Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Comparison of the Behavior of Concrete and Composite Columns with the Same Mechanical Characteristics under Blast Load

Mohaddeseh Zahra Moayyedi [a], Mohammad Momeni [b,*], Saeed Aghajanian [a], Sohrab Mirassi [c]

[a] *Department of Technology and Engineering, Shahid Ashrafi Isfahani University, Isfahan, Iran*
[b] *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fasa University, Fasa, Iran*
[c] *Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-03-18
Revised: 2025-09-18
Accepted: 2025-10-27

Keywords:

Blast load;
Composite column;
Concrete column;
Finite element method;
Damage.

ABSTRACT

This paper aims to investigate the behavior of concrete and composite columns subjected to blast loading through finite element analysis, validated against experiments adopted from the literature. To this end, after validating the finite element model, the behavior of two concrete columns with square and circular sections, and a composite column with a circular section with the same mechanical characteristics was investigated under the effect of blast loading. The results indicate that the greatest damage typically occurs near the columns' supports, with square sections showing higher vulnerability compared to circular sections. Introducing composite column can reduce this damage by approximately 59%, while also effectively decreasing maximum displacement and bending moment by up to 55%. Additionally, a parametric analysis was conducted to identify influential parameters on composite column behavior. The analysis suggests that selecting concrete with a compressive strength of 40 MPa represents an optimal choice for minimizing damage in the investigated columns, as further increases in concrete strength yield marginal benefits in terms of column damage and displacement.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.33575.2639

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: m-momeni@fasau.ac.ir

How to cite this article:
Momeni, M., Aghajanian, S., Moayyedi, M. Z. & Mirassi, S., "Comparison of the Behavior of Concrete and Composite Columns with the Same Mechanical Characteristics under Blast Load." Journal of Modeling in Engineering, 24 85 (2026): 283–297, doi: 10.22075/jme.2025.33575.2639

مقاله پژوهشی

مقایسه رفتار ستون‌های بتنی و مرکب با مشخصات مکانیکی یکسان تحت بار انفجار

محدثه زهرا مویدی[۱]، محمد مومنی[۲،*]، سعید آقاجانیان[۱]، سهراب میراثی[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

واژگان کلیدی:
بار انفجار،
ستون مرکب،
ستون بتنی،
روش اجزا محدود،
آسیب.

چکیده

هدف این مقاله بررسی رفتار ستون‌های بتنی و مرکب تحت بار انفجار از طریق تحلیل اجزا محدود صحت‌سنجی شده با نتایج آزمایشگاهی است. به این منظور، رفتار دو ستون بتنی با مقاطع مربعی و دایره‌ای و یک ستون مرکب با مقطع دایره‌ای با مشخصات مکانیکی یکسان تحت تأثیر بار انفجار بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین آسیب در قسمت نزدیک به تکیه‌گاه ستون‌ها رخ می‌دهد و ستون مقطع مربعی در مقایسه با مقطع دایره‌ای آسیب بیشتری را تجربه می‌کند که این آسیب را می‌توان با استفاده از ستون مرکب فولادی و بتنی تا میزان تقریبی ۵۹ درصد کاهش داد. این کاهش در مورد جابجایی ماکزیمم و همچنین میزان بیشینه خمش تا ۵۵ درصد مؤثر است. همچنین به‌منظور تعیین نمودن پارامترهای مؤثر بر رفتار ستون‌های مرکب، تحلیل پارامتریک انجام گردید. نتایج تحلیل پارامتریک در ستون‌های بررسی شده نشان داد که تحت اثر انفجارهای مورد بررسی، انتخاب بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگا پاسکال عملکرد مناسبی در برابر آسیب وارده دارد، و افزایش مقاومت بتن از این میزان در مقایسه با پارامترهای دیگر، اثر کمتری در کنترل آسیب وارده به ستون و میزان جابجایی دارد.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.33575.2639

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

امروزه با گسترش جمعیت، نیاز روزافزون بشر به محیطی امن و مناسب برای زندگی بیش‌ازپیش احساس می‌شود. از سوی دیگر، علاوه بر طراحی سازه در برابر مخاطرات طبیعی ازجمله زلزله، باد، سیل و ...، مخاطرات انسانی نیز ازجمله انفجارهای سطحی و زیرزمینی، شوک‌های ایجادشده ناشی از انفجار، برخورد وسایل نقلیه به ساختمان و ... که جزء بارهای دینامیکی ضربه‌ای می‌باشند، باید در طرح سازه‌ها لحاظ گردد. به‌منظور مقابله با خطرات طبیعی ازجمله زلزله، سازه طرح‌شده باید در برابر بارهای زلزله مقاومت قابل قبولی از خود نشان دهد و بر مبنای به‌روزترین آیین‌نامه‌های موجود طراحی گردد. به‌منظور جلوگیری از خرابی ساختمان در برابر بارهای دینامیکی سریع، سازه موردنظر باید مقاومت قابل قبولی در برابر نیروهای اعمال شده داشته باشد تا بتواند فضای امنی برای ساکنان و یا تجهیزات حیاتی مهیا نماید. با توجه به این نکته که نیروهای دینامیکی انفجار برخلاف نیروهای دینامیکی دیگر همچون زلزله، به ناحیه محدودی از سازه وارد می‌گردد، در اکثر مواقع موجب تخریب یک یا چند عضو از سازه خواهد شد که در پی آن ممکن است خرابی پیش‌رونده در سازه ایجاد گردد [۱]. به عبارت دیگر،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m-momeni@fasau.ac.ir
۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی، اصفهان، ایران
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فسا، ایران
۳. دانشکده مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

استناد به این مقاله:
مومنی، محمد، آقاجانیان، سعید، مویدی، محدّثه زهرا و میراثی، سهراب، "مقایسه رفتار ستون‌های بتنی و مرکب با مشخصات مکانیکی یکسان تحت بار انفجار." مدل سازی در مهندسی، ۲۴ ۸۵ (۱۴۰۵): ۲۸۳-۲۹۷، doi: 10.22075/jme.2025.33575.2639

در بررسی رفتار سازه‌ها تحت اثر بارهای انفجاری، معمولاً رفتار عضو مورد بررسی قرار می‌گیرد و اثر حذف آن عضو (یا عملکرد ضعیف آن) بر رفتار کلی سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد که عمدتاً به‌عنوان تحلیل خرابی پیش‌رونده معرفی می گردد [۲-۴]. از همین رو شناخت رفتار عضوهای سازه‌ای (که در این بین ستون جز مهم‌ترین عضوهای سازه‌ای است) تحت اثر بارهای دینامیکی انفجار از اهمیت خاصی برخوردار است. بیش از یک قرن است که از ستون‌های مرکب در سازه‌های مختلف استفاده می‌شود. ستون‌های مرکب اولیه به صورت ستون‌های فلزی محاط در بتن بودند. این ستون‌ها در ابتدا جهت مقاومت در برابر آتش به کار برده شد ولی پیشرفت علم ساختمان نشان داد که این عملکرد مرکب می‌تواند به ارتقای مقاومت و پایداری سازه نیز کمک کند. مقاطع مرکب پرشده با بتن سال‌ها بعد گسترش پیدا کردند ولی اصول اولیه آن‌ها همان اصول مقاطع محاط در بتن بود که استفاده از فولاد درکشش و بتن در فشار است. آزمایش‌های اولیه بر روی ستون‌های مرکب، در آزمایشگاه مهندسی راه و ساختمان دانشگاه کلمبیا در سال ۱۹۰۸ به‌وسیله بور انجام شد [۵] و در سال ۱۹۱۲، تالبوت و لرد آزمایش‌هایی بر روی ۳۱ ستون، شامل ۲۱ ستون مرکب و ۱۰ ستون فولادی در دانشگاه ایلینوی آمریکا انجام دادند [۶]. این آزمایش‌ها نشان داد که میزان مقاومت دقیق‌تر ستون‌های مرکب را می‌توان با محاسبه جداگانه مقاومت قطعات فولادی و بتنی در ستون به دست آورد. امروزه روش‌های نوین حل عددی همچون روش اجزاء محدود به کمک محققان آمده و با تکیه بر توسعه چشم‌گیر علوم مرتبط با رایانه، امکان مدل‌سازی انفجار در هر محیط و شرایطی را فراهم نموده است. علاوه بر این مطالعات تئوری اولیه متعددی نیز به‌منظور تعیین روابط بارگذاری انفجار بر مبنای داده‌های حاصل از آزمایش‌ها انجام شده است که از آن جمله می‌توان به روابط برود [۷] و نیومارک و هنسن [۸] اشاره کرد که همگی تابعی از وزن ماده منفجره و فاصله سازه هدف از مرکز انفجار می‌باشند. در این روابط حداکثر اضافه فشار ایجادشده در نقطه هدف در اثر برخورد موج انفجار به دست می‌آید که از پارامترهای اصلی مؤثر در میزان تخریب است. در بررسی انفجار سطح زمین، ویلیامز و نول در مقاله‌ای روش‌های ارزیابی پاسخ سازه‌ها به انفجار را بررسی کردند. آن‌ها جزو نخستین کسانی بودند که به بررسی پاسخ انفجاری ساختمان‌های کامل پرداختند. آن‌ها به این قانون کلی پی بردند که مصالح در بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا از مقاومت تسلیم بیشتری نسبت به بارگذاری‌های استاتیکی برخوردار هستند [۹]. ماهیت متفاوت بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا با دیگر مخاطرات، محققین را بر آن داشت تا در این زمینه مطالعات گسترده‌ای انجام دهند. تحقیقات ماهین و همکاران در سال ۱۹۷۳ و ماتسویاشی و ماچیدا در سال ۱۹۸۴ از جمله ابتدایی‌ترین تحقیقات در زمینه اثر نرخ کرنش بر تیر بتنی است. آن‌ها نشان دادند که با افزایش سرعت بارگذاری، مقاومت تسلیم آرماتورهای تیرها افزایش پیدا می‌کند [۱۰, ۱۱]. کتسوواس و همکاران در تحقیقات خود متوجه شدند که با افزایش سرعت بارگذاری میزان مقاومت بتن در برابر بارهای اعمالی نیز بیشتر می‌گردد [۱۲-۱۴]. به‌طورکلی رفتار ستون‌های مرکب تحت اثر بارهای انفجاری به‌صورت گسترده مورد بررسی قرارگرفته که در ادبیات فنی موجود است. به‌عنوان مثال لی و همکاران [۱۵] به مطالعه تجربی و عددی در مورد رفتار ستون‌ها با مقطع دایره‌ای فولادی دو پوسته پرشده با بتن در معرض بارگذاری انفجاری پرداختند. در این مقاله مدل‌های عددی در برابر نتایج تجربی تهیه شد به طوری که مکانیسم‌های آسیب ستون، جذب انرژی ستون، و اثرات تحت بارگذاری انفجاری با نرم‌افزار LS-DYNA مورد بررسی قرار گرفت. بخشی از این تحقیق نشان داد که آسیب پلاستیک شدید هسته بتن نقش قابل توجهی در مکانیسم جذب انرژی این ستون‌ها تحت بارگذاری انفجاری دارد. تحقیقات متعدد دیگری از بررسی رفتار ستون‌های مختلط با یک پوسته و دو پوسته فولادی پرشده با بتن تحت اثر بارهای انفجاری مورد بررسی قرارگرفته است [۱۶-۲۰]. وانگ و همکاران [۲۱] ۳۱ آزمایش تحت تأثیر وزنه افتان با سرعت کم برای بررسی حالت‌های ظرفیت باقیمانده و تاریخچه زمانی نیروهای ضربه، تغییر شکل‌های کلی و کرنش‌های اعضای لوله‌ای فولادی دوبل پرشده با بتن CFDST[2] انجام دادند. نتایج نشان داد که همه اعضای CFDST به‌صورت انعطاف‌پذیر رفتار می‌کنند و تغییر شکل باقیمانده شامل تغییر شکل موضعی در بخش ضربه و همچنین تغییر شکل خمشی کلی است. در مقایسه با

