

ارزیابی و مقایسه رفتار ستون‌های بتن مسلح دایره‌ای و مربعی تقویت شده با جاکت‌های فولادی در برابر انفجار

سمیه ملایی^{۱*}، میلاد خضری^۲

۱- استادیار دانشگاه بناب ۲- کارشناسی ارشد دانشگاه کردستان

(تاریخ وصول: ۹۸/۷/۱، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۴)

چکیده

سازه‌های بتن مسلح کاربرد گسترده‌ای در ساخت بناهای شهری و غیر شهری دارند که همواره در معرض وقوع انفجارهای عمدی یا سهوی هستند. در سازه‌ها، ستون‌ها المان‌های باربر کلیدی محسوب می‌شوند. در این مقاله، رفتار ستون‌های بتن مسلح با مقطع دایره‌ای و مربعی، که با جاکت‌های فولادی مقاوم‌سازی شده‌اند تحت بارگذاری انفجار بررسی و با یکدیگر مقایسه می‌شود. شش نمونه ستون دایره‌ای و شش نمونه ستون مربعی، که از نظر هندسی و مصالح معادل هستند، با استفاده از پکیج نرم‌افزاری ABAQUS مدل‌سازی شده است. اثر تغییر میزان مقاومت بتن، آرماتورها و نیز مشخصات هندسی جاکت فولادی در مدل‌های اجزای محدود مطالعه شده است. زیربرنامه‌ای در متلب نوشته شده تا با تغییر مقاومت بتن و درصد فولاد میزان تغییر در ظرفیت محوری و جانبی ستون را ارزیابی کند. بر اساس مهم‌ترین نتایج حاصل، ستون‌های دایره‌ای عملکرد بهتری در انفجار دارند. همچنین، وجود جاکت فولادی اثر استفاده از بتن مقاوم‌تر و درصد فولاد بیشتر را نیز تقویت می‌کند. این اثربخشی در ستون‌های دایره‌ای بالاتر از ستون‌های مربعی است.

واژه‌های کلیدی: ستون بتن مسلح، انفجار، مقطع دایره‌ای، مقطع مربعی، جاکت فولادی، ABAQUS.

Evaluation and Comparison of Behavior of Steel Jacketed RC Columns with Circular and Square Sections under Blast Loading

S. Mollaei*, M. Khezri

University of Bonab

(Received: 9/23/2019, Accepted: 1/4/2020)

Abstract

Reinforced concrete (RC) structures are widely used in urban buildings and infrastructures, and these are always subjected to explosions caused by intentional or unintentional accidents. Among the structural members, columns are key load carrier elements. In this paper, behavior of RC columns with circular and square sections strengthened by steel jackets is investigated and compared under blast loading. Accordingly, six circular columns and six square columns, which are equivalent in geometry and material properties, were modeled using ABAQUS software package. The effect of varying the concrete strength, longitudinal reinforcement and geometrical properties of steel jacket on FE models of the columns has been studied. In addition, a sub-program has been written to evaluate the changes in axial and lateral capacity of the column. Based on the most important results, the circular columns perform better under blast loading. Using steel jackets, in addition to increasing the explosive capacity of the column, improves the effects of other remediation strategies such as the use of high strength concrete and the higher percentage of reinforcement. This effect was observed to be higher in circular columns in compare to square columns.

Keywords: RC Column, Blast, Circular Section, Square Section, Steel Jacketing, ABAQUS.

۱- مقدمه

بررسی کرده‌اند. با وجود تمام این مطالعات و پژوهش‌ها، آگاهی ما در مورد اثر ضخامت جاکت فولادی بر مقاومت انفجاری ستون بتنی و همچنین مقایسه اثر جاکت فولادی بر مقاومت انفجاری ستون‌های دایره و مربعی هنوز بسیار اندک است و نیاز به انجام مطالعات بیشتر دارد.

در پژوهش‌های مختلفی از نرم‌افزار اجزای محدود صریح ABAQUS/Explicit به‌طور موفقیت‌آمیزی در مدل‌سازی سازه‌ها تحت انفجار استفاده شده است [۱۷، ۱۹ و ۲۰]. در اینجا نیز تمامی مدل‌سازی و تحلیل‌ها توسط نرم‌افزار ABAQUS 6.13 [۲۱] انجام می‌گیرد. از طرفی، تجربیات عملی نشان داده است که به علت مدت زمان تداوم بسیار کوتاه بارگذاری انفجاری (حدود چند میلی‌ثانیه) دیوارهای پرکننده در قاب‌ها فشار حاصل از انفجارهای خارج از ساختمان را به ستون‌های طرفین قاب منتقل نمی‌کنند و عملاً سطح بارگیر ستون‌ها فقط عرض رو به انفجار آن است [۲۲]. بنابراین، در نظر گرفتن المان ستون به تنهایی و به صورت مستقل از سایر اجزای قاب تحت بارگذاری انفجار فرضی نزدیک به واقعیت است که در این مقاله نیز همین فرض در نظر گرفته شده است.

