

Numerical study of the behaviour of partially concrete- filled cold-formed steel columns, under simultaneous loading of static axial compressive load and axial impact loading

Elham Ghandi^{1*}, Nayyer Mohammadi Rana², Shirin Esmaeili Niari¹

1- Assistant Professor, Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- M.Sc. student in Structural Engineering, Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Concrete-filled tubular (CFT) steel columns are a group of composite sections that are considered due to their higher load-bearing capacity, good ductility and good strength. These columns are made of a combination of concrete and steel with the aim of combining the advantages of each of them. These sections are widely used in a variety of high-rise buildings, offshore structures, subway stations and bridge piers. Therefore, these structures may be exposed to dynamic loads such as axial impact loads (due to accidents or intentional impacts such as falling and releasing various devices, military or terrorist activities). One of the most important techniques in the use of CFT columns is the use of partially concrete-filled steel columns, which are now available due to their cost-effectiveness and due to the weight loss of the structure, especially at the piers of the bridge and docks. Due to the increasing use of partially concrete-filled steel columns in various structures, it is necessary to know their behavior against axial impact loading that has not been considered until today. In this paper, the dynamic response of partially concrete-filled cold-formed steel columns, against simultaneous loading of static axial compressive load and axial impact loading using finite element modeling in ABAQUS software by performing nonlinear dynamic analysis are discussed. To ensure the accuracy of the numerical model, the results of the analysis are compared with the results of previous works. Parametric studies to investigate the effects of impact load velocity, the ratio of the height of the filled concrete to the total height of the column, the height of the impact hammer falling, the ratio of the impact mass to the total mass of the column, the ratio of static axial compressive load and eccentricity of axial impact load. The desired columns have rectangular cross section. The results of this study show that with increasing the parameters of static axial compressive load, filling ratio, eccentricity of axial impact load and the height of the impact hammer falling, the impact load decreases. Also, with increasing the mass ratio and impact speed, the impact load increases.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 June 2020

Revise Date: 29 July 2020

Accept Date: 04 October 2020

Keywords:

Axial impact loading
Partially concrete-filled steel column
Cold-formed steel
Finite element modelling
Nonlinear dynamic analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.232284.2145>

*Corresponding author: Elham Ghandi

Email address: gandi@sut.ac.ir

بررسی عددی رفتار ستون‌های فولادی سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن تحت اثر بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و بار ضربه‌ای محوری

الهام قندی^{۱*}، نیر محمدی رعنا^۲، شیرین اسماعیلی نیاری^۱

۱- استادیار سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT) گروهی از مقاطع مرکب هستند که به دلیل ظرفیت باربری بیشتر، شکل‌پذیری خوب و مقاومت مناسب، مورد توجه بوده و این ستون‌ها از ترکیب بتن و فولاد با هدف به‌کارگیری توأمان مزیت‌های هر یک از این مصالح بهره‌مند می‌شوند. این مقاطع به طور گسترده‌ای در انواع ساختمان‌های بلند مرتبه، سازه‌های دریایی، ایستگاه‌های مترو و ... کاربرد دارند. بنابراین این سازه‌ها ممکن است در معرض بارهای دینامیکی مانند بار ضربه محوری (به دلیل تصادفات یا ضربات عمدی مانند سقوط و رهاسازی وسایل مختلف، فعالیت‌های نظامی و...) قرار بگیرند. یکی از تکنیک‌های مهم در کاربرد ستون‌های CFT استفاده از ستون‌های فولادی جزئی پر شده با بتن می‌باشد که به دلیل مقرون به صرفه بودن و کاهش وزن سازه به خصوص در پایه‌های پل‌ها و اسکله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به افزایش کاربرد ستون‌های فولادی جزئی پر شده با بتن در سازه‌های مختلف شناخت رفتار آنها در برابر بارگذاری ضربه‌ای محوری که تا به امروز مورد توجه نبوده است، ضروری است. در این مقاله به بررسی پاسخ دینامیکی ستون‌های فولادی سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن در مقابل بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و بارگذاری ضربه‌ای محوری با استفاده از مدل‌سازی عناصر محدود در نرم افزار ABAQUS با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی پرداخته می‌شود. مطالعات پارامتریکی برای بررسی تاثیر پارامترهای سرعت ضربه وارده، نسبت ارتفاع بتن پر شده به ارتفاع کل ستون، ارتفاع سقوط ضربه‌زننده، نسبت جرم کل ستون، نسبت بار محوری فشاری استاتیکی و خروج از مرکزیت بار ضربه‌ای محوری بر پاسخ ضربه‌ای ستون‌های مورد نظر با مقطع مستطیلی انجام می‌شوند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش پارامترهای نسبت بار محوری فشاری، نسبت پرشدگی و خروج از مرکزیت ضربه محوری و ارتفاع سقوط ضربه‌زننده، بار ضربه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین افزایش نسبت جرم و سرعت ضربه باعث افزایش بار ضربه‌ای می‌شود.

کلمات کلیدی: بار ضربه‌ای محوری، ستون فولادی جزئی پر شده با بتن، فولاد سرد نورد شده، مدل‌سازی عناصر محدود، تحلیل دینامیکی غیر خطی

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.232284.2145
۱۳۹۹/۰۳/۱۲	۱۳۹۹/۰۵/۰۸	۱۳۹۹/۰۷/۱۳	۱۳۹۹/۰۷/۱۳	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	10.22065/jsce.2020.232284.2145
*نویسنده مسئول:		الهام قندی			
پست الکترونیکی:		ghandi@uma.ac.ir			

۱- مقدمه

استفاده از ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT^۱) برای اولین بار به دهه ۱۸۷۰ میلادی باز می‌گردد. ستون‌های CFT نوعی سازه ترکیبی از بتن و فولاد هستند که به دلیل مزایای فراوانی که نسبت به ستون‌های بتن‌آرمه و فولادی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارند، استفاده از آنها بسیار متداول گشته و به سرعت در حال افزایش است. این ستون‌ها به واسطه عملکرد ساختاری و سازه-ای بسیار عالی خود، امروزه به طور گسترده در ساخت و سازه‌های مهندسی عمران به عنوان پایه‌های پل‌ها و ستون‌های ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ستون‌های CFT دارای خصوصیات عالی از جمله مقاومت کششی بالا، شکل‌پذیری بهتر، حمل و نقل آسانتر، حافظت از سطح بتن، محصورشدگی بالا در بتن، کاهش وزن فولاد مصرفی، افزایش فضای مفید و ظرفیت جذب انرژی زیاد هستند. در ستون‌های CFT علاوه بر مقاطع فولادی گرم نورد از فولاد سرد نورد هم استفاده می‌شود. فولاد گرم نورد شده در این نوع ستون‌ها بسیار رایج می‌باشد و در صنعت ساختمان‌سازی کاربرد بسیار زیادی دارد، ولی از آنجایی که فولاد سرد نورد شده باعث بهبود مقاومت و سختی مصالح نسبت به فولاد گرم نورد می‌شوند و از جابجایی و نصب راحتتر و اقتصادی‌تر، اشکال پیچیده و دقیق، سبکی بیشتر و مقاومت و دوام بالا در برابر شرایط محیطی نامطلوب برخوردارند، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. فولاد سرد نورد از نسبت ضخامت به عرض پایینی برخوردار می‌باشد، حتی در مقادیر پایین نیروهای فشاری، برشی و خمشی در معرض کماتش‌های موضعی قرار می‌گیرند، که این موضوع در ستون‌های پر شده با بتن به دلیل وجود بتن و افزایش مقاومت ستون به خوبی کنترل می‌شود. در دهه‌های اخیر تکنولوژی ستون‌های فولادی سرد نورد شده، نقش بسیار مهمی را در ساخت ساختمان‌های بلند مرتبه در جهان ایفا نموده است. بیشتر مطالعات و تحقیقات انجام شده بر روی این ستون‌ها مربوط به بارگذاری محوری فشاری، لرزه‌ای و ... می‌باشند. هنگامی که ستون‌های CFT در ساختمان‌های مرتفع، ایستگاه‌های مترو یا اسکله‌های پل مورد استفاده قرار می‌گیرند، ممکن است تحت فشارهای دینامیکی زیاد مانند ضربه یا انفجار قرار بگیرند. بارهای ضربه‌ای در هنگام برخورد دو شیء به یکدیگر یا اصابت یک جسم در حال سقوط به یک سازه ایجاد می‌شوند. بارهای ضربه‌ای از نوع بارهای دینامیکی بوده که برخلاف بارهای استاتیکی در بازه زمان تغییر می‌کنند که این تغییرات ممکن است در مقدار، جهت و یا محل اعمال بار باشند. بارگذاری ضربه‌ای از لحاظ جهت اعمال به سازه به دو نوع تقسیم می‌شوند که عبارتند از: بارگذاری جانبی^۲ (مانند برخورد وسایل نقلیه، کشتی‌ها و قطارها با سازه)، بارگذاری ضربه‌ای محوری^۳ (مانند سقوط و یا رهاسازی جرثقیل، وسیله نقلیه و ...). پدیده ضربه، و ضربه زدن به یک جسم به مفهوم گسترده، مدت‌های طولانی مورد علاقه بسیاری از محققان بوده است. مطالعات نظری متعددی در این زمینه به انجام رسیده است، اما موفقیت عمده در مطالعات ضربه کاربرد روش‌های عددی مانند روش المان محدود برای تحلیل بارهای ضربه‌ای تحت شرایط مختلف بدون نیاز به تحقیقات تجربی پرهزینه و وقت‌گیر بوده است. روش‌های عددی نه تنها ابزارهای ارزشمندی برای تحلیل آسیب موضعی فراهم کردند، بلکه به تعیین پاسخ کلی سازه‌ها تحت بارهای ضربه‌ای نیز کمک کردند.