[2] Concrete-Filled Double-Skin steel Tubular

لوله‌های فولادی دوجداره توخالی، اعضای CFDST تحت همان انرژی ضربه اعمال‌شده رفتار ضربه‌ای برتر از نظر جذب انرژی بالاتر، تغییر شکل کلی کوچک‌تر و تغییر شکل موضعی به دلیل تعامل بتن ساندویچی و لوله‌های فولادی دو پوسته نشان می‌دهند. ژانگ و همکاران [۲۲] یک مطالعه تجربی بر روی رفتارهای باقیمانده ستون‌های لوله‌ای فولادی دو پوسته پرشده با بتن فوق‌العاده با عملکرد بالا پس از بارگذاری انفجاری نزدیک ارائه کردند. مشخص شد که ستون‌های CFDST با جابجایی دائمی کوچک‌تر، ظرفیت محوری باقی‌مانده بیشتری دارند و ستون‌های CFDST که در طول آزمایش انفجار تحت بارمحوری قرار نگرفته‌اند، رفتار انعطاف‌پذیر بیشتری از خود نسبت به ستون‌هایی که به‌صورت محوری در طول آزمایش انفجار بارگذاری شده‌اند، نشان دادند. ریچی و همکاران [۲۳] مقاطع توخالی مستطیلی پر شده با بتن را در مقیاس بزرگ مورد آزمایش انفجار در هوا قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاطع پر شده با بتن در برابر بارگذاری انفجاری عملکرد بسیار خوبی نشان دادند و هیچ شکست محلی در گوشه‌ها یا درزهای جوش مشاهده نشد. ورناردوس و گانتس [۲۴] در مطالعه‌ای، رفتار فشاری اعضای CFDST را از طریق یک بررسی دقیق از تلاش‌های آزمایشگاهی متعدد در یک بازه زمانی ۲۰ ساله بررسی کردند و خلاصه‌ای از این آزمایش‌ها و نتایج مربوط به آن‌ها را ارائه دادند و به دنبال آن، پاسخ ساختاری و مکانیسم‌های شکست غالب آن‌ها برای اشکال مقطع مختلف و عوامل هندسی را بررسی کردند. لی و همکاران [۲۵] عملکرد انفجار ستون‌های CFDST تحت اثر انفجار تماسی به‌صورت تجربی و عددی موردبررسی قرار دادند. برای انجام تحلیل‌های عددی از نرم‌افزار LS-DYNA و روش ALE[3] کمک گرفتند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که ستون‌های CFDST تحت انفجار تماسی دچار آسیب موضعی می‌شوند درحالی‌که تقریباً هیچ پاسخ کلی از خود نشان نمی‌دهند. شکست بتن هسته نقش غالب در مکانیسم جذب انرژی ستون‌های CFDST به دلیل اثر محصور شدن توسط لوله‌های فولادی ایفا می‌کند. نصیری و لیو [۲۶] به روش المان محدود پارامترهای هندسی بحرانی را برای رفتار خارج از صفحه مصالح بنایی بتنی محدودشده توسط قاب‌های بتن مسلح بررسی کردند و نشان دادند که رفتار خارج از صفحه قاب‌های بتن مسلح پر شده به پارامترهای نسبت ابعاد پرکننده، نسبت باریکی پرکننده، سفتی قاب مرزی، شکاف سطحی قاب به لایه، اندازه دهانه پرکننده و نسبت ابعاد، و ضخامت شبکه بلوک‌های بنایی بستگی دارد. رفعت تهذیب [۲۷] و همکاران بر روی مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار تحقیق کردند. آن‌ها ستون بتن مسلح با مقطع مربعی را تحت آزمایش انفجار قرار دادند. همچنین از نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل استفاده کردند. ستون‌های CFST[4] و CFDST را موردبررسی قراردادند و بر روی بهبود نتایج بحث کردند. مومنی و همکاران بررسی های متعددی بر رفتار دینامیکی سازه‌های فولادی و بتنی تحت بار انفجار پرداختند [۲۸-۳۰]. به عنوان مثال ایشان در منبع [۳۱] برای ارزیابی عملکرد این ستون‌ها در برابر انفجار، ستون‌هایی با شکل مقطع مختلف ولی با مشخصات مکانیکی یکسان را با استفاده از روش اجزا محدود تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که شکل مقطع، تأثیر بسیار ناچیزی در رفتار دینامیکی کلی ستون‌های فولادی دارد، درحالی‌که، نحوه انتخاب شرایط مرزی مناسب در مدل اجزا محدود، نقش مهمی در رفتار دینامیکی این ستون‌ها دارد.

با توجه به اینکه کمتر تحقیقی را می‌توان مشاهده کرد که رفتار ستون‌های مرکب با مشخصات مکانیکی یکسان ولی شکل مختلف را تحت اثر بار انفجار مورد بررسی قرار داده‌اند، لذا در این تحقیق به بررسی این مهم پرداخته شده است. به‌منظور بررسی رفتار ستون‌های مرکب تحت اثر بار دینامیکی انفجار، از روش اجزا محدود LS-DYNA که عملکرد آن با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفته، استفاده شده است. بعد از صحت سنجی نتایج مدل اولیه با نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی، ستون‌های بتنی و مختلط با مشخصات مکانیکی یکسان و شکل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به بارگذاری سریع بار انفجار، اثرات نرخ کرنش بالای مصالح نیز در نظر گرفته شده است. میزان جابجایی میان دهانه این ستون‌ها تحت اثر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار گرفته و درنهایت با انجام تحلیل پارامتریک به بررسی اثر تغییر هرکدام از متغیرهای ورودی بر پاسخ سازه پرداخته شده است.