با بررسی ویژگی‌های حملات تروریستی، بروز انفجار در فواصل نزدیک با مقادیر کم مواد منفجره و سپس انفجار مقادیر بیشتر مواد منفجره در فواصل دورتر برای ستون‌های بتن مسلح بسیار محتمل است [۲۳] و [۲۴]. از آنجا که تهیه مقادیر کم مواد منفجره ساده‌تر بوده و جاسازی بسته‌های کوچک و سبک در نقاط مورد نظر راحت‌تر است، احتمال بروز انفجارهای عمده با مقادیر کم مواد منفجره همواره بیشتر است. در اینجا نیز منظور از بار انفجار همین نوع خاص از حوادث عمده یا سهوی انفجاری است.

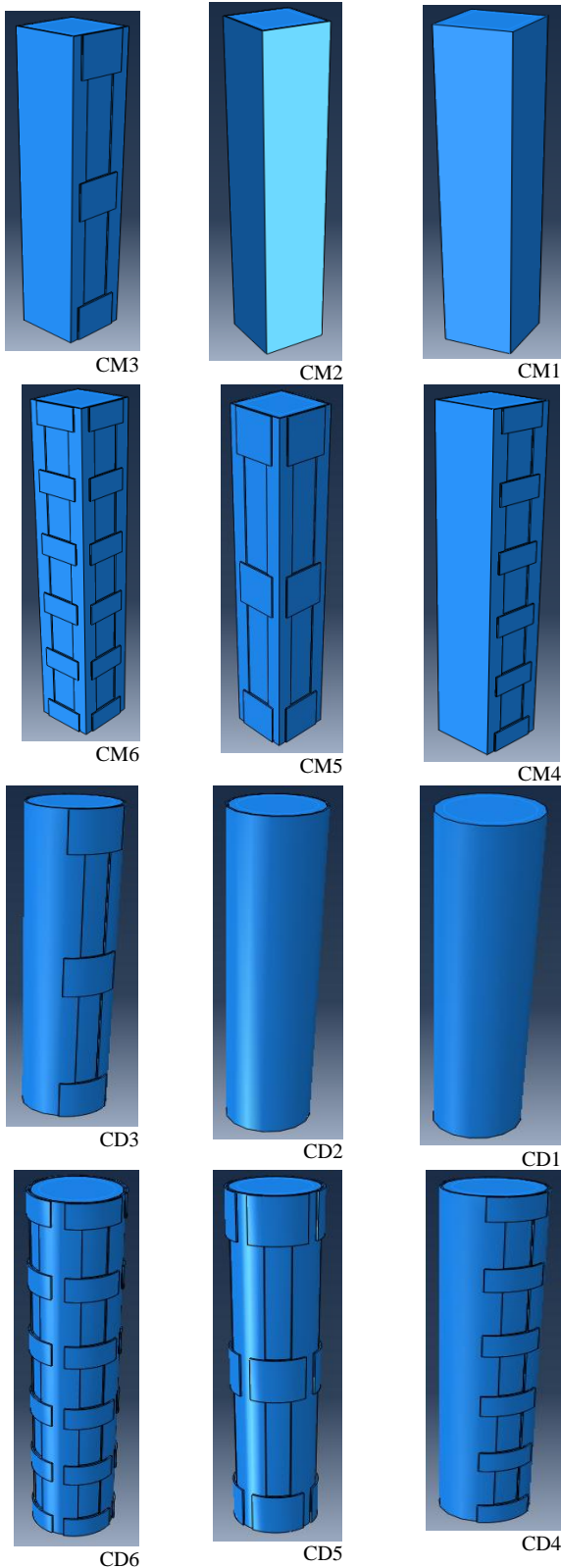
با توجه به توضیحات فوق، در این مقاله به مدل‌سازی و تحلیل ستون‌های دایره‌ای و مربعی تحت انفجار در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته می‌شود. در ادامه، چندین طرح مقاومت‌سازی با جاکت فولادی برای ستون‌های مورد نظر استفاده شده و تغییر شکل و جابه‌جایی جانبی دو نوع ستون دایره و مربعی تحت انفجار با یکدیگر مقایسه می‌شود. امروزه، کاربرد جاکت (پوشش) فولادی در بهبود مقاومت و عمر مفید اعضای بتن مسلح به علت سادگی و سرعت مقاومت‌سازی، در سراسر جهان توسعه پیدا کرده است. در این مقاله، هدف بررسی مقاومت‌سازی محوری ستون بتن مسلح (دایره‌ای و مربعی) با جاکت‌های فولادی مختلف تحت بارگذاری انفجار است.