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی ستون‌های فولادی سرد نورد پر شده با بتن در برابر بار ضربه‌ای جانبی و محوری صورت پذیرفته است. تیان و همکارانش در سال ۲۰۰۸ رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن واکنش‌پذیر (RPC) در برابر بارگذاری ضربه‌ای محوری را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ضریب افزایش ظرفیت باربری و نسبت ظرفیت باربری بین لوله فولادی و هسته RPC بدست آمده است [۱]. در تحقیق ژیاوتویان و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های CFT و ستون‌های CFT محصور شده با پلیمر تقویت شده الیاف کربن (CFRP) تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری در سطوح مختلف انرژی ضربه‌ای پرداخته شده است. در این مقاله از نرم‌افزار ANSYS / LS-DYNA برای شبیه‌سازی ستون‌های CFT تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری استفاده شده است [۲]. در سال ۲۰۱۵ مانموهان رفتار ستون‌های دایره‌ای فولادی جدار نازک با لوله‌ی تک جداره، دو جداره و دارای سخت‌کننده را تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری مورد بررسی قرار داده است. در این بررسی اثرات جذب انرژی، بارهای حداکثر و تغییر شکل لوله‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مقاله از نرم‌افزار LS-DYNA برای شبیه‌سازی عددی

^۱ Concrete Filled Tube^۲ Lateral Impact Load^۳ Axial Impact Load

ستون‌ها استفاده شده است [۳]. در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۶ از میرمعینی و همکارانش منتشر شده است، رفتار ستون‌های دایره‌ای پر شده با بتن تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری مورد بررسی قرار گرفته شده است. در این مقاله اثرات محصور شدگی نمونه‌ها، نسبت‌های مختلف ارتفاع ستون به قطر (H/D)، نسبت قطر به ضخامت دیواره فولادی (D/t)، ضریب افزایش دینامیکی (DIF) و همچنین مودهای خرابی نمونه‌ها از طریق مطالعات آزمایشگاهی و همچنین مدل‌سازی عناصر محدود (FEA^۴) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS بررسی شده است [۴]. در سال ۲۰۱۸ ال‌ریافیه و همکارانش رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقطع مربعی را که به صورت هم‌زمان تحت بارگذاری ضربه‌ای جانبی و محوری قرار دارد، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله، هشت نمونه تحت موقعیت‌های متفاوت بار ضربه‌ای، ضخامت‌های مختلف صفحات انتهایی ستون و ارتفاع‌های متفاوت پرشدگی ستون با بتن آزمایش شدند [۵]. در سال ۲۰۱۸ گونگ‌دو و همکارانش عملکرد ستون‌های فولادی پر شده با بتن پس از اعمال بارگذاری ضربه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به بررسی اثر ارتفاع ضربه جانبی و نسبت قطر بیرونی به ضخامت بیرونی لوله فولادی (D/t)، بر مقاومت باقی‌مانده محوری ستون‌های لوله‌ای فولادی دایره‌ای پر شده با بتن پرداخته شده است. در این مقاله در کل شانزده نمونه تحت پارامترهای مختلف بررسی شدند [۶]. ژو و همکارانش در سال ۲۰۱۸ به مطالعه عددی برای بررسی ستون‌های فولادی جزئی پر شده با بتن تحت بارگذاری ضربه‌ای جانبی پرداختند. در کل ۲۴ نمونه برای تحلیل عناصر محدود (FEA) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شد. ارتفاع پر شده با بتن، انرژی ضربه، جهت ضربه و مقاومت تسلیم فولاد پارامترهای اصلی در این مطالعه بودند [۷]. لیانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار ستون‌های بتنی FRP-SR (CFRP-SR-بتن) تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری با استفاده از آزمایش چکش ضربه پرداخته‌اند. پارامترهای آزمایشگاهی در نظر گرفته شده در این آزمایش شامل ضخامت لوله CFRP، نسبت حجمی SR، ارتفاع و وزن چکش ضربه ای می‌باشند [۸]. شیائونگ ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار ستون‌های دایره‌ای شکل تحت بارگذاری فشاری محوری و ضربه جانبی پرداختند. چهل و هشت ستون فولادی پر شده با بتن برای تحلیل اثرات مقاومت فشاری بتن، موقعیت ضربه و انرژی ضربه بر ظرفیت محوری نهایی باقی مانده، شکل‌پذیری و سختی اولیه ستون‌های پر شده با بتن در این مقاله ارائه شده است [۹]. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ نیز مطالعاتی در زمینه ستون‌های با مقطع مربعی شکل پر شده با بتن تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری انجام دادند. در این مقاله ستون‌ها تحت بارگذاری هم‌زمان بار استاتیکی و دینامیکی قرار گرفتند. ایشان ارتفاع متغیر ضربه‌زننده و انواع انرژی ضربه را به عنوان پارامترهای تاثیرگذار مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در مطالعه‌ای که توسط ژو ژوا و همکارانش در سال ۲۰۱۹ ارائه شده است به بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار ستون‌های دارای مقطع ناودانی با فولاد سرد نورد تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداخته شده است. در این مقاله پارامترهایی مانند رفتار غیر خطی بودن مصالح، اثر نرخ کرنش، ناکاملی اولیه و اندرکنش بین ضربه‌زننده و ستون در نظر گرفته شده است [۱۱]. لن و همکارانش در سال ۲۰۱۹ به مطالعه عددی ستون‌های فولادی پر شده با بتن تحت بار ضربه‌ای محوری با استفاده از صفحات صلب انتهایی پرداخته‌اند. در این تحقیق اثرات پارامترهای مختلف شامل سرعت ضربه، نسبت جرم ضربه‌زننده به جرم ستون، نسبت بار فشار محوری به ظرفیت بار فشاری محوری، نسبت مساحت فولاد به مساحت بتن، نسبت لاغری، مقاومت بتن، موقعیت ضربه و شرایط مرزی بر پاسخ دینامیکی ستون‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. علاوه بر این، با تغییر پارامترهای مصالح بتن، جریان خزش بتن بر روی بار ضربه نیز در نظر گرفته شده است [۱۲]. مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار لوله‌های منشوری جدار نازک با گوشه‌های تورفته تحت تأثیر بارگذاری ضربه‌ای محوری توسط فردینوس و همکارانش در سال ۲۰۱۹ انجام شده است. در این مطالعه ستون‌های با مقطع مربعی شکل دارای جدار آلومینیومی نازک با چهار تورفتگی در گوشه‌ها می‌باشند که تأثیر بعضی پارامترهای هندسی مانند عمق تورفتگی‌ها بر رفتار ضربه‌ای نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۳]. همچنین شان و همکارانش در سال ۲۰۲۰ به بررسی رفتار ستون‌های بتنی محصور شده با FRP که دارای سطح مقطع مربع و دایره‌ای تحت بار ضربه‌ای محوری می‌باشند، پرداخته‌اند. پارامترهای اصلی مورد بررسی در این مطالعه شامل نوع FRP، تعداد لایه‌های FRP و نسبت شعاع گوشه به ضخامت ستون می‌باشند. در این مقاله نتایج آزمایشگاهی ستون‌های بتنی مربعی و دایره‌ای در مقیاس نسبتاً بزرگ در معرض بارگذاری ضربه‌ای محوری، با استفاده از یک ماشین چکش انداز با اندازه بزرگ، گزارش شده است [۱۴].

⁴ Finite element analysis

مطالعات متعدد آزمایشگاهی و عددی با در نظر گرفتن بارگذاری‌ها و مقاطع مختلف درباره ستون‌های CFT انجام شده است. در کارهای پیشین غالباً این ستون‌ها به طور کاملاً پر شده با بتن مورد استفاده قرار می‌گرفتند ولی استفاده از ستون کاملاً پر شده برای سازه‌ها اقتصادی نیست و باعث افزایش وزن سازه‌ها می‌شود، مگر اینکه استحکام و شکل‌پذیری خیلی زیادی برای مقاومت در برابر زلزله مدنظر باشد. همچنین کاربرد مقاطع فولادی سرد نورد شده در ستون‌های CFT شرایطی را ایجاد می‌نماید که بررسی مقاومت و سختی و رفتار آنها در برابر بارهای ضربه‌ای ضرورت پیدا می‌کند. هرچند کاربرد ستون‌های فولادی جزئی پر شده با بتن در سازه‌های مختلف افزایش چشمگیری داشته است، اما بررسی رفتار این ستون‌ها در برابر بارگذاری ضربه‌ای محوری تا کنون مورد توجه نبوده است. بنابراین در این مقاله به بررسی رفتار ستون‌های فولادی سرد نورد جزئی پر شده با بتن تحت بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و بار ضربه‌ای محوری پرداخته شده است. در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف سرعت ضربه وارده، نسبت ارتفاع بتن پر شده به کل ستون، ارتفاع سقوط ضربه‌زننده، نسبت جرم ضربه‌زننده به جرم کل ستون، نسبت بار محوری فشاری استاتیکی و خروج از مرکزیت بار ضربه‌ای محوری بر پاسخ ضربه‌ای ستون‌های جزئی پر شده با بتن با مقطع مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی‌های مختلف مورد نظر در این مقاله از نرم‌افزار ABAQUS (ABAQUS/CAE 6.13) استفاده خواهد شد. ابتدا جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی عناصر محدود، نتایج حاصله از مدل‌سازی با داده‌های عددی مرجع [۱۲] مورد مقایسه قرار گرفته، سپس مطالعات پارامتریک انجام خواهد شد.