۲- روش انجام مدل‌سازی

۲-۱- معرفی نرم‌افزار LS-DYNA

LS-DYNA به‌عنوان یک نرم‌افزار بسیار قدرتمند و شناخته

[3] Arbitrary Euler Lagrange

[4] concrete-filled steel tubular members

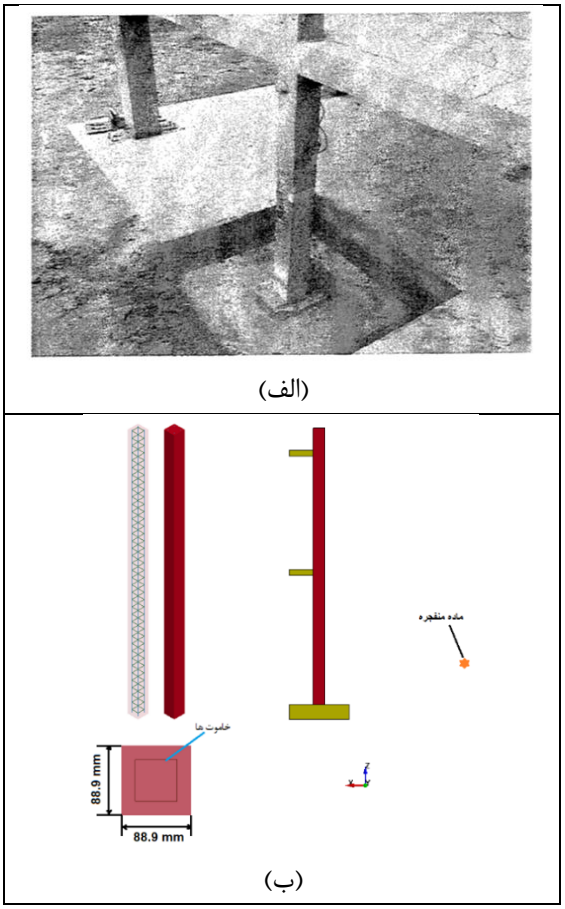
شده برای شبیه‌سازی مسائل عددی با رفتار غیرخطی زیاد، نرخ کرنش بالا و تحلیل‌های گذرا مانند ضربه و انفجار شناخته شده است و قابلیت حل مسائل هم به روش انتگرال‌گیری صریح و هم ضمنی، تحلیل‌های دینامیکی خطی و غیرخطی، تحلیل‌های خرابی برای شناسایی خرابی و انتشار ترک را دارا هست. در این نرم‌افزار، مدل ماده‌های متنوعی برای تحلیل‌های دینامیکی گذرا و شبیه‌سازی رفتار غیرخطی زیاد مصالح با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش موجود است. نرم‌افزار LS-DYNA در مقایسه با نرم‌افزارهای دیگر، در مباحث مربوط به انفجار، توانایی شبیه‌سازی انواع مختلف بارهای انفجاری توسط روش‌های مختلف را دارد [۳۲]. جهت تحلیل با این حل‌گر قدرتمند، ابتدا باید مدل سازه در یکی از نرم‌افزارهای پیش‌پردازش همچون LS-PrePost [۳۳]، Hypermesh، Catia و یا ANSYS ساخته شده و مش‌بندی گردد و سپس توسط حل‌گر LS-DYNA مورد تحلیل قرار بگیرد. در این مقاله از نرم‌افزار LS-PrePost جهت مدل‌سازی و از نرم‌افزار LS-DYNA جهت تحلیل استفاده شده است.

۲-۲- مدل‌سازی اولیه و صحت سنجی

برای مدل اولیه ستون و صحت سنجی آن از نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مراجع [۳۴] و [۳۵] استفاده شده است. به همین منظور ستون مربعی شکل با بعد ۸/۸۹ سانتی‌متر مربع با چهار میلگرد طولی به قطر ۲۰ میلی‌متر که با خاموت‌های قطر ۱۰ میلی‌متر در فاصله ۵/۰۸ سانتیمتری قرار داده شده‌اند مدل شده است.

شکل (۱-الف) ستون واقعی آزمایش شده به همراه مدل اجزا محدود و محل قرارگیری ماده منفجره را نشان می‌دهد. وزن ماده منفجره ۷/۰۸۷ کیلوگرم ماده C4 که معادل وزن تی‌ان‌تی آن برابر ۹/۷۱ کیلوگرم می‌شود. (قدرت C4 معادل ۱/۳۷ تی‌ان‌تی است). ماده منفجره در فاصله ۳۰/۴۸ سانتی‌متری از کف و فاصله افقی ۱۰۶/۶۸ سانتی‌متری از ستون قرار داده‌شده است. مقاومت فشاری بتن ۴۲/۲۳ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی بتن از المان‌های جامد ۸ گره‌ای و برای مدل‌سازی میلگردهای طولی و خاموت‌های به‌کاررفته از المان تیر استفاده شده است. حداکثر بعد المان‌ها در صحت سنجی برابر با ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که اندازه المان‌ها به نحوی در نظر گرفته شد که علاوه بر اینکه نتایج شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار باشد، مدت زمان تحلیل نیز تا حد امکان بهینه گردد. برای اینکه اندازه المان برای مدل‌سازی تعیین شود اساساً باید از تحلیل حساسیت مش استفاده نمود تا اثر ابعاد المان‌ها بر روی خروجی‌ها مشاهده گردد. از همین رو قاعدتاً قبل از انجام تحلیل‌های گسترده اجزا محدود، باید ابعاد مش تعیین گردد که این امر باید توسط تحلیل حساسیت انجام گیرد، که در این مقاله از این رویکرد استفاده شده است، هرچند که نتایج حاصل از این تحلیل برای رعایت اختصار در نوشتار ارائه نشده است. شکل (۱-ب) مدل اجزا محدود ساخته شده جهت صحت سنجی را نشان می‌دهد.



(الف)

(ب)

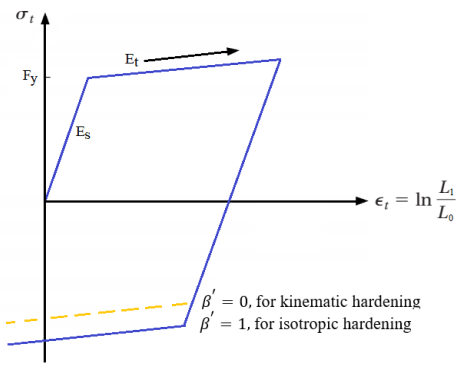
شکل ۱- (الف) مدل واقعی استفاده شده برای صحت‌سنجی و (ب) مدل اجزا محدود ایجاد شده در نرم افزار LS-DYNA

برای مدل‌سازی وزن سازه از تابع شیب‌دار (Ramp) و تا لحظه ۱۰۰ میلی‌ثانیه استفاده شده است. سطح زیرین ستون کاملاً مقید شده و در طبقات نیز ستون در راستای افق مقید شده است. از مدل ماده *MAT_PLASTIC_KINEMATIC برای شبیه‌سازی رفتار میلگردها و خاموت‌ها استفاده‌شده است.

منحنی تنش-کرنش ارائه‌شده توسط این مدل ماده در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن L_0 و L_1 به ترتیب بیان‌گر طول اولیه (تغییرنیافته) و طول نهایی (تغییرشکل‌یافته) نمونه‌ی تک محوری تحت کشش هستند. علاوه بر این پارامترهای E_s، F_y، E_t، σ_t و ε_t به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، شیب بخش دوم منحنی دوخطی تنش-کرنش در ناحیه سخت‌شدگی کرنشی، تنش حقیقی و کرنش حقیقی هستند. با تغییر پارامتر β' در بازه‌ی ۰ تا ۱ می‌توان نوع سخت‌شدگی را به صورت سینماتیکی، ایزوتروپیک یا ترکیبی از این دو مشخص کرد. شایان ذکر است که با در نظر گرفتن رفتار الاستیک-پلاستیک کامل، پارامتر E_t برابر با صفر لحاظ شده است.

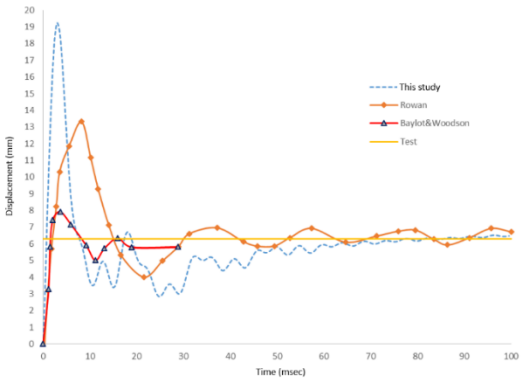
برای مدلسازی بتن، با توجه به اینکه رفتار آن تحت نیروی کششی و فشاری متفاوت است، تا کنون مدل ماده‌های متعددی در نرم‌افزار LS-DYNA ارائه شده است. از پر کاربردترین این مدل ماده‌ها می‌توان به مدل ماده *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 اشاره کرد که برای شبیه‌سازی رفتار بتن به‌ویژه تحت بارهای دینامیکی با نرخ کرنش بالا توسعه یافته و در این مقاله از آن استفاده شده است. معادلات رفتاری حاکم بر این مدل ماده توسط توسعه دهندگان برای بتن معمولی به نحوی کالیبره شده است که تنها با وارد نمودن تک پارامتر مقاومت فشاری بتن (f'_c) توسط کاربر، رفتار بتن شبیه‌سازی می‌گردد، اما برای بتن‌های فوق توانمند یا به طور کلی هر بتنی که بتن معمولی محسوب نشود کالیبره کردن آن و نحوه تنظیم پارامترهای ورودی مربوط به این مدل ماده باید بر اساس نتایج آزمایشگاهی و استفاده از استراتژی المان واحد در مدلسازی عددی انجام پذیرد [۲۹]. به منظور رعایت اختصار، جزئیات بیشتر مربوط به معادلات رفتاری حاکم بر این مدل ماده در مقاله حاضر ارائه نمی‌گردد و خواننده می‌تواند جهت دریافت جزئیات بیشتر به منابع [۲۹، ۳۶، ۳۷] مراجعه نماید.