۲- مدل‌های مورد نظر

در اینجا، شش مدل ستون‌های بتن مسلح با مقطع مربعی به ابعاد 200×200 mm با طول دهانه آزاد 1200 mm و فولادگذاری یکسان انتخاب شده است. در شش مدل ستون دایره‌ای نیز مساحت مقطع و

اخیراً، تمایل به انجام مطالعات به روی اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌ها و زیرساخت‌ها رو به افزایش است. رفتار سازه تحت انفجار می‌تواند بسیار پیچیده باشد و بارگذاری انفجار بخش‌های مختلف سازه نظیر دیوارها، دال‌ها، تیرها یا ستون‌ها را درگیر می‌کند. در این میان، ستون‌ها المان‌های باربر کلیدی محسوب می‌شوند. زیرا خرابی ستون یکی از مهم‌ترین علت‌های تخریب پیش‌رونده^۱ در سازه‌های قابی است. پدیده تخریب پیش‌رونده از علل اصلی تلفات جانی و مالی پس از بروز حوادثی چون انفجار بوده و خسارات آن به مراتب بیشتر از خسارت مستقیم ناشی از انفجار است [۳-۱]. بنابراین، در نظر گرفتن آسیب مستقیم تک-تک اعضای سازه‌ای به ویژه ستون‌ها در اثر انفجار می‌تواند در بهبود روش‌های پیشنهادی در کدهای طراحی برای جلوگیری از تخریب پیش‌رونده مؤثر باشد [۴]. بنابراین، در اینجا رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار مطالعه خواهد شد.

رولر و همکاران مقاومت پسماند یک سری از نمونه‌های کوچک مقیاس ستون بتن مسلح با مقطع دایره‌ای را مطالعه کرده‌اند [۵]. اسماعیل‌نیا عمران و ملائی [۶] روابط تجربی برای تخمین ظرفیت پسماند ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در کاری دیگر، پاسخ بتن فیبری با عملکرد بالا (UHPFRC) تحت بارگذاری انفجار ایده‌آل توسط آستارلی‌اوقلو و کروثامر [۷] و همچنین آئودی و همکاران [۸] مورد آزمایش قرار گرفته است. از طرف دیگر در مطالعات کرافورد و همکاران [۹] به مقاومت‌سازی ستون‌های بتن مسلح با جاکت فولادی پرداخته شده و اثر مثبت این نوع مقاومت‌سازی بر افزایش ظرفیت انفجاری ستون نشان داده شده است. تعدادی مطالعات آزمایشگاهی به روی رفتار ستون بتن مسلح مقاومت‌سازی شده با انواع جاکت فولادی تحت بارگذاری انفجار انجام شده که در برخی به ستون‌های دایره‌ای [۱۰ و ۱۱] و در برخی به ستون‌های با مقطع مربعی یا مستطیلی [۱۵-۱۲] پرداخته شده است. در آزمون‌های آزمایشگاهی می‌توان رفتار واقعی تر اعضای سازه‌ای را بررسی کرد اما هزینه انجام این گونه آزمون‌ها بسیار بالا بوده همچنین امکان ثبت داده‌ها در آن‌ها محدود است. ایزدی‌فرد و دیگران [۱۶] آزمون‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی تیرهای بتن مسلح تحت بارهای انفجاری را انجام داده‌اند که می‌توان با صرف نظر از اثر بار محوری، نتایج آن‌ها را به ستون‌های بتن مسلح نیز تعمیم داد؛ البته در این مطالعه به اثر مقاومت‌سازی با جاکت فولادی پرداخته نشده است. در نقطه مقابل، اسماعیل‌نیا عمران و ملائی [۱۷] بررسی رفتار انفجاری ستون‌های بتنی مقاومت‌سازی شده را انجام داده‌اند که در آن از رویکرد اجزای محدود صحت‌سنجی شده‌ای استفاده شده است. ایزدی‌فرد و رهبری [۱۸] رفتار ستون‌های مربعی بتنی با غلاف فولادی CFDST را تحت انفجار



شکل ۱- مدل اجزای محدود ستون‌های دایره‌ای و مربعی و جاکت‌های فولادی.

میزان میلگرد یکسان بوده و معادل با مقطع مربعی است (قطر مقطع ۲۲۶ mm). متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن برابر با ۳۵ MPa و چگالی آن 2400 kg/m^3 می‌باشد. برای فولاد طولی از چهار عدد میلگرد آجدار نوع AIII به قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده شده است. خاموت‌های بسته با میلگرد ۱۰mm به فواصل مشخص در طول مدل‌ها قرار داده می‌شود. در هر ۱۲ نمونه، در یک انتها تکیه‌گاه گیردار بوده و در انتهای دیگر تکیه‌گاه به صورت گیردار غلتکی است و تحت بار ثقلی محوری قرار دارد. به منظور مدل‌سازی اندرکنش بین بتن و فولاد از مدل المان‌های مدفون استفاده شده است. برای مدل‌سازی سه‌بعدی بخش بتن از المان Solid نوع C3D8R استفاده شده است. این المان به صورت مکعبی سه‌بعدی با ۸ گره است. برای مدل‌سازی میلگرد به روش اجزای محدود از المان Truss نوع T3D2 استفاده شده و برای مدل‌سازی جاکت فولادی نیز از المان shell نوع S4R استفاده شده که المان پوسته‌ای سه‌بعدی ۴ گرهی با ۶ درجه آزادی در هر گره است [۲۱].