۲- روش تحقیق

به منظور مطالعه عددی رفتار ستون‌های فولادی سرد نورد جزئی پر شده با بتن تحت بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و بارگذاری ضربه‌ای محوری انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی اجتناب‌ناپذیر است. اولین گام در مدل‌سازی عددی، ایجاد هندسه مدل در نرم‌افزار می‌باشد. نحوه‌ی مدل‌سازی در نرم‌افزار مذکور به شرح زیر می‌باشد:

۲-۱- مدل‌سازی بتن

بتن به عنوان یک جسم ترد و شکننده یکی از مؤلفه‌های اساسی مدل‌سازی ستون‌های CFT محسوب می‌شود که از المان Solid برای مدل‌سازی این جسم استفاده می‌شود. برای گسسته‌سازی هسته بتنی از المان‌های مکعبی C3D8R استفاده می‌شود. این المان یک المان شش وجهی هشت گرهی است که دارای سه درجه آزادی جابجایی در هر گره در جهت محورهای X، Y و Z، با انتگرال-گیری کامل خطی می‌باشد. برای تعریف خصوصیات مصالح بتن در نرم‌افزار ABAQUS از دو رفتار الاستیک و رفتار پلاستیک استفاده می‌شود. برای مشخصات الاستیک بتن از مدول یانگ و ضریب پواسون و برای شبیه‌سازی الگوهای رفتاری غیر خطی بتن از مدل خرابی پلاستیک بتن (CDP^۵) استفاده شده است. برای تعریف مدل CDP در این مقاله ابتدا پارامترهایی که تعیین کننده سطح خسارت بتن می‌باشند، تعیین می‌شود. این پارامترها شامل: زاویه اتساع ($\psi=30^\circ$ درجه)، خروج از مرکزیت پتانسیل جریان ($e=0.1$)، نسبت تنش فشاری معادل اولیه دومحوره به تک محوری ($f_{bo}/f_{co}=1/16$)، فاکتور شکل سطح تسلیم ($K_c=2/3$)، ویسکوزیته ($\mu=0$) می‌باشد. در این مقاله از بتن C40 با مدول الاستیسیته معادل ۲۸ روزه بتن $E_c=32500$ (MPa) برای پر کردن لوله فولادی استفاده شده است. برای تعیین مدل خسارت پلاستیک بتن CDP از مشخصات جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مورد نیاز در خصوصیات خسارت پلاستیک بتن [۱۲]

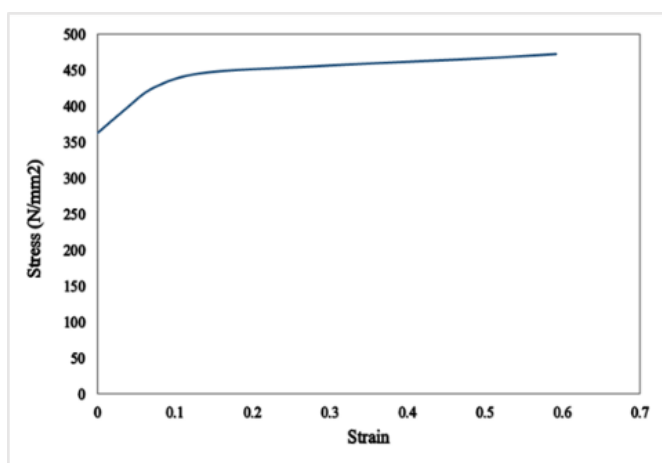
مقاومت فشاری (MPa)	کرنش غیر الاستیک (فشاری)	ضریب خسارت (dc)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش غیر الاستیک (کششی)	ضریب خسارت (dt)
۱۰/۷۲	.	.	۲/۳۹	.	.
۱۳/۹۳	$۲/۷۰ \times 10^{-5}$	۰/۰۱۵	۲/۳۲	$۲/۴۷ \times 10^{-5}$	۰/۱۹۹
۱۷/۴۲	$۸/۱۰ \times 10^{-5}$	۰/۰۳۵	۲/۰۳	$۵/۶۵ \times 10^{-5}$	۰/۳۹۳
۲۰/۳۴	$۱/۵۶ \times 10^{-4}$	۰/۰۵۶	۱/۶۳	$۱/۰۳ \times 10^{-4}$	۰/۵۹۶
۲۲/۷۰	$۲/۵۴ \times 10^{-4}$	۰/۰۸۰	۱/۳۴	$۱/۴۶ \times 10^{-4}$	۰/۷۱۶
۲۴/۵۳	$۳/۷۲ \times 10^{-4}$	۰/۱۰۵	۱/۰۸	$۱/۹۷ \times 10^{-4}$	۰/۸۰۹
۲۶/۸۵	$۸/۴۸ \times 10^{-4}$	۰/۱۹۶	۰/۸۸	$۲/۵۷ \times 10^{-4}$	۰/۸۷۲
۲۵/۸۵	$۱/۲۶ \times 10^{-3}$	۰/۲۷۵	۰/۶۸	$۳/۴۸ \times 10^{-4}$	۰/۹۲۲
۲۲/۴۹	$۱/۹۶ \times 10^{-3}$	۰/۴۰۳	۰/۵۸	$۴/۲۵ \times 10^{-4}$	۰/۹۴۵
۲۰/۱۱	$۲/۴۳ \times 10^{-3}$	۰/۴۸۳	۰/۴۵	$۵۲/۷۶ \times 10^{-4}$	۰/۹۶۸
۱۸/۹۹	$۲/۶۶ \times 10^{-3}$	۰/۵۲۰	۰/۳۸	$۷/۱۴ \times 10^{-4}$	۰/۹۷۸
۱۵/۲۴	$۳/۵۶ \times 10^{-3}$	۰/۶۴۴	۰/۲۸	$۱/۰۳ \times 10^{-3}$	۰/۹۸۸
۱۳/۷۷	$۳/۹۹ \times 10^{-3}$	۰/۶۹۲	-	-	-
۱۰/۱۲	$۵/۴۵ \times 10^{-3}$	۰/۸۰۷	-	-	-
۶/۸۲	$۷/۸۳ \times 10^{-3}$	۰/۸۹۹	-	-	-
۲/۹۱	$۱/۸۶ \times 10^{-2}$	۰/۹۸۲	-	-	-

۲-۲- مدل سازی فولاد

برای مدل سازی جداره فولادی در ستون های CFT از المان حجمی Solid استفاده شده است. همانند مدلسازی بتن، برای گسسته سازی جداره فولادی نیز از المان های مکعبی C3D8R استفاده می شود. در این مقاله از فولاد سرد نورد برای جداره فولادی استفاده شده است. برای تعریف خصوصیات الاستیک مصالح فولادی سرد نورد از مشخصات جدول ۲ استفاده شده است. همچنین برای تعیین مشخصات پلاستیک فولاد سرد نورد شده از قسمت غیر خطی نمودار تنش-کرنش شکل ۱ با توجه به مقدار تنش تسلیم مورد نظر استفاده می شود.

جدول ۲- مشخصات مصالح فولاد سرد نورد مصرفی [۱۵]

مشخصات مصالح فولادی	نماد	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته فولاد	Es	۲۰۳۰۰۰	MPa
چگالی فولاد	r_s	۷۸۵۰	Kg/m ³
ضریب پواسون	u	۰/۳	-
تنش تسلیم فولاد	Fy	۳۶۲/۶۶۴	MPa
تنش نهایی فولاد	Fu	۴۷۹/۶	MPa



شکل ۱: نمودار تنش- کرنش پلاستیک فولاد سرد نورد شده [۱۵].

۲-۳- مدلسازی چکش ضربه

برای مدل کردن چکش ضربه‌زننده از المان صلب توپر R3D4 استفاده شده است. این المان ۴ گرهی سه بعدی، دو طرفه و صلب می‌باشد.

۲-۴- تعریف تماس بین سطوح

در یک تحلیل اجزای محدود، شرایط تماس اجازه می‌دهد که نیرو از یک بخش مدل به بخش دیگر آن منتقل شود. در ستون-های مرکب انتقال نیرو بین فولاد و بتن از طریق تماس بین این دو مصالح صورت می‌گیرد. برای تعیین نحوه تماس بین ستون فولادی جزئی پر شده با بتن و ضربه‌زننده از المان سطح به سطح (Surface-to-surface contact) استفاده می‌شود. این المان، تماس بین دو سطح تغییر شکل‌پذیر و یا بین یک سطح تغییر شکل‌پذیر و یک سطح صلب را تعریف می‌کند. همچنین در این مقاله هیچ‌گونه لغزشی بین هسته بتنی و پوسته فولادی تعریف نشده است. برای اعمال خصوصیات تماس بین ضربه‌زننده و ستون CFT پارامترهای به کار رفته به شرح زیر می‌باشند:

۱- رفتار نرمال (normal behavior): با در نظر گرفتن تماس سخت (Hard Contact) بین سطح فولاد با بتن، نفوذ سطح بتن به سطح فولاد به حداقل می‌رسد و اجازه انتقال تنش کششی را در طول اندرکنش نمی‌دهد، و فقط فشار بین دو سطح هنگام تماس با یکدیگر انتقال می‌یابد و وقتی از یکدیگر جدا می‌شوند هیچ فشاری مابین آن دو انتقال نمی‌یابد.

۲- رفتار تانژانتی (Tangential Behavior): برای مدل‌سازی رفتار مماسی و لغزشی دو سطح از مدل اصطکاکی کلمب استفاده می‌شود. گزینه penalty برای تعیین ضریب اصطکاک بین سطوح بتن و فولاد تعریف می‌شود. در این مقاله از ضریب اصطکاک ۰/۱ استفاده شده است.

۲-۵- نوع تحلیل

در این مطالعه برای تعیین ظرفیت باربری محوری نهایی ستون‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری از تحلیل استاتیکی Static General استفاده شده است. این نوع تحلیل قادر به حل مسائل خطی و یا غیرخطی هستند و در این تحلیل وابستگی رفتار ماده به زمان نادیده گرفته شده و مستقل از زمان، تحلیل می‌شود. در اعمال بارگذاری ضربه‌ای، از تحلیل Dynamic/Explicit نرم‌افزار ABAQUS

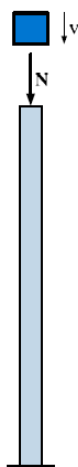
استفاده شده است. این تحلیل دینامیکی صریح^۶ غیر خطی مستقل از نوع و مدت زمان بارگذاری است، و برای تحلیل سازه‌هایی با هندسه غیرخطی و یا برای سازه‌هایی با مصالح غیرخطی بایستی این روش را به کار برد.

۲-۶- بارگذاری و شرایط مرزی

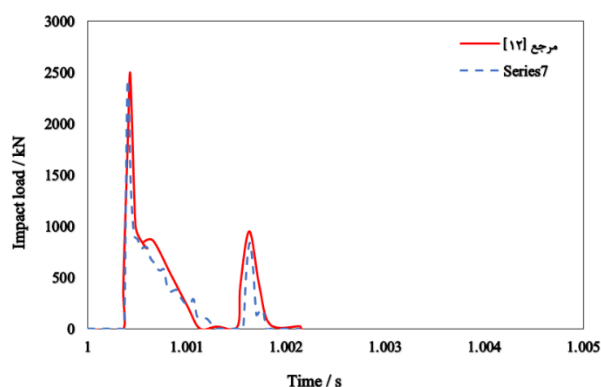
به منظور مقید کردن درجات آزادی انتقالی و دورانی یک شرط مرزی Displacement/Rotation تعریف می‌شود. در این شرط مرزی همه درجات آزادی یک طرف ستون محدود شده و درجات آزادی سمت دیگر که ضربه از آن سمت به ستون وارد می‌شود آزاد فرض شده است (شرایط انتهایی به صورت یک سر گیردار-یک سر آزاد می‌باشد). در این بررسی ستونها تحت بارگذاری محوری بدون خروج از مرکزیت قرار گرفته‌اند. بار محوری فشاری استاتیکی با استفاده از اعمال یک نیروی متمرکز در جهت محور عمودی ستون به نمونه اعمال شده است. برای مدل‌سازی بار ضربه‌ای وارد شده به ستون و نحوه اعمال آن از یک ضربه‌زننده‌ی صلب که دارای جرم معین و سرعت اولیه‌ای می‌باشد، استفاده شده است. برای تعریف سرعت اولیه وارد به ستون از قسمت Predefined field، گزینه Velocity انتخاب می‌شود.

