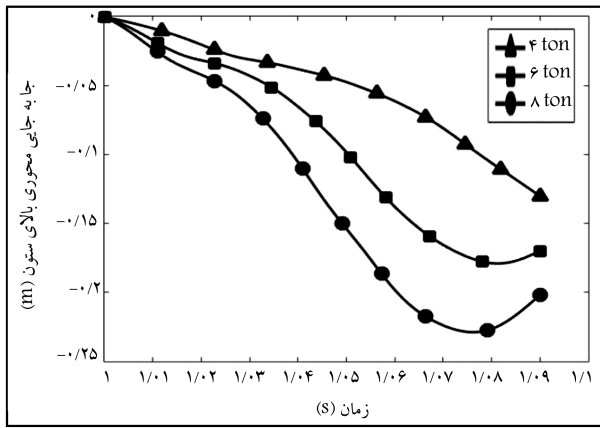
شکل ۱۲. کرنش خمیری در ستون فولادی تحت ضربه‌ی جانبی و پیش بار $(P/P_y = 0.5)$.



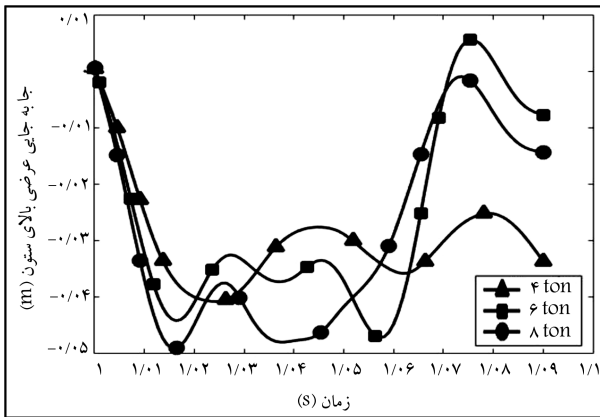
شکل ۱۳. مقدار جابه‌جایی عرضی ستون فولادی تحت بارگذاری‌های مختلف فشاری محوری.

ستون فولادی تحت بارگذاری‌های فشاری محوری مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، با افزایش نیروی فشاری محوری، جابه‌جایی عرضی افزایش می‌یابد و به تدریج ناپایدار می‌شود. کانتور مربوط به تنش مایز ستون فولادی در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، در محل ضربه و در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها، بیشترین مقدار تنش مشاهده می‌شود. همچنین در مناطق مذکور، کرنش خمیری مشاهده شد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. می‌توان به این نتیجه رسید که وجود پیش‌بار فشار موجب افزایش ناحیه‌ی تخریب کمانش سراسری در ستون فولادی می‌شود.

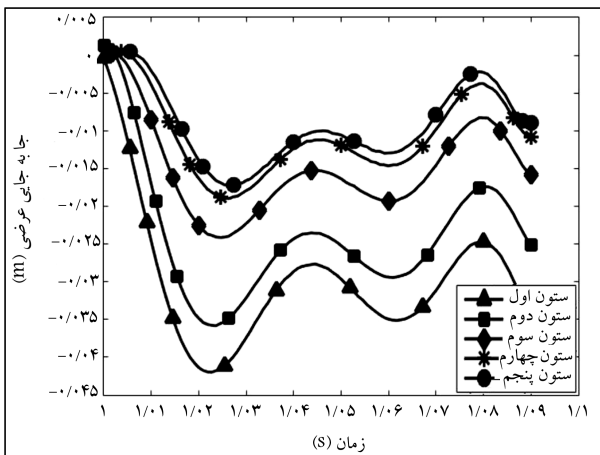
تغییر شکل عرضی ستون فولادی تحت ضربه‌ی ۷ متر بر ثانیه و نیروی محوری



شکل ۱۸. جابه‌جایی محوری ستون مورد ضربه با ثابت نگه داشتن سرعت ۴۰ متر بر ثانیه و موقعیت ۱٫۲ متر برای ضربه‌زننده.

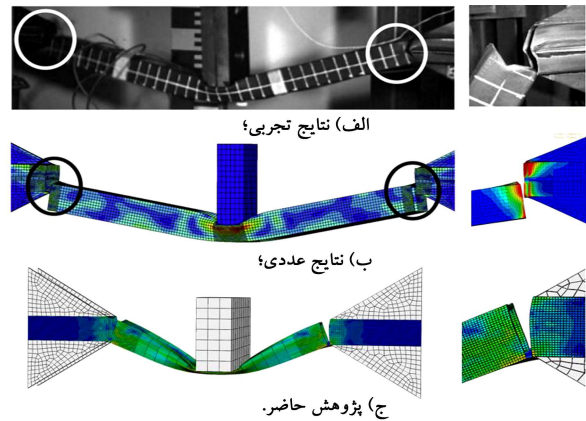


شکل ۱۹. جابه‌جایی عرضی ستون مورد ضربه در تراز طبقه اول (سرعت ۴۰ متر بر ثانیه و موقعیت ضربه‌زننده ۱٫۲ متر از زمین).