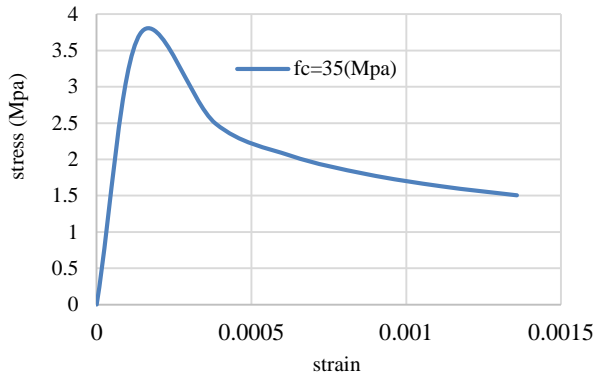
به‌طور معمول، مقدار بار محوری اولیه در ستون‌هایی که رفتارشان تحت بارهای انفجاری بررسی می‌شود به صورت نسبتی از مقاومت محوری اسمی ستون تعریف می‌شود که این نسبت با توجه به مثال‌های عملی، به‌طور معمول در بازه $0.1 - 0.4$ است. نسبت بار محوری موجود به ظرفیت محوری (ALR^1)، که مطابق رابطه (۱) تعریف می‌گردد، برای ستون‌های طبقه اول یا هم‌کف یک ساختمان چند طبقه در حدود 0.3 گزارش شده است [۲۵].

$$ALR = \frac{N}{N_{max}} \quad (1)$$

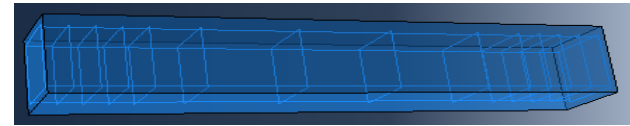
در رابطه (۱)، N_{max} ظرفیت محوری اسمی و N نیروی محوری وارد شده به ستون‌های مورد نظر است.

در شکل‌های (۳-۱) به ترتیب مدل اجزای محدود ستون‌های مربعی و دایره‌ای با جاکت فولادی و میلگردگذاری این ستون‌ها نشان داده شده است. نامگذاری مدل ستون‌ها نیز در جدول (۱) آورده شده است. در این نوع نامگذاری، حرف C نشان دهنده ستون، M برای مقطع مربعی و D برای مقطع دایره‌ای انتخاب شده و شماره‌های ۱ تا ۶ به نوع مقاوم‌سازی با جاکت فولادی اشاره دارد (عدد ۱ یعنی بدون مقاوم‌سازی).

در اینجا، طرح‌های مقاوم‌سازی با جاکت فولادی به منظور بهبود مقاومت محوری ستون انتخاب شده‌اند. این طرح‌ها الهام گرفته شده از طرح‌های پیشنهادی بلال و همکاران (۲۰۱۵) است که با هدف افزایش ظرفیت محوری ستون‌های بتن مسلح تحت بارهای استاتیکی استفاده شده است [۲۶]. بنابراین، می‌توان در اینجا اثربخشی این نوع مقاوم‌سازی بر مقاومت انفجاری ستون بتن مسلح را ارزیابی کرد.

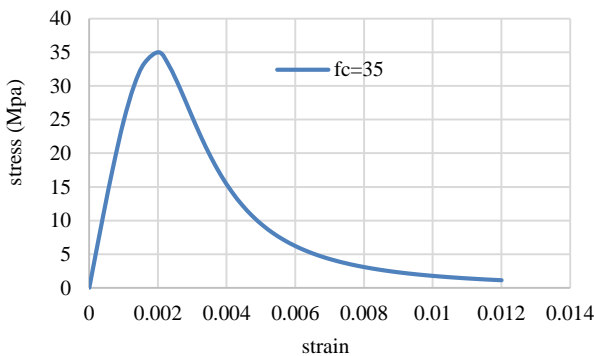


شکل ۲- مدل اجزای محدود میلگردهای طولی و عرضی ستون دایره‌ای.

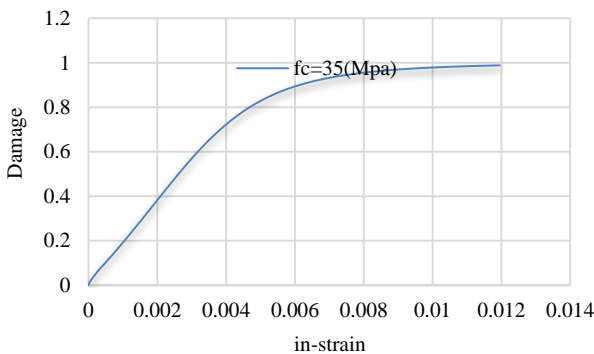


شکل ۳- مدل اجزای محدود میلگردهای طولی و عرضی ستون مربعی.