۲-۷- صحت‌سنجی مدل عناصر محدود ستون CFT تحت بار ضربه‌ای محوری

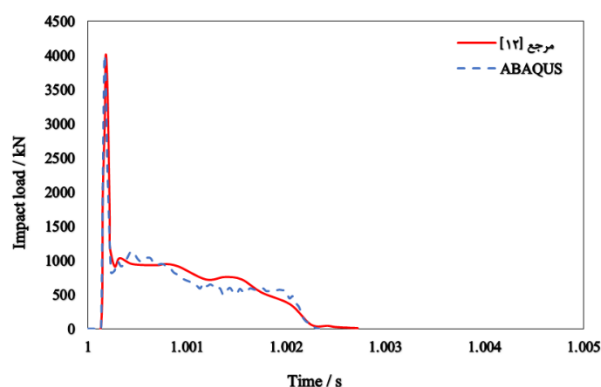
جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی عددی، ابتدا برخی از نمونه‌های عددی بررسی شده توسط لن و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۱۲]، در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده و نتایج حاصله با نتایج مرجع مذکور مورد مقایسه قرار گرفته است. ستون بررسی شده توسط لن و همکاران دارای مقطع دایره‌ای شکل به قطر خارجی ۲۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۵ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر بوده و تحت بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و ضربه‌ای، همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، قرار دارد. بارگذاری ضربه‌ای محوری توسط ضربه‌زننده‌ای به جرم ۹۰۰ کیلوگرم که با سرعت ۵ متر بر ثانیه به طرف ستون رها می‌شود، انجام می‌گیرد. در این مقاله از فولاد کربنی گرم نورد Q235 که با استفاده از آیین‌نامه GB 50017-2003 تعیین شده است، برای جداره فولادی و برای هسته بتنی از بتن C40 استفاده شده است. شرایط مرزی واقعی آزمون ضربه به این صورت است که همه درجات آزادی صفحه پایینی محدود شده و درجات آزادی گره بالایی آزاد فرض شده است. نتایج حاصله به صورت منحنی‌های تاریخچه زمانی بار ضربه‌ای در سطح بین ضربه‌زننده و مقطع ستون در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۲: نمای کلی مدل [۱۲].



ب



الف

شکل ۳: منحنی‌های تاریخچه زمانی بار ضربه‌ای - الف - سرعت ضربه ۱۵ متر بر ثانیه - ب - سرعت ضربه ۵ متر بر ثانیه

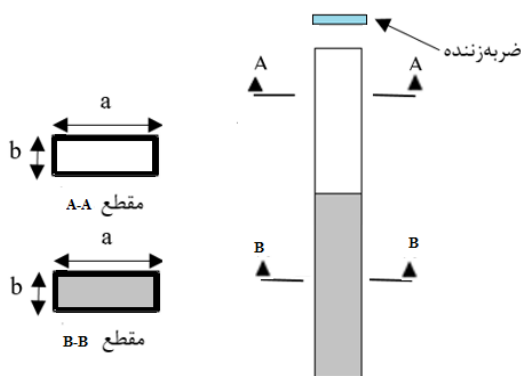
(مقایسه نتایج ABAQUS با نتایج مرجع [۱۲]).

همانطور که از نمودارهای شکل ۳ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی عناصر محدود با ABAQUS و نتایج مرجع [۱۲] وجود دارد و این تطابق، صحت روش مدل‌سازی عددی مورد استفاده را تایید می‌کند. بنابراین با توجه به صحت مدل‌سازی عناصر محدود می‌توان به بررسی رفتار ستون‌های جزئی پر شده با بتن با مقطع مستطیلی، با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف پرداخت.

۳- مطالعه پارامتریک و بحث بر روی نتایج

در این تحقیق به منظور برآورد پاسخ ستون‌های فولادی سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن تحت بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و بارگذاری ضربه‌ای محوری، به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی رفتار ستون‌های مذکور، پرداخته می‌شود. این پارامترها عبارتند از: سرعت ضربه وارده، نسبت ارتفاع بتن پر شده به کل ستون، ارتفاع سقوط ضربه‌زننده، نسبت جرم ضربه‌زننده به جرم کل ستون، نسبت بار محوری فشاری استاتیکی و خروج از مرکزیت بار ضربه‌ای محوری. مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

نمونه‌ها دارای مقطع مستطیلی شکل به ابعاد $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ، طول 2000 mm و ضخامت جداره فولادی 4 mm می‌باشند. نوع فولاد مورد استفاده فولاد سرد نورد شده می‌باشد. در این نمونه‌ها از ضربه‌زننده‌ای به ابعاد $200\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ استفاده شده است که نمای کلی نمونه مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمای کلی مدل و مقطع نمونه مورد بررسی.

از مشخصات مصالح بتنی و فولاد سرد نورد بیان شده در بخش‌های ۱-۲ و ۲-۲ برای انجام مطالعات پارامتریک استفاده شده

است. در این مقاله، ابتدا ستون تحت بارگذاری محوری فشاری قرار گرفته و ظرفیت باربری محوری نهایی ستون‌ها با نسبت پرشدگی‌های مختلف بدست آمده است. سپس ستون‌های مذکور تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری همزمان با بار محوری فشاری استاتیکی قرار داده شده و اثر پارامترهای مختلف معرفی شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

برای تعیین ظرفیت باربری محوری نهایی ستون‌ها توسط نرم‌افزار ABAQUS، از تحلیل Static, General استفاده شده است. سه ارتفاع پرشدگی مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر (بیانگر نسبت پرشدگی‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد) در نظر گرفته شده و ظرفیت محوری نهایی این ستون‌ها بدست آمده که در جدول ۳ با N_{II} نشان داده شده است. همانگونه که از جدول مذکور مشاهده می‌شود برای هر سه نسبت پرشدگی در ستون‌های جزئی پر شده با بتن ظرفیت باربری مشابهی بدست آمده است.

جدول ۳: ظرفیت نهایی ستون‌ها با نسبت پرشدگی‌های مختلف

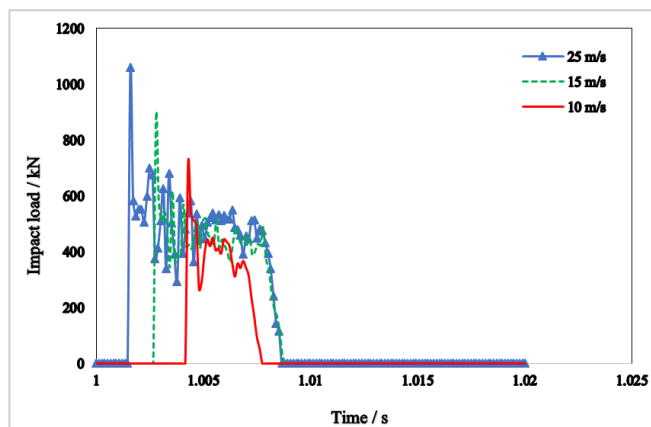
نسبت پرشدگی با بتن (درصد)	N_{II} (N) (ABAQUS)
۲۵	۹۵۱۱۰۰
۵۰	۹۵۴۲۳۰
۷۵	۹۵۶۲۵۰

مطالعات پارامتریک مورد بحث در این مقاله در شش عنوان زیر بررسی می‌شود:

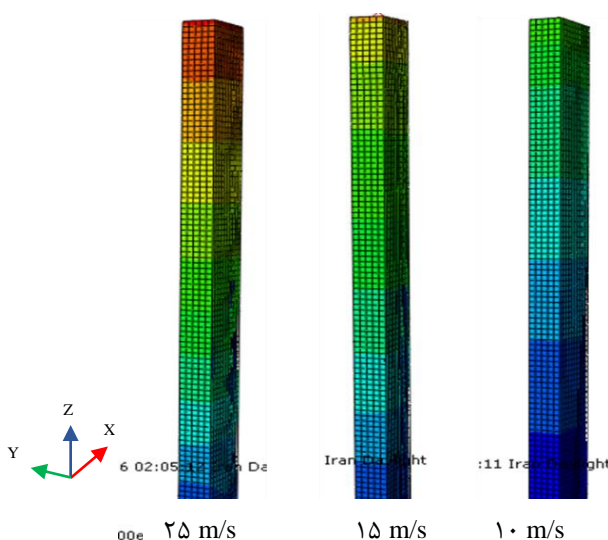
۱. بررسی اثر سرعت‌های مختلف ضربه وارده بر پاسخ دینامیکی ستون‌های مورد مطالعه
۲. بررسی اثر ارتفاع‌های مختلف سقوط ضربه‌زننده بر پاسخ دینامیکی ستون‌ها
۳. بررسی اثر نسبت‌های مختلف ارتفاع بتن پر شده به کل ستون بر پاسخ ضربه‌ای ستون‌ها
۴. بررسی تاثیر نسبت‌های متفاوت جرم ضربه‌زننده به جرم کل ستون بر پاسخ دینامیکی ستون‌ها
۵. بررسی تاثیر نسبت‌های مختلف بار فشاری محوری اعمالی بر پاسخ دینامیکی ستون‌ها
۶. بررسی تاثیر خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری بر پاسخ دینامیکی ستون‌ها

۳-۱- بررسی اثر سرعت‌های مختلف ضربه وارده

پارامتر متغیر در این بخش، سرعت بار ضربه‌ای محوری می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر بر پاسخ دینامیکی ستون‌های سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن، ستون‌های دارای ارتفاع بتن پر شده ۱۰۰۰ میلی‌متر از تراز پایه تحت بار محوری فشاری استاتیکی به اندازه ۵۰ درصد ظرفیت نهایی ستون (۴۷۵۰۰۰N) قرار گرفته‌اند. این ستون‌ها به طور همزمان تحت اثر بار ضربه‌ای محوری با سه سرعت مختلف ۱۰m/s، ۱۵m/s و ۲۵m/s قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که ضربه‌زننده‌ای دارای جرم ثابت ۱۰۰ kg و در موقعیت ارتفاعی ثابت ۲۰۴۰ میلی‌متر از تکیه‌گاه پایینی ستون مورد نظر قرار گرفته است. بعد از انجام تحلیل Dynamic/Explicit، خروجی تحلیل‌ها به صورت نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان در سطح بین ضربه‌زننده و ستون جزئی پر شده در جهت اعمال ضربه برای حالت‌های مختلف در شکل ۵ و در شکل ۶ به صورت کانتورهای جابجایی در انتهای زمان بارگذاری ضربه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار بار ضربه‌ای-زمان برای اثر سرعت‌های مختلف ضربه وارده به ستون.