میلگردها با استفاده از قید *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID درون بتن مقید شده‌اند. مدل ماده استفاده‌شده برای طبقات بتنی مدل الاستیک با چگالی، مدول یانگ و ضریب پواسون به ترتیب ۲/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب ، ۰/۳۲۸۵ مگا بار و ۰/۱۹می‌باشد. برای میلگردها از مدل مادی پلاستیک کینماتیک با چگالی ۷/۸ و مدول یانگ ۲/۱ و ضریب پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۵۰۰ مگا پاسکال استفاده شده است. همچنین جهت تعیین ضرایب رابطه کوپر سیموندز برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش مصالح فولاد از توضیحات ارائه شده در منبع [۳۸] استفاده شده است. برای خاموت‌ها هم از همین مدل مادی استفاده گردید با این تفاوت که تنش تسلیم در این حالت ۳۵۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد.



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش مدل ماده MAT_PLASTIC_KINEMATIC

به‌منظور صحت‌سنجی دقت مدل‌سازی اجزا محدود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. مطابق شکل (۳) حداکثر جابجایی ماندگار ۶/۴۸ میلی‌متر به دست آمد که با نتایج آزمایش تجربی که ۶/۳ میلی‌متر است حدود ۲/۸ درصد خطا دارد که نشان می‌دهد مدل اجزا محدود ایجاد شده از دقت قابل قبولی برخوردار است. البته باید به این نکته توجه داشت که در پیک‌های ابتدایی نمودار جابجایی به‌دست‌آمده از این تحقیق، در مقایسه با تحقیقات عددی دیگران (شبیه‌سازی روان، و شبیه‌سازی بیلت و وودسون [۳۴] که بر روی شکل (۳) نشان داده شده است) دارای اختلاف می‌باشد که این اختلاف می‌تواند مربوط به مدل ماده در نظر گرفته شده، معلوم نبودن بعضی از جزئیات سازه و در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده و نیز صرف‌نظر کردن از مدل‌سازی طبقات باشد. با این حال ازآنجایی‌که هدف این مقایسه میزان جابجائی ماندگار ستون است، لذا نتیجه به‌دست‌آمده در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار است. میزان جابجایی ماندگار بدست آمده از روش‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول مشخص است، نتیجه عددی به‌دست آمده از مدل اجزا محدود ایجاد شده در این تحقیق به مقدار جابجایی بدست آمده از مدل آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.



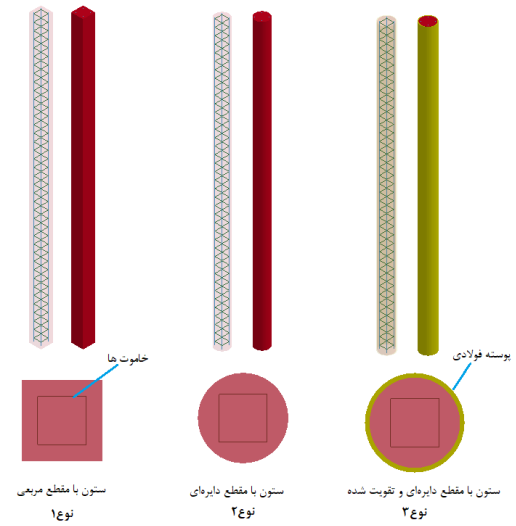
شکل ۳- مقایسه نتیجه مدل‌سازی عددی با نتیجه آزمایشگاهی

جدول ۱- مقایسه جابجایی به دست آمده از روش عددی با نتیجه آزمایشگاهی

	جابجایی باقیمانده وسط ستون در لحظه نهایی	میزان درصد خطا در مقایسه با آزمایش
تحقیق حاضر	۶/۴۸	۲/۸۶
روان	۶/۷۲	۶/۶۷
بیلوت و وودسون	۵/۸	-۷/۹۴
مدل آزمایشگاهی	۶/۳	۰/۰۰

۲-۳- گسترش مدل‌سازی عددی

بعد از اطمینان پیدا کردن از صحت مدل اولیه، سه نوع ستون با مقطع مربعی (نوع۱)، مقطع دایره‌ای (نوع۲) و مقطع دایره‌ای مرکب (نوع۳) با ارتفاع ۲۱۲ سانتی‌متر و ممان اینرسی یکسان، تحت بارگذاری انفجاری ۵ کیلوگرم تی‌ان‌تی با فاصله ۳۰/۴۸ سانتی‌متری از کف زمین و فاصله افقی ۱۰۶/۶۸ سانتی‌متری قرار گرفت و نتایج به دست آمده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل (۴) هر سه نوع ستون را نشان می‌دهد. ستون‌های مورد مطالعه به نحوی انتخاب گردید که ممان اینرسی جرمی آن‌ها با یکدیگر برابر باشد. از این رو جرم ستون مربعی را بدون در نظر گرفتن میلگردها و خاموت به‌عنوان معیار در نظر گرفته و ابعاد ستون‌های با مقطع دایره‌ای و مرکب به‌گونه‌ای تعیین گردید تا ممان اینرسی جرمی حول محور طولی آن‌ها با یکدیگر برابر شود. برای انجام این کار از روابط ۱ تا ۳ استفاده شد که در این روابط l طول ستون، r شعاع مقطع دایره‌ای و a بیان‌گر بعد مقطع مربعی است. لازم به ذکر است که برای هر سه ستون از بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگا پاسکال استفاده شده است و کلیه درجات آزادی ستون در محل اتصال به زمین مقید شده است.



شکل۴- مدل‌های موردمطالعه

$$I_{xx}=\frac{1}{12}m(a^2+l^2)$$
$$I_{zz}=\frac{1}{6}ma^2 \qquad (۱)$$

$$I_{xx}=\frac{1}{4}mr^2+\frac{1}{12}ml^2$$
$$I_{zz}=\frac{1}{2}mr^2 \qquad (۲)$$

$$I_{xx}=\frac{1}{2}mr^2+\frac{1}{12}ml^2$$
$$I_{zz}=mr^2 \qquad (۳)$$

با استفاده از روابط فوق، مشخصات هندسی مقطع‌های ۱، ۲ و ۳ محاسبه شده است که در جدول ۲ نشان داده شده و برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به بررسی نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود پرداخته می‌شود. از این رو به بررسی میزان جابجایی ایجاد شده در ستون‌ها و میزان جذب انرژی تحت اثر شرایط تکیه‌گاهی مختلف پرداخته می‌شود. علاوه بر این میزان خرابی ایجاد شده در ستون‌ها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که انرژی جذب شده به بخشی از انرژی جنبشی اطلاق می‌شود که در اثر بارگذاری‌های ضربه‌ای یا برخورد، به انرژی کرنش پلاستیک تبدیل می‌گردد. این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که ماده از حد الاستیک خود تجاوز کرده و وارد ناحیه تغییر شکل دائمی می‌شود. این ویژگی در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار از اهمیت ویژه‌ای

برخوردار است. این پارامتر به صورت سطح زیر منحنی نیرو- جابجائی سازه تحت اثر بار ورودی تعریف می‌گردد.

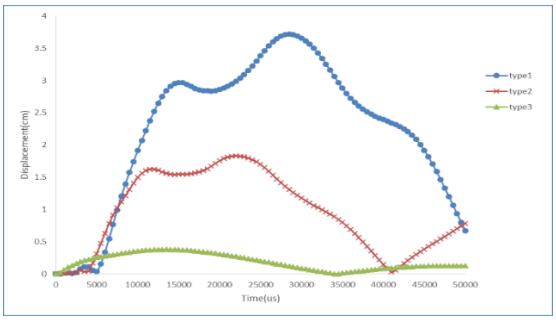
جدول۲- مشخصات هندسی مقاطع مختلف

واحد	مقدار	مقطع (۱)
gr	۴۰۲۲۸/۶	جرم
cm	۲۱۲/۱	طول ستون
cm	۸/۹	ضلع
$gr.cm^2$	۵۲۹۸۹۱/۸	ممان اینرسی جرمی در راستای محور z
$gr.cm^2$	۱۵۱۰۶۲۴۱۶/۵	ممان اینرسی جرمی در راستای محور x
واحد	مقدار	مقطع (۲)
$gr.cm^2$	۵۲۹۸۹۱/۸	ممان اینرسی جرمی در راستای محور z
cm	۵/۱	شعاع
cm	۱۰/۳	قطر
$gr.cm^2$	۱۵۱۰۶۲۴۱۶/۵	ممان اینرسی جرمی در راستای محور x
واحد	مقدار	مقطع (۳)
gr	۲۴۱۳۷/۲	جرم بتن
gr	۱۶۰۹۱/۴	جرم فولاد
gr	۴۰۲۲۸/۶	مجموع جرم
cm	۴/۳	شعاع داخلی
cm	۸/۷	قطر داخلی
cm^3	۲۰۴۷/۳	حجم لوله فولادی
cm	۲۱۲/۱	طول ستون
cm	۷.۴	شعاع خارجی
cm	۰/۳	ضخامت لوله
cm	۹/۴	قطر خارجی
$gr.cm^2$	۵۲۹۸۹۱/۸	ممان اینرسی جرمی در راستای محور z
$gr.cm^2$	۱۵۱۰۶۲۴۱۶/۵	ممان اینرسی جرمی در راستای محور x