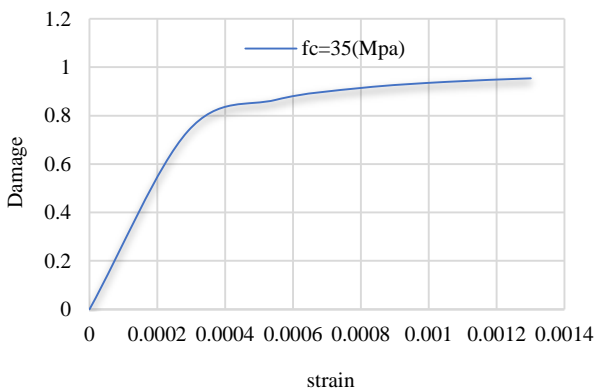
شکل ۴- منحنی تنش - کرنش کششی بتن.



شکل ۵- منحنی تنش - کرنش فشاری بتن.



شکل ۶- مدل آسیب فشاری بتن.



شکل ۷- مدل آسیب کششی بتن.

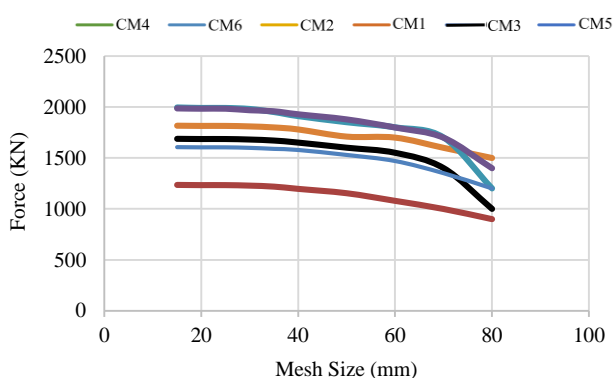
جدول ۱- نامگذاری مدل اجزای محدود ستون‌ها.

CM1	ستون ساده مربعی (تقویت نشده)
CD1	ستون ساده دایره‌ای (تقویت نشده)
CM2	ستون با جاکت فولادی کامل مربعی
CD2	ستون با جاکت فولادی کامل دایره‌ای
CM3	ستون با جاکت فولادی به صورت بست یک طرفه په‌ن مربعی (دارای دو ناودانی)
CD3	ستون با جاکت فولادی به صورت بست یک طرفه په‌ن دایره‌ای
CM4	ستون با جاکت فولادی به صورت بست یک طرفه باریک مربعی (دارای دو ناودانی)
CD4	ستون با جاکت فولادی به صورت بست یک طرفه باریک دایره‌ای
CM5	ستون با جاکت فولادی به صورت بست دو طرفه په‌ن مربعی (دارای چهار نبشی)
CD5	ستون با جاکت فولادی به صورت بست دو طرفه په‌ن دایره‌ای
CM6	ستون با جاکت فولادی به صورت بست دو طرفه باریک مربعی (دارای چهار نبشی)
CD6	ستون با جاکت فولادی به صورت بست دو طرفه باریک دایره‌ای

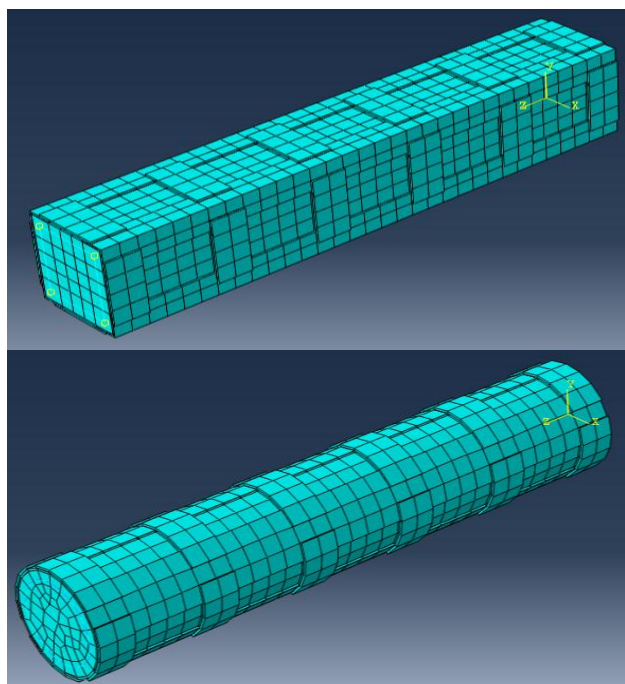
۲-۱- مدل مصالح

به منظور مدل‌سازی رفتار بتن از مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن (CDP) استفاده شده و مدل رفتاری فولاد به صورت الاستیک-پلاستیک فرض شده است. نمودارهای شکل (۷-۴) به ترتیب نشان دهنده منحنی تنش - کرنش فشاری، کششی و مدل آسیب بتن در فشار و کشش است. این نمودارها مربوط به بتن با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال است که به صورت ورودی در ماژول property نرم‌افزار تعریف می‌شوند. در شکل (۸) نیز منحنی رفتاری مصالح فولاد آورده شده است. در اینجا، نمودارهای مربوط به رفتار مصالح بتن و فولاد از مدل پیشنهادی توسط دنگ و همکاران [۲۷] استخراج شده است.