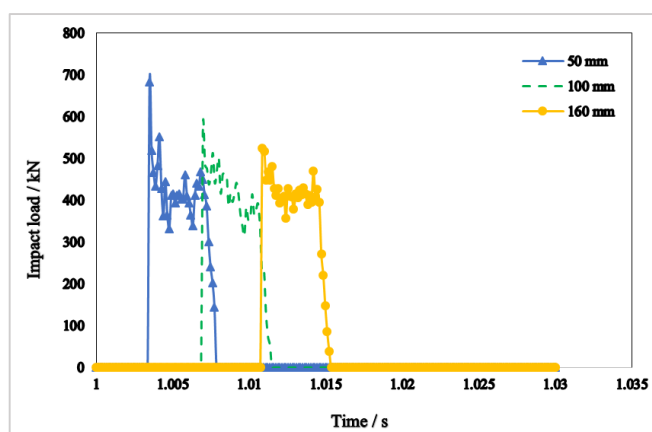


شکل ۶: کانتورهای جابجایی ستون تحت اثر سرعت‌های مختلف ضربه محوری.

از نمودارهای نشان داده شده در شکل ۵ مشاهده می‌شود که منحنی‌های بار ضربه‌ای-زمان روند مشابهی را در سرعت‌های مختلف ضربه‌ای دارند. هنگامی که ضربه‌زننده به ستون ضربه‌ای وارد می‌کند، بار ضربه به سرعت افزایش می‌یابد، پس از مقداری کاهش نسبت به نقطه اوج بار ضربه‌ای، دارای یک نوسانات نسبتاً ماندگاری بوده و در هنگام جدا شدن ضربه‌زننده از ستون، در نهایت به صفر می‌رسد. در سرعت‌های بیشتر ضربه، این روند ثابتی که نمودار بار ضربه‌ای بعد از نقطه اوج طی می‌کند، طولانی‌تر می‌شود، و این موضوع به این دلیل است که ناحیه تحت پوشش منحنی نیروی ضربه-زمان، مدت تماس ضربه‌زننده و ستون را نشان می‌دهد، بنابراین همانطور که انتظار می‌رود، زمانی که سرعت ضربه بالاتر باشد زمان تماس بین ضربه‌زننده و ستون طولانی‌تر بوده و بنابراین مساحت تحت پوشش منحنی نیروی ضربه-زمان بزرگتر خواهد بود. همانگونه که از نمودارها مشخص است هر چه سرعت ضربه پایین‌تر باشد بار ضربه‌ای کوچکتر بوده و با افزایش سرعت ضربه از ۱۰ به ۲۵ متر بر ثانیه، بار ضربه‌ای به میزان $38/50\%$ افزایش می‌یابد. بیشترین بار ضربه‌ای مربوط به سرعت ۲۵ متر بر ثانیه به اندازه $1160/55$ kN و کمترین مقدار آن به اندازه $713/3$ kN مربوط به سرعت ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت ضربه وارده به ستون، تغییر شکل بیشتری در ستون‌ها اتفاق افتاده است. همچنین مشاهده می‌شود که در سرعت‌های بالاتر، فولاد در قسمت بالای ستون و نزدیکی مکان ضربه دچار تغییر شکل بیشتری شده است، در حالی که در قسمت بتنی ستون صدمه آشکاری مشاهده نمی‌شود. در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه تغییر شکل غالب ستون، تغییر شکل جانبی در جهت Y می‌باشد که با افزایش سرعت ضربه به ۲۵ متر بر ثانیه، بیشترین تغییر شکل رخ داده و کماتش‌های موضعی به وضوح در ستون دیده می‌شود.

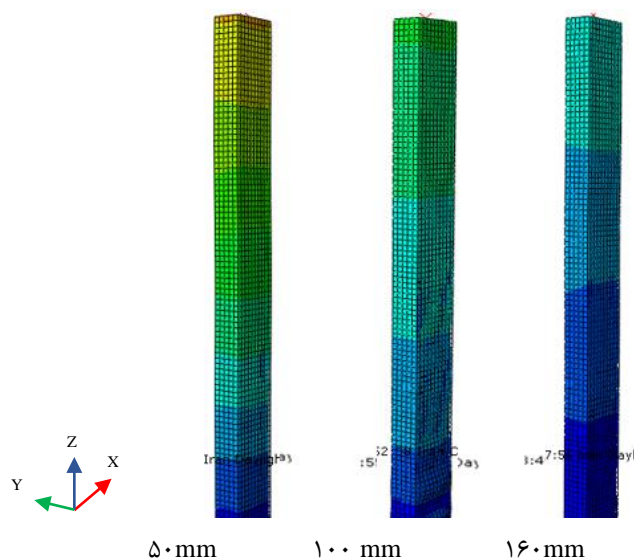
۳-۲- بررسی اثر ارتفاع سقوط ضربه‌زننده

در این بخش به بررسی تأثیر ارتفاع سقوط ضربه‌زننده بر پاسخ دینامیکی ستون‌های جزئی پر شده با بتن پرداخته می‌شود. برای بررسی تأثیر این پارامتر، ستون‌های دارای ارتفاع بتن پر شده ۱۰۰۰ میلی‌متر از تراز پایه تحت بار محوری فشاری استاتیکی به اندازه ۵۰ درصد ظرفیت نهایی ستون (۴۷۵۰۰۰ N) قرار گرفته‌اند. ستون‌ها تحت اثر بار ضربه‌ای محوری در سه تراز ارتفاعی مختلف سقوط ضربه‌زننده ۵۰mm، ۱۰۰mm و ۱۶۰mm مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ضربه‌زننده دارای جرم ثابت ۱۰۰ kg بوده و با انرژی ضربه‌ای ۱۱۲۵۰ ژول که با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه به ستون مورد نظر ضربه وارد می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از انجام تحلیل *Dynamic/Explicit*، خروجی تحلیل‌ها به صورت نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان در سطح بین ضربه‌زننده و ستون جزئی پر شده در جهت اعمال ضربه برای حالت‌های مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. کانتورهای جابجایی نمونه‌های مورد بررسی در انتهای تحلیل در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۷: نمودار بار ضربه‌ای-زمان برای ارتفاع‌های مختلف سقوط ضربه‌زننده.

از نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سقوط ضربه‌زننده از ۵۰ به ۱۶۰ میلی‌متر، بار ضربه‌ای به اندازه ۲۳/۳۸٪ کاهش می‌یابد، که دلیل این امر را می‌توان در افزایش فاصله بین ضربه‌زننده و ستون و کاهش شدت برخورد ضربه بیان کرد. همچنین با افزایش فاصله ضربه‌زننده از ستون، زمان رسیدن منحنی بار ضربه‌ای به نقطه اوج خود افزایش پیدا کرده و زمان بیشتری طول می‌کشد تا ضربه‌زننده به ستون ضربه وارد نماید و در این حالت نمونه برای رسیدن به حداکثر مقدار بار ضربه‌ای به زمان بیشتری احتیاج دارد. بیشترین بار ضربه‌ای مربوط به ارتفاع سقوط ضربه‌زننده ۵۰mm به اندازه ۷۰۳/۲۱ kN و کمترین مقدار آن به اندازه ۵۳۴/۷۶ kN مربوط به ارتفاع سقوط ۱۶۰mm می‌باشد.

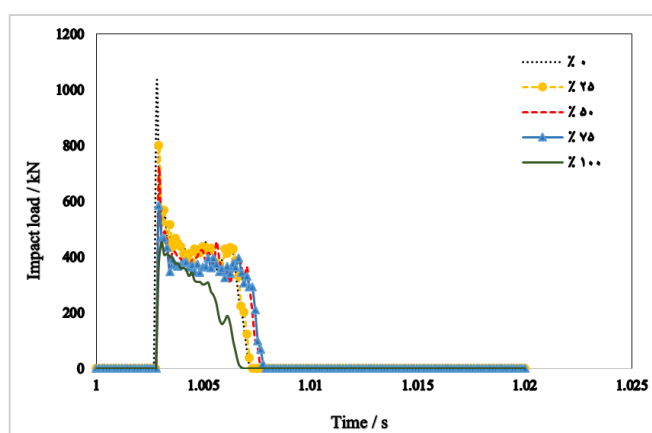


شکل ۸: کانتورهای جابجایی ستون به ازای ارتفاع‌های مختلف سقوط ضربه‌زننده.