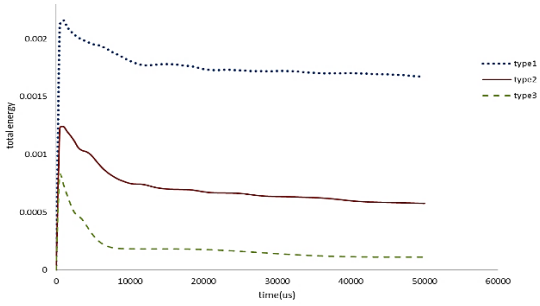
شکل (۵) نتایج جابجایی انتهای ستون به‌دست‌آمده از تحلیل اجزا محدود برای هر سه نوع ستون تحت اثر بار انفجار نشان داده شده است. مطابق مقایسه انجام‌شده در شکل (۵) به ترتیب ستون‌های نوع سوم و دوم بهترین پاسخ را در برابر انفجار دارند. بنابراین ستون کامپوزیت نوع سوم بهترین گزینه از این سه نوع ستون است. عملکرد بهتر ستون سوم را می‌توان به تأثیر فولاد بیرونی بر افزایش استحکام کششی ایجادشده در سازه بتنی نسبت داد. از طرفی ستون با مقطع دایره‌ای نیز مقاومت خوبی در برابر انفجار از خود نشان داده است. این نتیجه می‌تواند به این مربوط شود که امواج فشاری که از طرفین اعمال می‌شوند اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. از طرفی مقطع دایره‌ای به علت نداشتن گوشه‌های تیز، تمرکز تنش کمتری نسبت به مقطع مربعی دارد. علاوه بر این، با مقایسه انرژی جذب‌شده توسط ستون‌ها در سه حالت در نظر گرفته شده مشخص شد که حداکثر انرژی جذب‌شده توسط اجزای ستون اول ۲۱۶ ژول است که این مقدار برای ستون‌های نوع دو و سه به ترتیب برابر با ۱۲۴ و ۸۲ ژول به دست آمد. مقادیر به‌دست‌آمده از انرژی جذب‌شده نشان می‌دهد که ستون شماره ۳ کمترین انرژی انفجار را جذب کرده از این‌رو کمترین آسیب را دیده است ولی ستون شماره ۱ بیشترین انرژی را به خود جذب کرده و بیشتر دچار آسیب شده است. البته این به این معنا نیست که هر ستونی که انرژی بیشتری جذب کرده است پس رفتار خوبی در برابر بار انفجار ندارد. به عبارت دیگر، اگر سازه به صورت کنترل شده و با رفتار پلاستیک خوب انرژی زیادی جذب کند، یعنی عضو مورد نظر طراحی خوبی داشته است و بدون اینکه آسیب شدیدی ببیند توانسته انرژی انفجار را جذب کند و از فروپاشی جلوگیری کرده است یا آسیب‌های وارده به آن در محدوده کم است. از سوی دیگر، اگر انرژی جذب شده توسط سازه به‌واسطه افزایش آسیب وارده به آن باشد، در این حالت جذب انرژی می‌تواند نشانه آسیب شدید یا حتی فروپاشی سازه تلقی گردد. با توجه به اینکه جابجایی ستون نوع سوم در مقایسه با ستون‌های دیگر کمتر است، و از طرفی آسیب وارده به ستون نوع سوم از ستون‌های دیگر کمتر است (به شکل ۷ رجوع شود)، لذا در این حالت ستون سوم که انرژی کمتری جذب نموده و جابجایی کمتری را تجربه کرده، رفتار بهتری در برابر بار انفجار از خود نشان داده است. نمودار انرژی جذب‌شده توسط ستون‌های نوع ۱، ۲ و ۳ در شکل (۶) نشان داده شده است.

در ادامه به ارزیابی خرابی ستون مقطع مربعی و دایره‌ای بتنی به همراه ستون مرکب تحت اثر بارهای انفجار پرداخته می‌شود. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب کانتورهای بیشترین شدت آسیب و نمودار جابجایی برحسب زمان در سر آزاد ستون برای ستون‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۷) مشاهده می‌شود که بیشترین آسیب در قسمت نزدیک به تکیه‌گاه ستون‌ها رخ داده است و آسیب‌پذیرترین ستون، ستون نوع ۱ یا همان

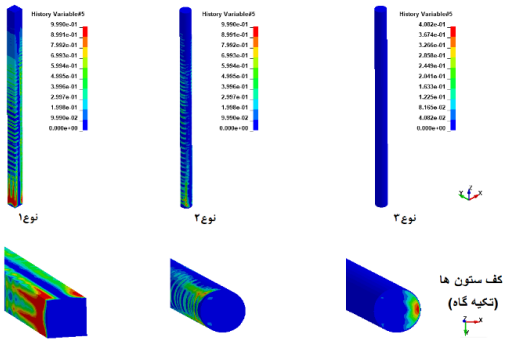
ستون با مقطع مربعی است. ستون نوع۲ رفتار بهتری از خود نشان داده است ولی باز هم قسمت‌هایی از ستون به مرز آسیب جدی رسیده است. ستون نوع۳ به‌خوبی نسبت به ماده منفجره با وزن ۵ کیلوگرم مقاومت نشان داده است و توانسته رفتار خوبی را از خود نشان دهد بدون اینکه دچار آسیب جدی گردد و تنها در ناحیه کف ستون قسمت پشت به انفجار آسیب ۰/۴ را تجربه کرده است. لازم به ذکر است که در کانتورهای آسیب عدد ۰/۹۹۹ (قرمزرنگ) نشان‌دهنده آسیب جدی ستون و عدد صفر (آبی‌رنگ) قسمت‌های بدون آسیب ستون را نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۸) ستون نوع۱ بیشترین جابجایی را داشته و در مقابل، ستون نوع۳ کمترین جابجایی را دارد. به عبارتی از نظر جابجایی، ستون نوع۳ به ترتیب ۵۵٪ و ۳۹٪ عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های نوع۱ و نوع۲ داشته است.



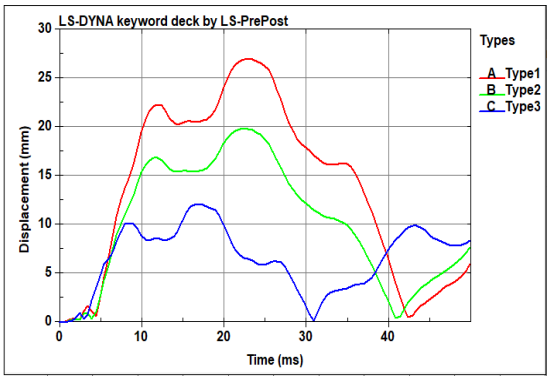
شکل ۵- مقایسه نمودار جابجایی حداکثر ستون‌های ۱، ۲ و ۳ تحت تأثیر انفجار



شکل ۶- مقایسه انرژی‌های جذب‌شده ستون‌های ۱، ۲ و ۳

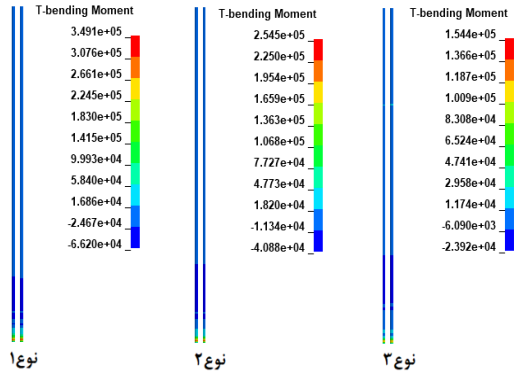


شکل۷- کانتور آسیب برای هر سه ستون نوع ۱، ۲ و ۳



شکل۸- نمودار جابجایی-زمان برای سر آزاد ستون در هر سه ستون نوع۱، ۲ و ۳

شکل (۹) کانتور خمش میلگردهای طولی داخل ستون‌ها در لحظه اصابت موج انفجار (ماکزیمم خمش) را نشان می‌دهد. جهت مقایسه بهتر در جدول۳ همه نتایج اشاره‌شده به‌صورت خلاصه گنجانده شده است. نتایج حاصل از شکل (۹) و جدول ۳ نیز بیانگر این است که ستون نوع ۳ عملکرد بهتری در مقایسه با دیگر ستون‌ها از خود نشان داده است.