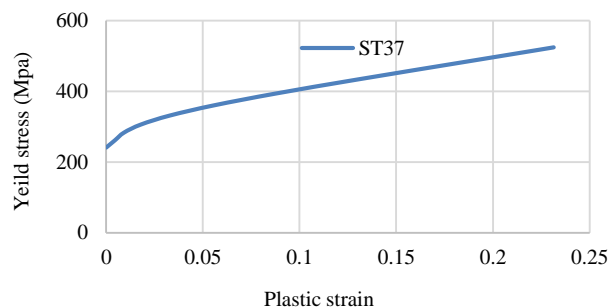
نرم‌افزار معرفی می‌شود. دیاگرام فشار - زمان حاصل از انفجار دارای ویژگی‌های نشان داده شده در شکل (۱۲) خواهد بود. در شکل (۱۲)، بخش A به زمان قبل از رسیدن جبهه موج انفجار اشاره دارد، بخش B اضافه فشار ناگهانی پس از رسیدن موج را نشان می‌دهد. فشار مثبت حاصل از انفجار در C به اتمام رسیده و پس از آن فاز منفی (مکش) در محیط ایجاد می‌شود. در بخش D نیز اثرات انفجار فروکش می‌کند و فشار در محیط به فشار عادی اتمسفر بازمی‌گردد. در انفجار با فواصل مقیاس شده متوسط تا دور ($Z > 1 \text{ m/kg}^{1/3}$) می‌تواند توزیع فشار به روی وجه سازه را یکنواخت فرض کرد [۲۹]. در Zهای کمتر، توزیع مکانی فشار بر وجه سازه موضعی‌تر است و در نزدیکی مرکز انفجار شدت بیشتری دارد. در آیین‌نامه‌های مختلف روش‌های تخمین توزیع زمانی و مکانی فشار انفجار بر وجود مختلف سازه آورده شده است [۲۸، ۳۰ و ۳۱].



شکل ۱۰- تحلیل حساسیت مش‌بندی در ستون‌های مربعی.



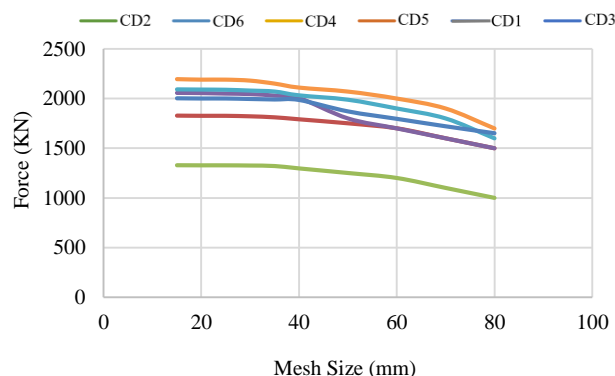
شکل ۱۱- نمونه‌های ستون مش‌بندی شده.



شکل ۸- مدل رفتار پلاستیک فولاد st37.

۲-۲- تحلیل حساسیت مش‌بندی

به منظور دست یافتن به ابعاد بهینه‌ای از مش‌بندی که دقت قابل داشته و زمان محاسبات معقولی نیز داشته باشد، تحلیل حساسیت مش‌بندی انجام شده است. طبق شکل‌های (۹ و ۱۰)، محدوده سایز ۸۰-۱۵ میلی‌متر برای مش‌بندی انتخاب شده با گام‌های (۵ میلی‌متر) و با هر سایز مش‌بندی، مقدار ظرفیت ستون تعیین شده است. مشاهده شده است که تا سایز حدود ۴۰ میلی‌متر اختلاف اندکی در نتایج وجود دارد و برای سایزهای بزرگ‌تر مش‌بندی، این اختلاف زیاد می‌شود. در نتیجه، اندازه ۴۰ میلی‌متر برای مش‌بندی مدل‌ها انتخاب شد. با اندازه مش ۲۵ میلی‌متر، زمان تحلیل مدل‌ها افزایش بسیاری داشت در حالی که اختلاف محاسبات در حدود ۳ الی ۵ درصد بود. به همین دلیل، برای کل نمونه‌ها از سایز مش ۴۰ میلی‌متر برای مش‌بندی استفاده شده است. نمونه‌ای مدل‌های ستون مش‌بندی شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