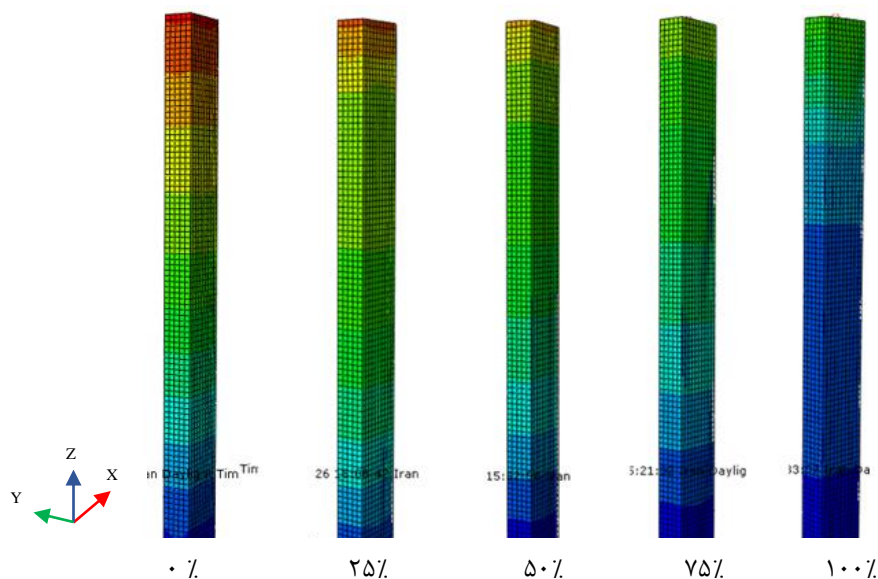
با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع سقوط ضربه‌زننده میزان تغییر شکل و کمانش ستون کاهش پیدا می‌کند. در ارتفاع سقوط ضربه‌زننده ۵۰ mm بیشترین تغییر شکل ستون در راستای Y می‌باشد، و کمترین میزان تغییر شکل‌های رخ داده در ارتفاع سقوط ضربه‌زننده ۱۶۰ mm در راستای X است.

۳-۳- بررسی اثر نسبت‌های مختلف ارتفاع بتن پر شده به ارتفاع کل ستون

پارامتر متغیر در این بخش، نسبت ارتفاع بتن پر شده به ارتفاع کل ستون می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر بر پاسخ دینامیکی ستون‌های سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن، ستون‌های دارای نسبت‌های مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پرشدگی تحت بار محوری فشاری استاتیکی به اندازه ۵۰ درصد ظرفیت نهایی ستون قرار گرفته‌اند. این ستون‌ها به طور همزمان تحت اثر بار ضربه‌ای محوری که ضربه‌زننده‌ای دارای جرم ثابت ۱۰۰ kg و در موقعیت ارتفاعی ثابت ۲۰۴۰ میلی‌متر از تکیه‌گاه پایینی ستون مورد نظر قرار گرفته است. ضربه وارده با انرژی ثابت ۱۱۲۵۰ ژول با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه به ستون‌ها ضربه وارد می‌کند. بعد از انجام تحلیل Dynamic/Explicit، خروجی تحلیل‌ها به صورت نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان در سطح بین ضربه‌زننده و ستون جزئی پر شده در جهت اعمال ضربه برای حالت‌های مختلف در شکل ۹ و در شکل ۱۰ به صورت کانتورهای جابجایی در انتهای تحلیل نشان داده شده است.



شکل ۹: نمودار بار ضربه‌ای-زمان در نسبت‌های پرشدگی مختلف.



شکل ۱۰: کانتورهای جابجایی ستون در نسبت‌های پرشدگی مختلف.

با مشاهده نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان شکل ۹ می‌توان گفت که بعد از اعمال بار ضربه‌ای، منحنی‌ها بلافاصله به نقطه حداکثر افزایش خود رسیده‌اند، که تحت اثر پرشدگی‌های مختلف این روند مشابه می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در برابر ارتفاع ثابت سقوط ضربه‌زننده به ازای مقادیر مختلف نسبت پرشدگی، رفتارهای متفاوتی در سازه ایجاد می‌شود، بطوریکه با افزایش نسبت پرشدگی، بار ضربه‌ای در ستون روند کاهشی داشته و درصد کاهش بار ضربه‌ای از ستون خالی تا ستون کاملاً پرشده به اندازه $55/8\%$ می‌باشد. همانطور که از نمودارها مشخص است بیشترین بار ضربه‌ای مربوط به ستون توخالی به مقدار 1025 kN و کمترین مقدار مربوط به ستون کاملاً پر شده با بتن به اندازه $452/4 \text{ KN}$ می‌باشد. با توجه به کانتورهای جابجایی ستون‌ها در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که بیشترین تغییر شکل در ستون‌های توخالی و در راستای محور ستون (جهت Z) رخ داده، و کمترین میزان تغییر شکل در ستون کاملاً پر شده در انتهای ستون و نزدیک ضربه‌زننده در راستای Y می‌باشد.

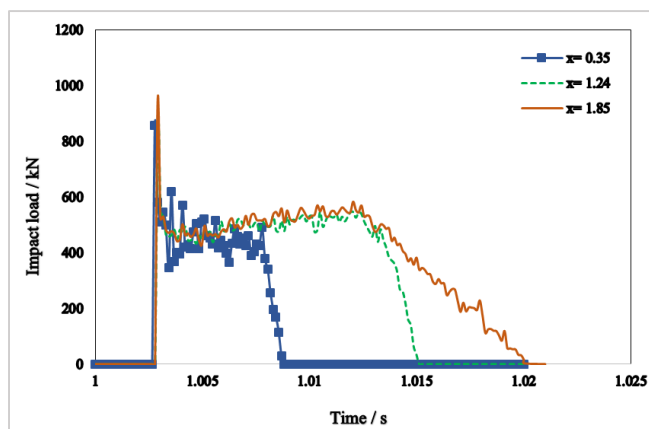
۳-۴- بررسی نسبت های جرم مختلف بر پاسخ دینامیکی ستون های مذکور

پارامتر متغیر در این بخش، نسبت جرم $(x=m/M)$ می‌باشد. در این نسبت m بیانگر جرم ضربه زننده و M جرم کل ستون است (جرم کل ستون در این مقاله برابر با $M=282 \text{ kg}$ می‌باشد). در این مقاله نسبت‌های مختلف جرم (x) مورد بررسی عبارتند از سه نسبت $0/35$ ، $1/24$ و $1/85$. برای بررسی تأثیر این نسبت بر پاسخ دینامیکی ستون‌های سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن، ستون‌های دارای ارتفاع بتن پر شده 1000 میلی‌متر از تراز پایه تحت بار محوری فشاری استاتیکی به اندازه 50% درصد ظرفیت نهایی ستون (475000 N) قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که ضربه‌زننده دارای انرژی ثابت 11250 ژول با سرعت 15 متر بر ثانیه بوده و در موقعیت ارتفاعی ثابت 2040 میلی‌متر از تکیه‌گاه پایینی به ستون‌ها ضربه وارد می‌کند. بعد از انجام تحلیل *Dynamic/Explicit*، خروجی تحلیل‌ها به صورت نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان در سطح بین ضربه‌زننده و ستون برای حالت‌های مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در شکل ۱۲ کانتورهای جابجایی نمونه‌های مورد بررسی در این بخش ارائه شده است.

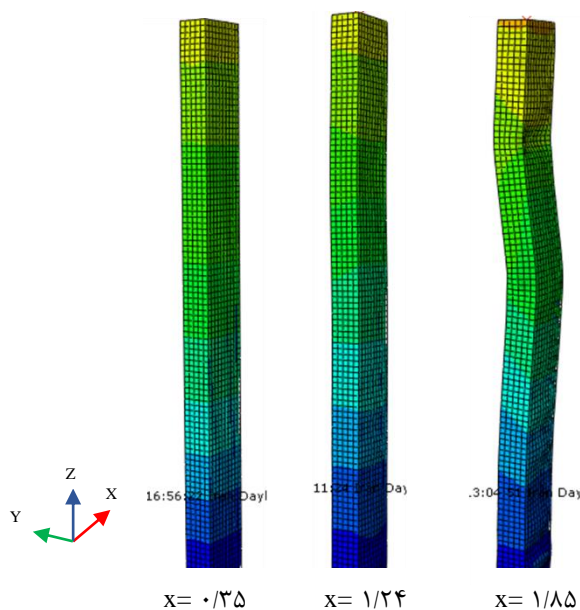
با توجه به منحنی‌های بار ضربه‌ای-زمان شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که منحنی‌های بار ضربه‌ای روند مشابهی را با نسبت‌های مختلف جرم دارا می‌باشند. وقتی ضربه‌زننده به ستون برخورد می‌کند، بار ضربه‌ای با نسبت‌های مختلف جرم بلافاصله به نقطه اوج خود می‌رسد، و در هنگام جدا شدن ضربه‌زننده از ستون بار ضربه‌ای با کمی نوسان، به یک مقدار نسبتاً ماندگاری رسیده (این کاهش بار ضربه‌ای در نسبت جرم $x=0/35$ بیشتر اتفاق می‌افتد) و در نهایت به صفر می‌رسد. همچنین در نسبت جرم‌های بالاتر، زمان تماس بین ستون و ضربه-

⁷ Mass Ratio

زنده پس از برخورد با ستون طولانی تر می باشد. و دلیل آن را می توان در افزایش انرژی جنبشی ضربه زنده زمانی که نسبت جرم بزرگتر باشد، بیان کرد که در این حالت ستون ظرفیت اتلاف انرژی پلاستیک بیشتری را در طی فرآیند ضربه نشان می دهد. با افزایش نسبت جرم از ۰/۳۵ تا ۱/۸۵ بار ضربه ای نیز به اندازه ۱۰٪ افزایش پیدا کرده است. همانطور که از نمودارها مشخص است بیشترین بار ضربه ای مربوط به نسبت جرم ۱/۸۵ به مقدار ۹۵۳ kN و کمترین مقدار مربوط به نسبت جرم ۰/۳۵ به اندازه ۸۵۷/۱۱ KN می باشد.



شکل ۱۱: نمودار بار ضربه ای-زمان در نسبت جرم های مختلف.



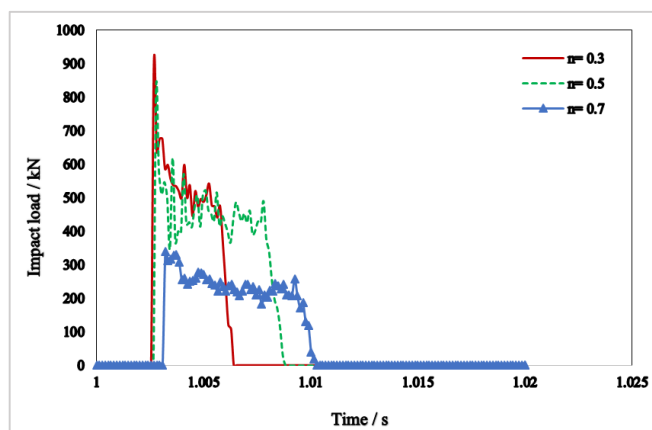
شکل ۱۲: کانتورهای جابجایی ستون در نسبت جرم های مختلف.