شکل۸- نمودار جابجایی-زمان برای سر آزاد ستون در هر سه ستون نوع ۱، ۲ و ۳

جدول۳- مقایسه نتایج هر سه ستون

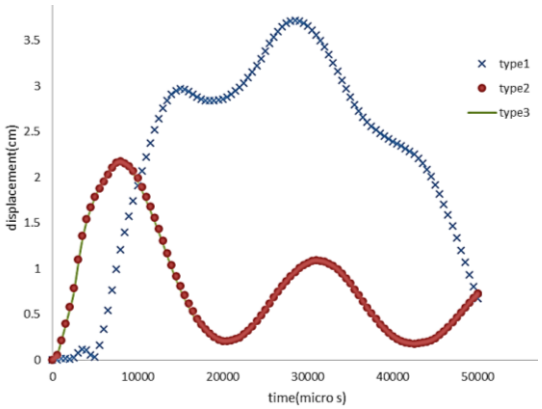
نوع ستون	نوع۱	نوع۲	نوع۳
ماکزیمم جابجایی (mm)	۲۷/۰۷	۱۹/۹۱	۱۲/۱۴
میزان کرنش مؤثر (%)	۰/۶۷	۰/۳۶	۰/۰۶۶۶
ماکزیمم خمش (N.m)	۳۴۹/۱	۲۵۴/۵	۱۵۴/۴

۴- تحلیل پارامتریک

در این قسمت به مطالعه پارامتریک پارامترهای مختلف بر رفتار ستون پرداخته می‌شود. از این رو تأثیر پارامترهای مختلف از جمله شرایط تکیه‌گاهی، تأثیر فاصله و وزن ماده منفجره، مقاومت فشاری بتن، تنش تسلیم و ضخامت فولاد بر رفتار ستون مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل در ادامه ارائه می‌گردد.

۴-۱- تأثیر تغییر شرایط تکیه‌گاهی بر میزان جابجایی ستون‌ها

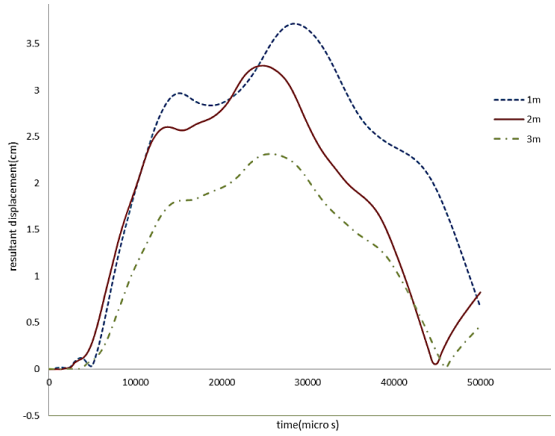
برای بررسی تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر میزان جابجایی میان دهانه، ستون با مقطع مربعی و فاصله از محل انفجار ۱ متر و میزان ماده منفجره ۵ کیلوگرم در نظر گرفته شد. سه مدل شرط مرزی در نظر گرفته شده است. اولی یک سر گیردار و یک سر آزاد. دومی یک سر گیردار و سر دیگر در راستای قایم مجاز به حرکت است. سومین نوع از شرط مرزی که در نظر گرفته شد یک سر اتصال مفصلی و سر دیگر در راستای قائم مجاز به حرکت است. مطابق با نمودار نشان داده شده در شکل (۹) با اضافه کردن قید مرزی حرکت در راستای قایم به سر آزاد ستون میزان جابجایی حداکثر به‌شدت کمتر شده است. با توجه به اینکه ستون‌ها در واقعیت نه گیردار کامل هستند و نه مفصلی کامل، لذا تعیین دقیق شرایط تکیه‌گاهی سازه مورد نظر حائز اهمیت است، و ازاین‌رو می‌توان به تکیه‌گاه‌های نیمه گیردار به‌منظور مدل‌سازی واقعی‌تر شرایط تکیه‌گاهی ستون متوسل شد.



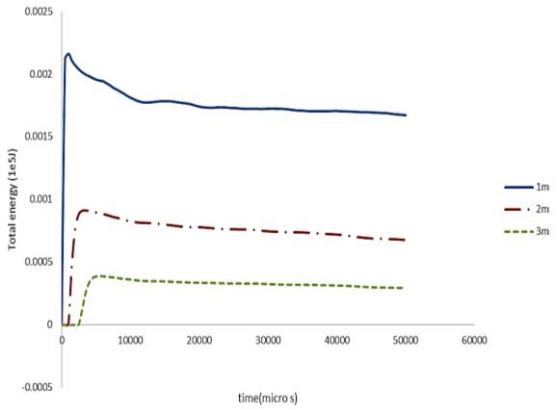
شکل ۱۰- تأثیر شرایط مرزی بر میزان حداکثر جابجایی ستون

۴-۲- تأثیر فاصله ماده منفجره از ستون و تأثیر بر میزان جابجایی آن‌ها

برای بررسی تأثیر فاصله محل انفجار بر میزان جابجایی و انرژی جذب‌شده ستون‌ها سه شبیه‌سازی در فواصل ۱، ۲ و ۳ متر با میزان ۵ کیلوگرم ماده منفجره برای ستون با مقطع مربعی انجام شد و نتایج به دست آمده در شکل (۱۱) مقایسه گردید. بر اساس شکل (۱۱) مشاهده می‌شود با افزایش فاصله ماده منفجره از ستون اولاً موج انفجار دیرتر به سازه می‌رسد و ثانیاً با افزایش فاصله میزان جابجایی انتهای ستون نیز کم شده است. لازم به ذکر است که یکی از راه‌های ایمن کردن سازه‌ها در برابر بار انفجار استفاده از فاصله ایمن است که بر اساس همین مفهوم بنا شده است. به عبارت دیگر، فاصله ایمن فاصله‌ای است که در آن سازه بعد از بار انفجار دچار خرابی‌های ناچیز یا کم می‌گردد و عملکرد باربری خود را از دست نمی‌دهد. نحوه تعیین فاصله ایمن یک سازه و رویکرد تعیین آن در منبع [۳۹] به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه انرژی‌های جذب‌شده توسط ستون مربعی در فواصل مختلف در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که تأثیر فاصله بر میزان انرژی جذب‌شده توسط ستون رابطه خطی ندارد و هر چه فاصله بیشتر شود انرژی جذب‌شده نیز به‌شدت کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱- مقایسه جابجایی انتهای ستون‌ها برحسب زمان در اثر بارگذاری یکسان در فواصل مختلف

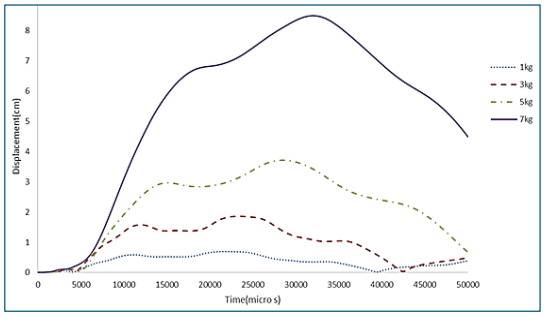


شکل ۱۲- انرژی جذب‌شده توسط ستون مربعی در فواصل بارگذاری مختلف

۴-۳- تأثیر میزان ماده منفجره بر میزان جابجایی ستون‌ها

در ادامه تأثیر وزن ماده منفجره بر میزان جابجایی ستون بررسی شده است. ستون با مقطع مربعی برای این منظور انتخاب شده است. فاصله ماده منفجره در کلیه حالات یک

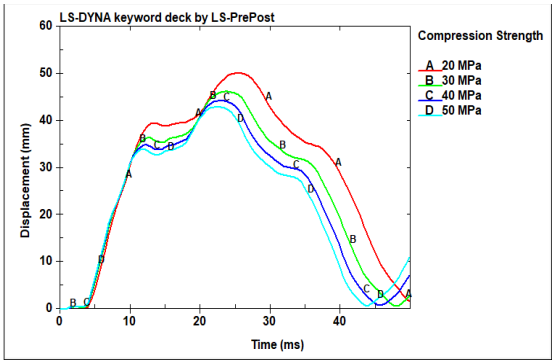
متر در نظر گرفته شده است. وزن‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ کیلوگرم برای مقایسه انتخاب شدند. در شکل (۱۳) میزان جابجایی به‌دست آمده از تحلیل اجزا محدود نمایش داده شده است. مطابق این شکل با افزایش وزن ماده منفجره جابجایی افزایش پیدا کرده است، و افزایش جابجایی می‌تواند منجر به آسیب شدید به سازه گردد در صورتی که میزان چرخش‌های ایجاد شده در تکیه‌گاه‌های سازه از حدود مجاز آئین‌نامه گذر کند.



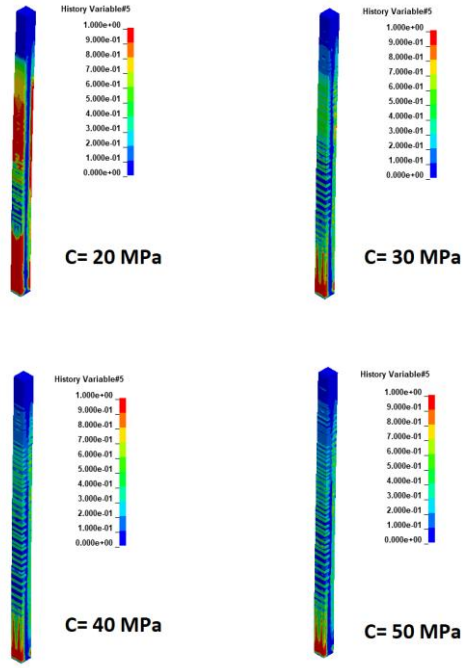
شکل ۱۳- تأثیر وزن ماده منفجره بر میزان جابجایی حداکثر