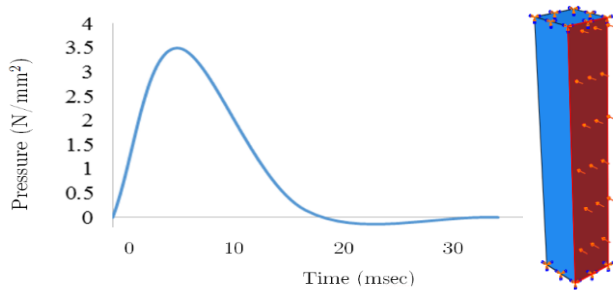


شکل ۹- تحلیل حساسیت مش‌بندی در ستون‌های دایره‌ای.

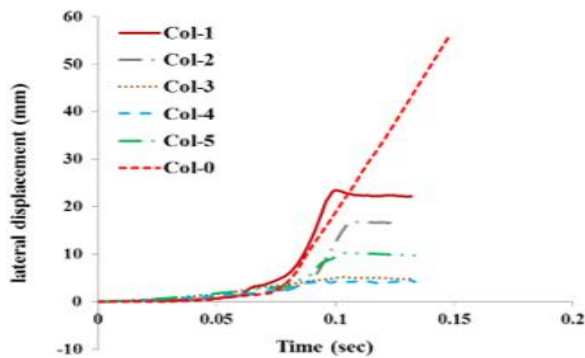
۳- بارگذاری انفجار

بارگذاری انفجار در ABAQUS می‌تواند به روش مستقیم بر اساس روش پیشنهادی در UFC 3-340-02 انجام شود [۲۸]. با توجه به مقدار $Z = \frac{R}{W^{1/3}}$ فاصله مقیاس شده انفجار (که در آن، W وزن خرج معادل TNT و R فاصله روبرویی است)، میزان فشار بازتابی ناشی از انفجار و زمان تداوم آن برآورد شده و نمودار فشار - زمان توسط کاربر به

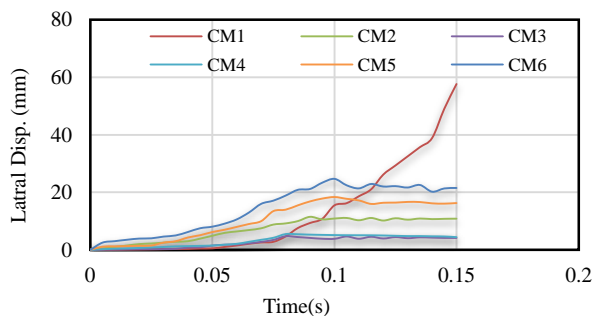
همان طور که در شکل های (۱۵ و ۱۶) مشاهده می شود جابه جایی جانبی محاسبه شده در مقایسه با مرجع مورد نظر تقریب مناسبی دارد. در شکل (۱۷) نیز اختلاف نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج مرجع برای ستون های مربعی نشان داده شده است.



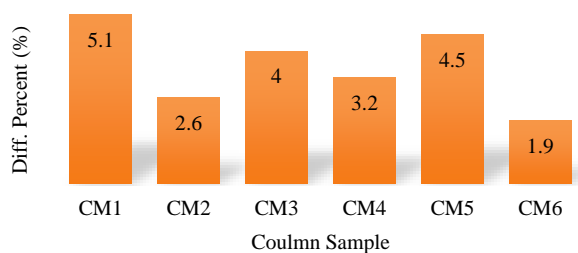
شکل ۱۳- تاریخچه فشار انفجار مورد نظر [۱۷] و تعریف سطح اثر انفجار در ستون مربعی.



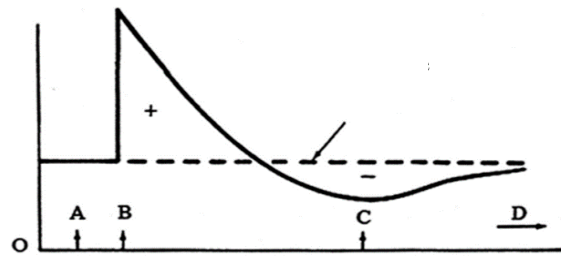
شکل ۱۴- جابه جایی جانبی ستون های مربعی [۱۷].



شکل ۱۵- جابه جایی جانبی ستون های مربعی در اینجا.