با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می شود که با افزایش نسبت جرم تغییر شکل های بیشتری در ستون قابل مشاهده است. بطوریکه در نسبت جرم ۱/۸۵، شاهد وقوع کمانش کلی و کمانش موضعی (در قسمت خالی ستون) در ستون هستیم و بیشترین مقدار تغییر شکل در این نسبت جرم، تغییر شکل محوری در راستای ضربه وارده به ستون می باشد. اما در نسبت های جرم ۱/۲۴ و ۰/۳۵ بیشترین تغییر شکل در ستون به ترتیب در راستای y و x اتفاق افتاده است.

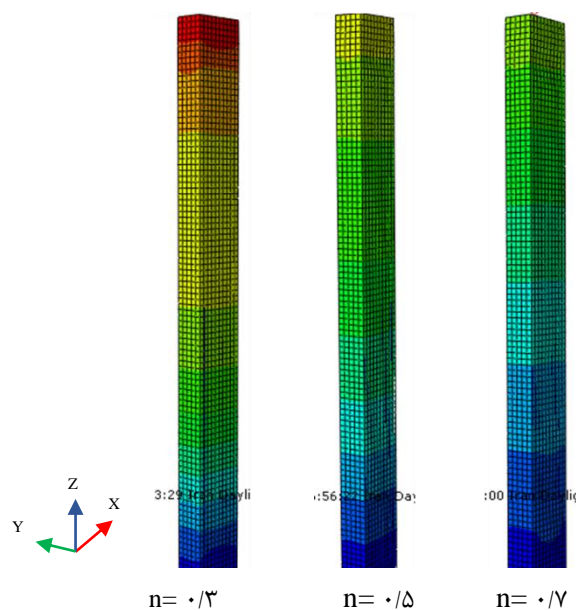
۳-۵- بررسی تاثیر نسبت های مختلف بار محوری فشاری اعمالی

در این بخش پارامتر متغیر، نسبت بار محوری فشاری $(n=P/Nu)$ می باشد. P بیانگر بار محوری فشاری وارده به ستون و Nu ظرفیت محوری فشاری ستون فولادی جزئی پر شده با بتن می باشد. در این مقاله برای بررسی تاثیر نسبت بار محوری فشاری (n) سه نسبت

۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ انتخاب شده است. برای بررسی تأثیر این پارامترها بر پاسخ دینامیکی ستون‌های سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن، ستون‌های دارای ارتفاع بتن پر شده ۱۰۰۰ میلی‌متر از تراز پایه تحت بار محوری فشاری استاتیکی با نسبت‌های مختلف بار محوری قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ضربه‌زننده‌ای دارای جرم ثابت 100 kg و در موقعیت ارتفاعی ثابت ۲۰۴۰ میلی‌متر از تکیه‌گاه پایینی ستون قرار گرفته و با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه و انرژی ثابت ۱۱۲۵۰ ژول با ستون برخورد می‌کند. بعد از انجام تحلیل *Dynamic/Explicit*، خروجی تحلیل‌ها به صورت نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان در سطح بین ضربه‌زننده و ستون جزئی پر شده در جهت اعمال ضربه برای حالت‌های مختلف در شکل ۱۳ و در شکل ۱۴ به صورت کانتورهای جابجایی نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار بار ضربه‌ای-زمان در نسبت‌های مختلف بار فشاری محوری اعمالی.



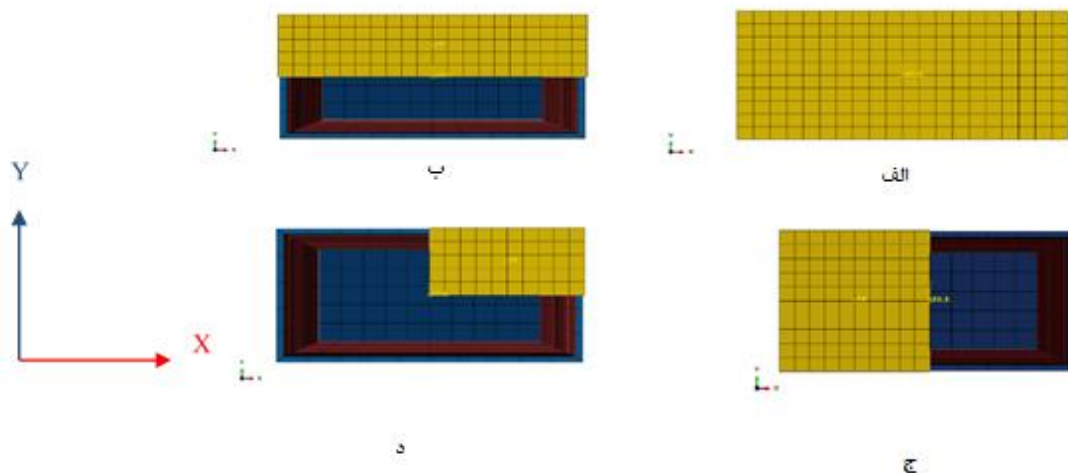
شکل ۱۴: کانتورهای جابجایی ستون در نسبت‌های مختلف بار محوری فشاری اعمالی.

از منحنی‌های بار ضربه‌ای-زمان نشان داده شده در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که نمودار بار ضربه‌ای هنگام برخورد ضربه‌زننده با ستون روند مشابهی را در نسبت‌های بار محوری فشاری ۰/۳ و ۰/۵ دارند. اما هنگامی که نسبت بار محوری فشاری ۰/۷ می‌باشد، مدت زمان رسیدن بار ضربه‌ای به نقطه اوج خود بیشتر می‌شود و روند نمودار بعد از نقطه حداکثر، بعد از کمی نوسان مقدار نسبتاً پایداری پیدا کرده و پس از جدا شدن ضربه‌زننده به صفر می‌رسد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که هرچه نسبت بار محوری فشاری بیشتر باشد، زمان تماس بین ضربه‌زننده و عضو طولانی‌تر بوده و بار ضربه‌ای کاهش پیدا می‌کند. همانطور که از نمودارها مشخص است بیشترین بار ضربه‌ای مربوط به نسبت بار محوری فشاری ۰/۳ به مقدار 906 kN و کمترین مقدار مربوط به نسبت بار محوری فشاری ۰/۷ به اندازه $338/884 \text{ kN}$ می‌-

باشد. بنابراین با افزایش نسبت بار محوری فشاری از $0/3$ به $0/7$ ، بار ضربه‌ای به میزان $62/61\%$ کاهش یافته است. دلیل این امر این است که حداکثر تنش بتن هسته‌ای برای اعضای دارای نسبت بار فشاری محوری $0/7$ در هنگام برخورد ضربه‌زننده با ستون به مقداری بیشتر از مقاومت فشاری نهایی هسته بتنی می‌رسد، بنابراین هسته بتنی از لحاظ مقاومت در برابر بار ضربه محوری کل عضو ضعیف می‌شود. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که ستون تحت نسبت بار محوری فشاری کم، دارای تغییر شکل بیشتری بوده و تغییر شکل غالب، تغییر شکل محوری (جهت Z) است. با افزایش بار محوری فشاری، تغییر شکل ایجاد شده در راستای ضربه وارده کمتر شده و بیشترین تغییر شکل در راستای X به ویژه در ناحیه‌ای از ستون که نزدیک به ضربه‌زننده است، می‌باشد.

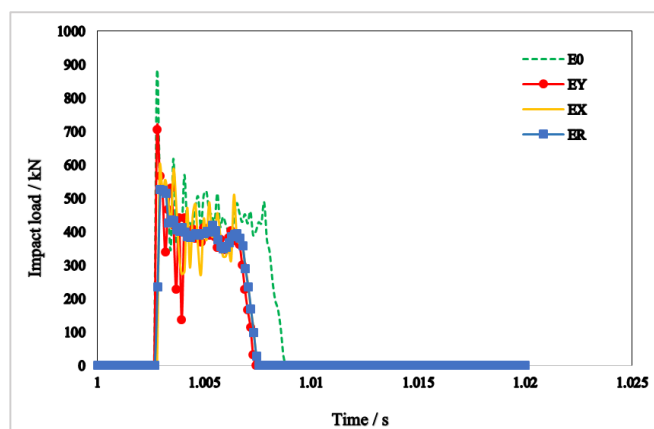
۳-۶- بررسی تأثیر خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری

در این بخش به بررسی تأثیر خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری بر پاسخ دینامیکی ستون‌های جزئی پر شده با بتن پرداخته می‌شود. برای بررسی تأثیر این پارامتر ستون‌های دارای ارتفاع بتن پر شده 1000 میلی‌متر از تراز پایه تحت بار محوری فشاری استاتیکی به اندازه 50% درصد ظرفیت نهایی ستون ($475000N$) قرار گرفته‌اند. ستون‌ها تحت اثر بار ضربه‌ای محوری در چهار موقعیت ضربه‌ای مختلف توسط ضربه‌زننده‌ای با ابعاد متفاوت که با رنگ زرد در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند، قرار گرفته شده است. فاصله بین مرکز هندسی ضربه‌زننده و مرکز هندسی ستون، به نام خروج از مرکزیت ضربه محوری در این مقاله، به ترتیب $E_0=0$ (بدون خروج از مرکزیت محوری)، $E_Y=25mm$ (خروج از مرکزیت تک محوره در جهت محور Y)، $E_X=50mm$ (خروج از مرکزیت تک محوره در جهت محور X) و $E_R=56mm$ (خروج از مرکزیت دو محوره در امتداد قطر مستطیل) انتخاب شده است. اندازه ضربه‌زننده در این بخش برای هر حالت متفاوت می‌باشد، به گونه‌ای که در بار ضربه‌ای با خروج از مرکزیت محوری $E_0=0$ به اندازه $200 \times 100mm$ ، در $E_Y=25mm$ به اندازه $200 \times 50mm$ ، در $E_X=50mm$ به اندازه $100 \times 100mm$ و در $E_R=56mm$ دارای اندازه $100 \times 50mm$ می‌باشند. لازم به ذکر است که ضربه‌زننده دارای جرم ثابت $100kg$ بوده و با انرژی ضربه‌ای 11250 ژول که با سرعت 15 متر بر ثانیه به ستون مورد نظر ضربه وارد می‌کند، در موقعیت ارتفاعی ثابت 2040 میلی‌متر از تکیه‌گاه پایینی ستون قرار گرفته است.