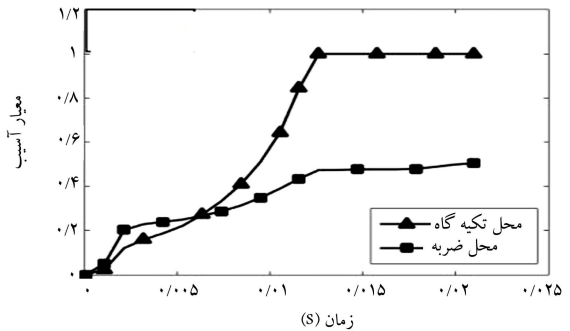


شکل ۲۰. مقایسه‌ی جابه‌جایی عرضی ستون‌های راستای ضربه در تراز طبقه‌ی اول (جرم ضربه‌زننده ۴ تن، سرعت ۴۰ متر بر ثانیه و در موقعیت ۱٫۲ متر از زمین).

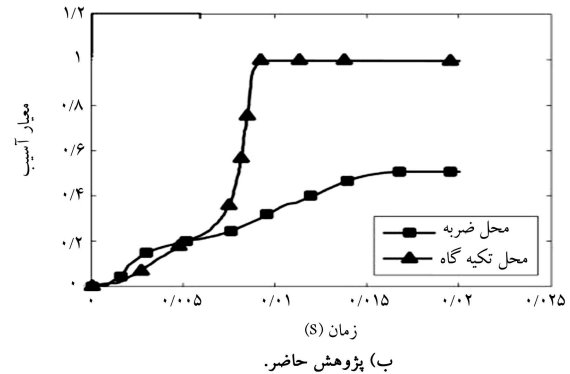
هر ستون نسبت به زمان رسم و با یکدیگر مقایسه شدند (شکل ۲۰). نتایج نشان داد که تمامی ستون‌ها، جابه‌جایی قابل توجهی دارند و مقداری از جابه‌جایی به ترتیب در هر دهانه نسبت به دهانه‌ی قبل از خود کمتر است و مقداری از آن میرا می‌شود. ملاحظه می‌شود که ستون دوم بعد از ستون اصلی، تغییرمکانی در حدود ۳ سانتی‌متر



شکل ۱۶. کانتور تنش در زمان ۲ میلی‌ثانیه. [۲۲و۲۱]



الف) پژوهش انجام شده در سال ۲۰۱۱؛



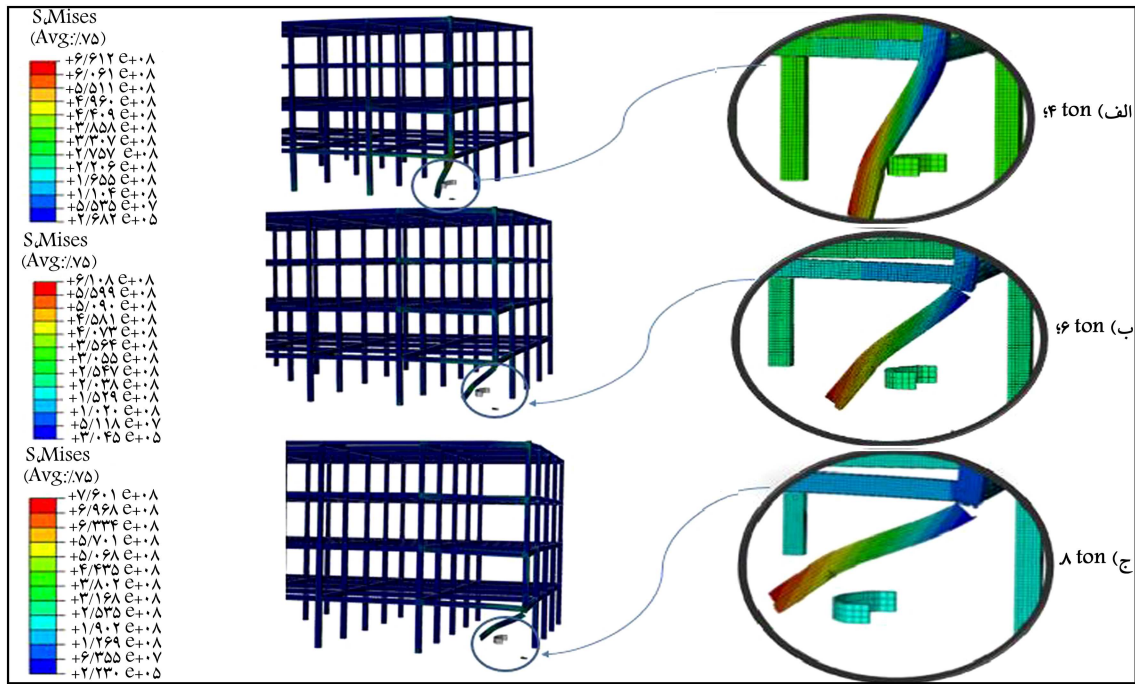
ب) پژوهش حاضر.