۴-۴-تأثیر مقاومت فشاری بتن

برای اینکه تأثیر میزان مقاومت فشاری بتن در رفتار ستون مورد بررسی قرار گیرد، مقاومت‌های فشاری ۲۰ ، ۳۰ ، ۴۰ و ۵۰ مگا پاسکال برای شبیه‌سازی ستون مقطع مربعی در نظر گرفته شد و نتایج تغییر شکل ستون‌ها به‌صورت نموداری و کانتوری ارائه گردید. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب نمودار جابجایی برحسب زمان سر آزاد ستون و کانتور آسیب بتن در هر چهار مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. همان‌طور که از نمودارهای شکل (۱۴) مشخص است ستون با مقاومت فشاری ۲۰ مگا پاسکال بیشترین جابجایی را داشته و در مقابل ستون با مقاومت فشاری ۵۰ مگا پاسکال کمترین جابجایی را دارد. به عبارتی از نظر جابجایی، ستون با مقاومت ۵۰ مگا پاسکال به ترتیب ۳۱، ۱۷/۵ و ۷/۷ درصد عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های با مقاومت فشاری کمتر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگا پاسکال داشته است. از طرفی شکل ۱۵ نشان‌دهنده آسیب بسیار شدید ستون با مقاومت فشاری ۲۰ مگا پاسکال است، ولی کانتور آسیب ستون با مقاومت فشاری بتن ۴۰ مگا پاسکال به بالا تقریباً یکسان بوده، که می‌توان از نظر فنی انتخاب بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگا پاسکال را در برابر این بارگذاری بهینه توصیف کرد. به عبارتی بهبود عملکردی بتن از این میزان بیشتر تأثیر آن‌چنانی در آسیب وارده و میزان جابجایی تحت بار انفجار در نظر گرفته شده ورودی نخواهد داشت. در جدول۴ علاوه بر ارائه ماکزیمم جابجایی سر آزاد ستون‌ها، میزان کرنش مؤثر ستون‌ها نیز ذکرشده است. بر اساس این جدول افزایش مقاومت فشاری بتن منجر به کاهش جابجایی و کرنش در ستون مورد نظر شده است.



شکل۱۴- نمودار جابجایی-زمان برای سر آزاد ستون مقطع مربی با ۴ مقاومت فشاری مختلف ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگا پاسکال



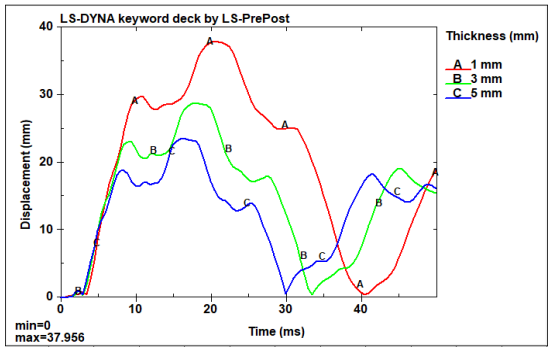
شکل۱۵- کانتور آسیب ستون مقطع مربی با ۴ مقاومت فشاری مختلف ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مگا پاسکال

جدول۴- مقایسه نتایج هر سه ستون

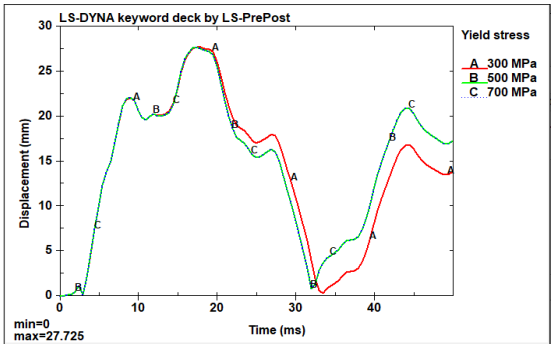
مقاومت فشاری بتن	۲۰ MPa	۳۰ MPa	۴۰ MPa	۵۰ MPa
ماکزیمم جابجایی (mm)	۵۰/۲۴	۴۵/۰۱	۴۱/۲۵	۳۸/۳۳
میزان کرنش مؤثر (%)	۲/۳۲۴	۱/۰۸۵	۰/۶۳۳	۰/۴۷۰

۴-۵- تأثیر ضخامت و تنش تسلیم فولاد

در این قسمت به بررسی تأثیر پارامترهای ضخامت و تنش تسلیم فولاد بر رفتار ستون تحت بار انفجار پرداخته می‌شود. برای تنش تسلیم سه مقدار ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شد. برای بررسی اثر ضخامت سه ضخامت ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر موردبررسی قرار گرفت. در این قسمت برای همه شبیه‌سازی‌ها از بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگا پاسکال استفاده شده است. شکل (۱۶) نشان دهنده نمودار ماکزیمم جابجایی ستون مرکب با لایه فولادی به‌کاررفته با سه ضخامت متفاوت ۱، ۳ و ۵ میلی‌متری است. بر اساس شکل با افزایش ضخامت فولاد میزان جابجایی ستون کاهش پیدا می‌کند، به عبارتی ماکزیمم جابجایی ستون برای سه ضخامت متفاوت ۱، ۳ و ۵ میلی‌متری به ترتیب برابر با ۳۷/۹۵ ، ۲۸/۸۶ و ۲۳/۵۷ میلی‌متر به‌دست‌آمده است که به ترتیب کاهش ۲۴ درصدی و ۱۸/۳۲ درصدی داشته است.



شکل۱۶- نمودار جابجایی-زمان برای سر آزاد ستون مرکب با سه ضخامت مختلف برای لایه فولادی



شکل۱۷- نمودار جابجایی-زمان برای سر آزاد ستون مرکب با سه تنش تسلیم متفاوت برای لایه فولادی

شکل (۱۷) تأثیر تنش تسلیم لایه فولادی در برابر بار انفجاری را نشان می‌دهد. به عبارتی این شکل نشان دهنده نمودار ماکزیمم جابجایی ستون همراه با لایه تقویتی فولاد به‌کاررفته با سه تنش تسلیم متفاوت ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ مگاپاسکال است. همان‌طور که از شکل پیداست تنش تسلیم فولاد تأثیر چندانی در میزان جابجایی ماکزیمم ستون ندارد مخصوصاً اگر از مقدار ۵۰۰ مگا پاسکال بیشتر باشد. هرچند این تغییر از ۲۰ میلی‌ثانیه به بعد بیشتر شده و در پیک دوم و سوم جابجایی، ملموس‌تر است. یعنی با شروع حرکت نوسانی ستون تنش تسلیم تأثیر خودش را نشان داده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی رفتار ستون‌های بتنی و مرکب با مشخصات مکانیکی یکسان تحت اثر بار انفجار با استفاده از مدل‌سازی اجزا محدود توسط نرم‌افزار LS-DYNA پرداخته شد. یافته‌های این مقاله به شرح زیر است:

۱- با انتخاب مناسب مقطع یک ستون می‌توان آسیب یک سازه را تقریباً تا مقدار زیادی کاهش داد (حدود ۵۹ درصد برای ستون‌هایی که در این مقاله بررسی گردید) و این کاهش در مورد جابجایی ماکزیمم و همچنین میزان بیشینه خمش نیز برقرار است (در حدود ۵۵٪). در این مطالعه مقطع مرکب در مقایسه با مقاطع دیگر عملکرد به مراتب بهتری از خود نشان داد.

۲- برای هر بارگذاری انفجار می‌توان مقدار بهینه‌ای برای مقاومت فشاری بتن تعیین کرد به‌طوری‌که مقاومت فشاری بیشتر از این مقدار، بهبود عملکردی آن‌چنانی در آسیب وارده به ستون و میزان جابجایی آن نخواهد داشت.

۳- تحلیل پارامترهای انفجار نشان داد که با افزایش مقدار ماده منفجره و کاهش فاصله سازه از محل انفجار، میزان آسیب وارده به سازه افزایش می‌یابد که البته این افزایش به صورت خطی نیست، و از این رویکرد می‌توان جهت تعیین فاصله ایمن سازه‌ها تحت اثر بار انفجار استفاده نمود.

۴- تأثیر پارامترهای تنش تسلیم و ضخامت فولاد در مقطع مرکبی که مورد بررسی قرار گرفت نشان داد که ضخامت اثر بیشتری بر پاسخ سازه در مقایسه با تنش تسلیم فولاد دارد، هر چند که تنش تسلیم در نوسان‌های بعد از مقدار ماکزیمم جابجایی اثر بیشتری از خود نشان داد.

۵- تغییر شرایط تکیه‌گاهی رفتار ستون تحت بار

انفجار را به شدت تغییر می‌دهد. با توجه به اینکه ستون‌ها در واقعیت نه گیردار کامل هستند و نه مفصلی کامل، لذا تعیین دقیق شرایط تکیه‌گاهی سازه مورد نظر حائز اهمیت است، و از این رو می‌توان به تکیه‌گاه‌های نیمه گیردار به‌منظور مدل‌سازی واقعی‌تر شرایط تکیه‌گاهی ستون متوسل شد.

۶- آسیب وارده به ستون بتنی با مقطع مربعی در مقایسه با ستون‌های دایره‌ای بتنی و مرکب بیشتر گردید و ستون مرکب کمترین میزان آسیب را تجربه کرد.