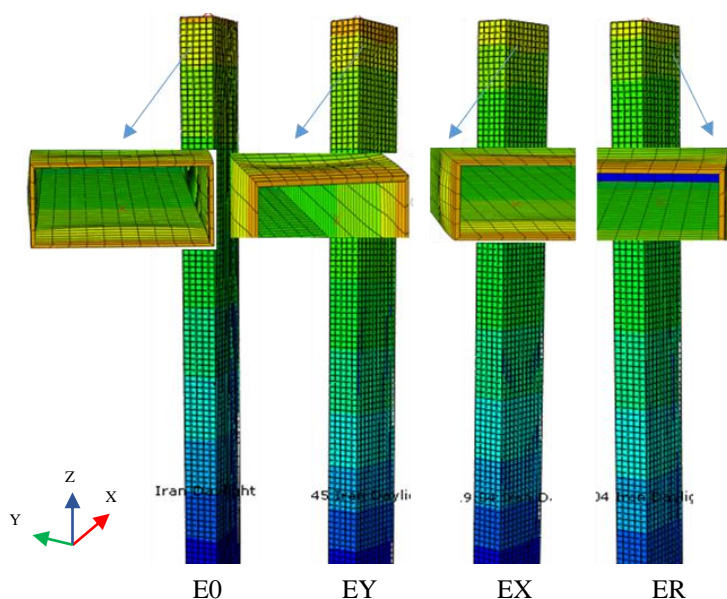


شکل ۱۵: خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری شامل: الف: $E_0=0$ ؛ ب: $E_Y=25mm$ ؛ ج: $E_X=50mm$ ؛ د: $E_R=56mm$.

بعد از انجام تحلیل *Dynamic/Explicit*، خروجی تحلیل‌ها به صورت نمودارهای بار ضربه‌ای-زمان در سطح بین ضربه‌زننده و ستون جزئی پر شده در جهت اعمال ضربه برای خروج از مرکزیت‌های مختلف در شکل ۱۶ و در شکل ۱۷ به صورت کانتورهای جابجایی نشان داده شده است.



شکل ۱۶: نمودار بار ضربه‌ای-زمان به ازای خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری.



شکل ۱۷: کانتورهای جابجایی ستون در خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری.

با توجه به نمودارهای بار ضربه-زمان شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که منحنی‌های بار ضربه‌ای روند مشابهی را در خروج از مرکزیت-های مختلف بار ضربه‌ای محوری دارند. برای خروج از مرکزیت‌های مختلف، پس از برخورد ضربه‌زننده با ستون جزئی پرتاب شده با بتن، بار ضربه‌ای به سرعت افزایش یافته و بعد از کاهش و افزایش‌هایی که بعد از نقطه اوج رخ می‌دهد، در آخر با جدا شدن ضربه‌زننده از ستون به صفر می‌رسد. با توجه به اینکه در خروج از مرکزیت‌هایی که بصورت دو محوره در نظر گرفته شده‌اند (ER)، افزایش فاصله از مرکز هندسی ستون در هر دو جهت X و Y، باعث تمرکز شدت بار ضربه بیشتر در یک گوشه از ستون می‌شود، که این امر باعث افزایش تنش بتن به مقداری بیشتر از مقاومت نهایی آن شده و منجر به کاهش مقاومت بتن موجود در ستون در برابر بار ضربه‌ای می‌شود، بنابراین نسبت به خروج از مرکزیت‌های تک محوره دارای بار ضربه‌ای کمتر می‌باشد. همچنین با کاهش خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری، بار ضربه‌ای به میزان $39/8\%$ افزایش یافته است. همانطور که از نمودارها مشخص است بیشترین بار ضربه‌ای مربوط به خروج از مرکزیت E0 به مقدار $857/11$ KN و کمترین مقدار مربوط به خروج از مرکزیت ER به مقدار $527/38$ kN می‌باشد. با توجه به کانتورهای جابجایی که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، ستون‌های تحت خروج از مرکزیت ER دارای تغییر شکل و کوتاه‌شدگی در هر دو راستای X و Y بوده، و در خروج از مرکزیت‌های EY و EX به ترتیب بیشترین تغییر شکل در راستای X و Y رخ داده است. اما در E0 تغییر شکل غالب تغییر شکل محوری (جهت Z) می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر پارامترهای مختلف سرعت ضربه، نسبت جرم، نسبت بار محوری فشاری، ارتفاع سقوط ضربه زننده، نسبت پرشدگی ستون با بتن و خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای بر پاسخ دینامیکی ستون‌های فولادی سرد نورد شده جزئی پر شده با بتن تحت اثر بارگذاری هم‌زمان بار محوری فشاری استاتیکی و بار ضربه‌ای محوری مورد بررسی قرار گرفته است. اهم نتایج حاصله از بررسی‌های فوق به صورت زیر می‌باشند:

۱. با افزایش فاصله ضربه‌زننده از ستون، میزان بار ضربه‌ای کاهش پیدا کرده و مدت زمان رسیدن بار ضربه‌ای به نقطه اوج بیشتر می‌شود.
۲. با افزایش سرعت ضربه، میزان بار ضربه‌ای افزایش پیدا می‌کند و زودتر به نقطه ماکزیمم بار ضربه‌ای می‌رسد.
۳. زمانی که بار ضربه‌ای هم‌زمان با بار محوری فشاری به ستون‌هایی که دارای نسبت پرشدگی کمتر وارد می‌شود، رفتار متفاوتی با حالتی که به ستون‌های دارای نسبت پرشدگی زیاد هستند وارد می‌شود خواهد داشت به گونه‌ای که با افزایش نسبت پرشدگی میزان بار ضربه‌ای کاهش پیدا می‌کند.
۴. در بررسی نسبت‌های مختلف جرم هنگامی که نسبت جرم بزرگتر باشد، میزان بار ضربه بیشتر بوده و زمان تماس بین ضربه-زننده و ستون طولانی‌تر می‌باشد.
۵. در بررسی اثر نسبت بار محوری فشاری مشاهده شد که با افزایش این نسبت زمان تماس بین ضربه‌زننده و عضو طولانی‌تر می‌شود و همچنین میزان بار ضربه‌ای کاهش می‌یابد.
۶. با افزایش نسبت بار محوری فشاری که منجر به کاهش بار ضربه‌ای می‌شود، تغییر شکل ایجاد شده در راستای ضربه وارده کمتر بوده و بیشترین خم شدگی ستون در ناحیه‌ای از ستون که نزدیک به ضربه‌زننده است، می‌باشد.
۷. با بررسی خروج از مرکزیت‌های مختلف بار ضربه‌ای محوری بر پاسخ ضربه‌ای ستون‌های فولادی سرد نورد جزئی پر شده با بتن نتیجه گرفته شد که با افزایش خروج از مرکزیت ضربه محوری، بار ضربه‌ای کاهش یافته است.

۹- مراجع

- [1] TIAN, Z. Ping. W. and Jianwei, J. (2008). Dynamic Response of RPC ۱۲-Filled Steel Tubular Columns with High Load Carrying Capacity under Axial Impact Loading. *China Trans Tianjin University*, 14, 441-449.
- [2] Yan, Xi. and Yali, S. (2012). Impact Behaviors of CFT and CFRP Confined CFT Stub Columns. *American Society of Civil Engineers*, 16, 662-670.
- [3] Dass Goel, Manmohan. (2015). Numerical investigation of the axial impact loading behaviour of single, double and stiffened circular tubes. *International Journal of Crashworthiness*, 1-11.
- [4] Mirmomeni, M. Heidarpour, A. Zhao, X.L. Mahaidi, R. and Packer, J. (2016), Size-dependency of concrete-filled steel tubes subject to impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 90-101.
- [5] Rifaie A. Jones, S. Wang, Q. and Guan, Z. (2018). Experimental and numerical study on lateral impact response of concrete filled steel tube columns with end plate connections. *International Journal of Impact Engineering*, 121, 20-34.
- [6] Du, G. Andjelic, A. Li, Z. Lei, Z. and Bie, X. (2018). Residual Axial Bearing Capacity of Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns (CFCSTCs) after Transverse Impact. *Mdpi Journal*, 93, 1-17.
- [7] Xu, W. Zhu, A. and Gao, K. (2018). Parameter Analysis on the Anti-Impact Behavior of PCFT Columns under Lateral Impact Load. In: *MATEC Web of Conferences*. City: published by EDP Sciences, 1-4.
- [8] Huang, L. Gao, C. Yan, L. Yu, T. and Kasal, B. (2018). Experimental and numerical studies of CFRP tube and steel spiral dual-confined concrete composite columns under axial impact loading. *Composites*, 1-31.
- [9] Zhang X. Chen, Y. Shen, X. and Zhu, Y. (2019). Behavior of Circular CFT Columns Subjected to Different Lateral Impact Energy. *Mdpi Journal*, 34, 1-23.

- [10] Zhang, YT. Shan, B. and Xiao, Y. (2019). Axial impact behaviors of stub concrete-filled square steel tubes. *Structural Engineering*, 1-14.
- [11] Zhu, J. Ren, Ch. Zhang, X. Huang, X. and Ye W (2019). Dynamic analysis of cold-formed steel channel-section columns under axial impact loading. *Elsevier, Engineering Failure Analysis*, 102, 260–269.
- [12] LAN, T. Qin, G. Zhuan, J. Wang, Y. Zheng, Q. and Ding, M. (2019). Axial Impact Load of a Concrete-Filled Steel Tubular Member with Axial Compression Considering the Creep Effect. *Materials Journal*, 1-15.
- [13] Ferdynus, M. Kotelko, M. and Urbaniak, M. (2019). Crashworthiness performance of thin-walled prismatic tubes with corner dents under axial impact - Numerical and experimental study. *Thin-Walled Structures*, 144, 1-13.
- [14] Shan, B. Zhang, Y. Monti, G. Li, T. and Xiao, Y. (2020). Axial Impact Behavior of FRP-Confined Concrete Stub Columns with Square and Circular Cross Section. *ASCE*, 1-16.
- [15] Zhu Zhu, A. Xu, W. Gao, K. Ge, H. and Zhu, J. (2018), Lateral impact response of rectangular hollow and partially concrete-filled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 130, 114–13.