شکل ۱۷. نمودار معیار آسیب بر حسب زمان. [۲۲]

۶ و ۸ تن است، که مقدار قابل توجه و از حد استاندارد خارج است و سازه رو به خرابی می‌رود.

تغییرمکان جانبی ستون موردنظر در اثر ضربه‌ی ۴ تن در شکل ۱۹ نشان داده شده است. نقطه‌ی موردنظر برای بررسی بالای ستون طبقه‌ی همکف و در تراز طبقه‌ی اول انتخاب شده است، تا در واقع جابه‌جایی طبقه نشان داده شود. مقادیر جابه‌جایی در جرم‌های ۶ و ۸ تن تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و این امر نشان از این است که تغییر جرم ضربه‌زننده از مقدار معینی به بعد، تأثیر چندانی در افزایش خرابی ندارد. مقادیر جابه‌جایی بین ۴ تا ۵ سانتی‌متر است که ساختمان را از مقادیر استاندارد پیش‌مجاز و تغییرمکان جانبی مجاز خارج می‌کند و خطرناک است.

برای بررسی اثر ضربه در سایر اعضاء ساختمان، تمامی ستون‌های در راستای ضربه در طبقه‌ی همکف بررسی شدند. به این منظور نمودار تغییرمکان جانبی بالای



شکل ۲۱. کانتور تغییرمکان محوری بعد از اعمال ضربه با سرعت ۴۰ متر بر ثانیه، موقعیت ضربه به ۱/۲ متر از زمین، جرم ضربه زنده.

مربوط به حل عددی در پژوهش حاضر با نتایج تجربی مقایسه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مذکور برای مدل ساختمان ۴ طبقه فولادی با ابعاد مشخص استفاده شد.

نتایج نشان داد که تخریب کششی در سازه‌های فولادی بیشتر در مواردی ظاهر می‌شود که دو طرف تیر یا ستون فولادی مورد نظر مقید باشد. در مجموع، به نظر می‌رسد، تخریب ستون فولادی در اثر ضربه، در لحظه شروع در مود برشی و در ادامه با ترکیب مود برشی و کششی رقم می‌خورد. با اعمال ضربه‌های مختلف به ستون با جرم‌های متغیر، در ابتدا تأثیر ضربه در جابه‌جایی محوری و عرضی ستون مورد نظر و ساختمان بررسی و سپس تأثیر افزایش جرم در خرابی پیش‌رونده به وجود آمده نشان داده شد.

برای بررسی تأثیر بقیه‌ی اجزاء و ستون‌های ساختمان در اثر برخورد جسم ضربه‌زنده به ستون، گوشه‌ی ستون‌های طبقه‌ی همکف و در راستای ضربه انتخاب و با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهد که ضربه‌ی وارده نه فقط به ستون گوشه، بلکه تأثیر به‌سزایی در بقیه‌ی ستون‌ها و تیرهای دیگر ساختمان دارد و این امر می‌تواند نیاز بررسی بیشتر سناریوی حذف تک‌ستون برای ساختمان را بیشتر کند.

دارد که خارج از مقادیر مجاز استاندارد است. تغییرات صورت‌گرفته در صعودی و نزولی بودن نمودارها ناشی از رفتار دینامیکی برخورد در لحظه‌های شروع آسیب و شکست در ستون تحت ضربه است.