نتایج این مقاله ازنظر اقتصادی نیز به مهندسان سازه کمک خواهد کرد. در راستای آینده‌نگری و ارائه خط‌مشی برای دنبال کنندگان این پژوهش پیشنهاد می‌شود در کنار لایه فولادی ستون مرکب ارائه‌شده در مقاله به بررسی لایه‌های کامپوزیتی جایگزین فولاد پرداخته شود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

محدثه زهرا مویدی: ایده، انجام پژوهش، مدلسازی، اعتبارسنجی، تحلیل خروجی‌ها، نوشتن نسخه ابتدایی مقاله

محمد مومنی: ایده، نظارت، بررسی نتایج، بازبینی و ویرایش علمی، نهایی سازی نسخه مقاله

سعید آقاجانیان: بازبینی و ویرایش علمی، بررسی نتایج

سهراب میراثی: بازبینی و ویرایش علمی، بررسی نتایج

منابع مالی

برای انجام این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نشده است.

مراجع

[1] Kelliher, D., and K. Sutton-Swaby. “Stochastic Representation of Blast Load Damage in a Reinforced Concrete Building.” Structural Safety 34, no. 1 (2012): 407–417.

[2] Kim, J., and T. Kim. “Assessment of Progressive Collapse-Resisting Capacity of Steel Moment Frames.” Journal of Constructional Steel Research 65, no. 1 (2009): 169–179.

[3] Stylianidis, P., and D. Nethercot. “Modelling of Connection Behaviour for Progressive Collapse Analysis.” Journal of Constructional Steel Research 113 (2015): 169–184.

[4] U.S. Department of Defense. UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Washington, DC: U.S. Department of Defense, 2009.

[5] Burr, W. H. “The Reinforced Concrete Work of the McGraw Building.” Transactions of the American Society of Civil Engineers 60, no. 1 (1908): 443–457.

[6] Talbot, A. N., and A. R. Lord. Tests of Columns: An Investigation of the Value of Concrete as Reinforcement for Structural Steel Columns. Bulletin No. 56. Urbana: University of Illinois Engineering Experiment Station, 1912.

[7] Brode, H. “Numerical Solutions of Spherical Blast Waves.” Journal of Applied Physics 26 (1955): 766–775.

[8] Newmark, Nathan M., and R. J. Hansen. "Design of blast resistant structures." Shock and vibration handbook 3 (1961): 1-19.

[9] Williams, M. S., and J. P. Newell. “Methods for the Assessment of the Blast Response of Engineering Structures.” In Earthquake, Blast and Impact: Measurement and Effects of Vibration, 176–185, 1991.

[10] Mahin, S. A., V. V. Bertero, M. B. Atalay, and D. Rea. “Rate of Loading Effects on Uncracked and Repaired Reinforced Concrete Members.” In Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, vol. 1, 1461–1470. Rome, 1973.

[11] Mutsuyoshi, H., and A. Machida. “Properties and Failure of Reinforced Concrete Members Subjected to Dynamic Loading.” Transactions of the Japan Concrete Institute 6 (1984): 521–528.

[12] Cotsovos, D., and M. N. Pavlović. “Numerical Investigation of Concrete Subjected to Compressive Impact Loading. Part 1: A Fundamental Explanation for the Apparent Strength Gain at High Loading Rates.” Computers & Structures 86 (2008): 145–163.

[13] Cotsovos, D., and M. N. Pavlović. “Numerical Investigation of Concrete Subjected to High Rates of Uniaxial Tensile Loading.” International Journal of Impact Engineering 35 (2008): 319–335.

[14] Cotsovos, D., N. D. Stathopoulos, and C. A. Zeris. “Behavior of RC Beams Subjected to High Rates of Concentrated Loading.” Journal of Structural Engineering 134 (2008): 1839–1851.

[15] Li, M., Z. Zong, H. Hao, X. Zhang, J. Lin, and G. Xie. “Experimental and Numerical Study on the Behaviour of CFDST Columns Subjected to Close-In Blast Loading.” Engineering Structures 185 (2019): 203–220.

[16] Zhang, F., C. Wu, X. L. Zhao, Z. X. Li, A. Heidarpour, and H. Wang. “Numerical Modeling of Concrete-Filled Double-Skin Steel Square Tubular Columns under Blast Loading.” Journal of Performance of Constructed Facilities 29, no. 5 (2015): B4015002.

[17] Anas, S., M. Alam, and M. Umair. “Performance of (1) Concrete-Filled Double-Skin Steel Tube with and without Core Concrete, and (2) Concrete-Filled Steel Tubular Axially Loaded Composite Columns under Close-In Blast.” International Journal of Protective Structures 14, no. 3 (2023): 299–334.

[18] Li, M., M. Xia, Z. Zong, G. Wu, and X. Zhang. “Residual Axial Capacity of Concrete-Filled Double-Skin Steel Tube Columns under Close-In Blast Loading.” Journal of Constructional Steel Research 201 (2023): 107697.

[19] Fouché, P., M. Bruneau, and V. Chiarito. “Dual-Hazard Blast and Seismic Behavior of Concrete-Filled Double-Skin Steel Tubes Bridge Pier.” Journal of Structural Engineering 143, no. 12 (2017): 04017155.

[20] Wang, W., C. Wu, and J. Li. “Numerical Simulation of Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Columns under Close-Range Blast Loading.” Journal of Composites for Construction 22, no. 5 (2018): 04018036.

[21] Wang, R., L. H. Han, X. L. Zhao, and K. J. Rasmussen. “Experimental Behavior of Concrete Filled Double Steel Tubular (CFDST) Members under Low Velocity Drop Weight Impact.” Thin-Walled Structures 97 (2015): 279–295.

[22] Zhang, F., C. Wu, Z. X. Li, and X. L. Zhao. “Residual Axial Capacity of CFDST Columns Infilled with UHPFRC after Close-Range Blast Loading.” Thin-Walled Structures 96 (2015): 314–327.

[23] Ritchie, C. B., J. A. Packer, M. V. Seica, and X. L. Zhao. “Behaviour and Analysis of Concrete-Filled Rectangular Hollow Sections Subject to Blast Loading.” Journal of Constructional Steel Research 147 (2018): 340–359.

[24] Vernardos, S., and C. Gantes. “Experimental Behavior of Concrete-Filled Double-Skin Steel Tubular (CFDST) Stub Members under Axial Compression: A Comparative Review.” Structures 22 (2019): 383–404.

[25] Li, M., Z. Zong, L. Liu, and F. Lou. “Experimental and Numerical Study on Damage Mechanism of CFDST Bridge Columns Subjected to Contact Explosion.” Engineering Structures 159 (2018): 265–276.

[26] Nasiri, E., and Y. Liu. “The Out-of-Plane Behaviour of Concrete Masonry Infills Bounded by Reinforced Concrete Frames.” Engineering Structures 184 (2019): 406–420.

[27] Tahzeeb, R., M. Alam, and S. M. Muddassir. “Performance of Composite and Tubular Columns under Close-In Blast Loading: A Comparative Numerical Study.” Materials Today: Proceedings 65 (2022): 51–62.

[28] Momeni, M., C. Bedon, and M. A. Hadianfard. “Probabilistic Evaluation of Steel Column Damage under Blast Loading via Simulation Reliability Methods and Gene Expression Programming.” Engineering Proceedings 53, no. 1 (2023): 20.

[29] Momeni, M., D. Demetriou, L. Papadakis, C. Bedon, M. F. Petrou, and D. Nicolaides. “Damage Investigation of Blast Loaded UHPFRC Panels with Optimized Mixture Design Using Advanced Material Models.” Results in Engineering 23 (2024): 102518.

[30] Mirassi, S., M. Momeni, and A. Hosseini Moorderaz. “Damage Evaluation of Concrete Bridge with Steel Piers Subjected to Explosive Loads.” Journal of Modeling in Engineering 22, no. 78 (2024): 307–326.

[31] Momeni, M., M. A. Hadianfard, C. Bedon, and A. Baghlani. “Numerical Damage Evaluation Assessment of Blast Loaded Steel Columns with Similar Section Properties.” Structures 20 (2019): 189–203.

[32] Hallquist, J. O. LS-DYNA Keyword User’s Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[33] Livermore Software Technology Corporation. LS-PrePost Software. Accessed November 5, 2026. https://www.lstc.com/products/ls-prepost.

[34] C., S., J. Woodson, and T. Baylot. Structural Collapse: Quarter-Scale Model Experiments. U.S. Army Corps of Engineers, 1999.

[35] Jayasooriya, R. P., D. J. Thambiratnam, and N. Perera. “Blast Response and Safety Evaluation of a Composite Column for Use as Key Element in Structural Systems.” Engineering Structures (2014): 31–43.

[36] Schwer, L. E., and L. J. Malvar. “Simplified Concrete Modeling with *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3.” In JRI LS-DYNA User Week, 49–60, 2005.

[37] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA Keyword User’s Manual: Volume II. Version R9.0. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2016.

[38] Momeni, M., C. Bedon, M. A. Hadianfard, and S. Malekpour. “Stochastic Response of Steel Columns Subjected to Lateral Blast Based on Modified Single Degree of Freedom (MSDOF) Method.” Resilient Cities and Structures 4, no. 1 (2025): 1–15.

[39] Momeni, M., C. Bedon, M. A. Hadianfard, and A. Baghlani. “An Efficient Reliability-Based Approach for Evaluating Safe Scaled Distance of Steel Columns under Dynamic Blast Loads.” Buildings 11, no. 12 (2021): 606.