در شکل ۲۱، کانتور جابه‌جایی محوری ستون تحت ضربه‌ی ساختمان فولادی تحت جرم‌های مختلف پرتابه نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، با افزایش جرم پرتابه، تخریب در ستون و به همین ترتیب در کل ساختمان افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد هر چه سرعت ضربه بیشتر می‌شود، جابه‌جایی محوری در ستون مورد ضربه و همچنین تیرهای متصل به آن افزایش می‌یابد و ساختمان بیشتر رو به خرابی می‌رود.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار یک ستون فولادی تحت اثر ضربه‌ی جانبی و رشد تخریب‌های کششی، برشی و کماتش سراسری بررسی شد. برای هر مورد، نتایج

7. progressive ductile damage and failure

پانویس‌ها

1. global
2. catenary action
3. Eurocode
4. Abaqus
5. smooth amplitude
6. tensile failure

منابع (References)

1. ASCE, "Minimum design loads for buildings and other structures", American Society of Civil Engineers (2013).

2. Song, B.I. and Sezen, H. "Evaluation of an existing steel frame building against progressive collapse", Structures Congress (2009).
3. Zeinoddini, M., Harding, J.E. and Parke, G.A.R. "Dynamic behaviour of axially pre-loaded tubular steel members of offshore structures subjected to impact damage", *Ocean Engineering*, **26**(10), pp. 963-978 (1999).
4. Zeinoddini, M., Harding, J. and Parke, G. "Dynamic behaviour of axially pre-loaded tubular steel members of offshore structures subjected to impact damage", *Ocean Engineering*, **26**(10), pp. 963-978 (1999).
5. Zeinoddini, M., Harding, J. and Parke, G. "Axially pre-loaded steel tubes subjected to lateral impacts (a numerical simulation)", *International Journal of Impact Engineering*, **35**(11), pp. 1267-1279 (2008).
6. Zeinoddini, M., Parke, G. and Harding, J. "Axially pre-loaded steel tubes subjected to lateral impacts: An experimental study", *International Journal of Impact Engineering*, **27**(6), pp. 669-690 (2002).
7. Zeinoddini, M., Parke, G. and Harding, J. "Interface forces in laterally impacted steel tubes", *Experimental Mechanics*, **48**(3), pp. 265-280 (2008).
8. Bambach, M., Jama, H., Zhao, X.L. and et al. "Hollow and concrete filled steel hollow sections under transverse impact loads", *Engineering Structures*, **30**(10), pp. 2859-2870 (2008).
9. Jilin, Y. and Norman, J. "Further experimental investigations on the failure of clamped beams under impact loads", *International Journal of Solids and Structures*, **27**(9), pp. 1113-1137 (1991).
10. Liu, J. and Jones, N. "Experimental investigation of clamped beams struck transversely by a mass", *International Journal of Impact Engineering*, **6**(4), pp. 303-335 (1987).
11. Mannan, M., Ansari, R. and Abbas, H. "Failure of aluminium beams under low velocity impact", *International Journal of Impact Engineering*, **35**(11), pp. 1201-1212 (2008).
12. Menkes, S. and Opat, H. "Broken beams", *Experimental Mechanics*, **13**(11), pp. 480-486 (1973).
13. Yu, J. and Jones, N. "Numerical simulation of a clamped beam under impact loading", *Computers & Structures*, **32**(2), pp. 281-293 (1989).
14. Yu, J.-L. and Jones, N. "Numerical simulation of impact loaded steel beams and the failure criteria", *International journal of Solids and Structures*, **34**(30), pp. 3977-4004 (1997).
15. Chen, F.L. and Yu, T.X. "Influence of axial pre-load on plastic failure of beams subjected to transverse dynamic load", Key Engineering Materials: Trans. Tech. Publ. (2000).
16. Al-Thairy, H. and Wang, Y.C. "An assessment of the current eurocode 1 design methods for building structure steel columns under vehicle impact", *Journal of Constructional Steel Research*, **88**, pp. 164-171 (Sep., 2013).
17. Makarem, F.S. and Abed, F. "Nonlinear finite element modeling of dynamic localizations in high strength steel columns under impact", *International Journal of Impact Engineering*, **28**(52), pp. 47-61 (Feb., 2013).
18. Al-Thairy, H. and Wang, Y.C. "Simplified FE vehicle model for assessing the vulnerability of axially compressed steel columns against vehicle frontal impact", *Journal of Constructional Steel Research*, **30**(102), pp. 190-203 (Nov., 2014).
19. Abaqus, Ver. 6.10, User Subroutines Reference Manual, (2010).
20. Al-Thairy, H.A. and Wang, Y. "Behaviour and design of steel columns subjected to vehicle impact", Trans. Tech. Publ. (2014).
21. Bambach, M.R., Jama, H., Zhao, X.L. and et al. "Hollow and concrete filled steel hollow sections under transverse impact loads", *Engineering Structures*, **30**(10), pp. 2859-2870 (2008).
22. Al-Thairy, H. and Wang, Y.C. "A numerical study of the behaviour and failure modes of axially compressed steel columns subjected to transverse impact", *International Journal of Impact Engineering*, **38**(8-9), pp. 732-744 (2011).