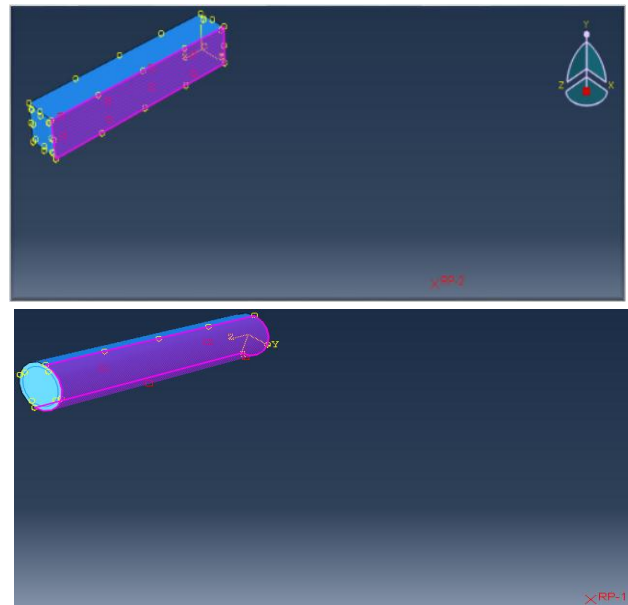


شکل ۱۶- درصد اختلاف نتایج تحلیل با مرجع مورد نظر [۱۷].



شکل ۱۷- دیاگرام فشار - زمان حاصل از موج انفجار [۲۹].

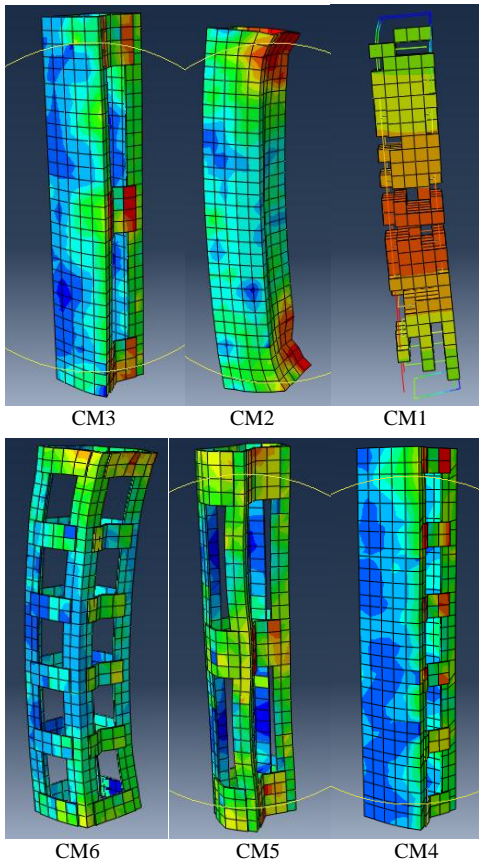
علاوه بر روش فوق، می توان از مدول CONWEP در ABAQUS نیز برای بارگذاری انفجار استفاده کرد [۳۲]. در این حالت، نقطه مرکز انفجار و همچنین سطح اثر فشار حاصل از انفجار بر سازه تعریف شده و با دادن مقدار وزن خرج انفجاری و مشخص کردن نوع انتشار امواج (سطحی، کروی و ...) نرم افزار توزیع فشار - زمان را بر وجه سازه محاسبه می کند (شکل (۱۳)).



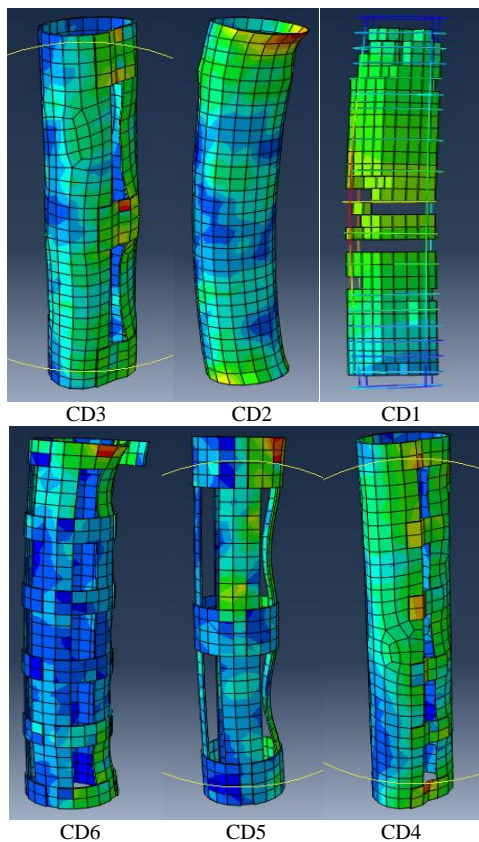
شکل ۱۸- تعریف نقطه انفجار و سطح اثر انفجار بر وجه ستون.

۴- صحت سنجی مدل اجزای محدود

در اینجا، نتایج تحلیل از جای محدود صریح حاصل از نرم افزار ABAQUS با نتایج حاصل از مطالعات اسماعیل نیا عمران و ملایی [۱۷]، که در مورد رفتار ستون های مربعی بتن مسلح مقاوم شده با جاکت فولادی در برابر انفجار انجام شده، مقایسه می گردد. مدل های Col-0 تا Col-5 در مرجع مورد نظر از نظر مشخصات هندسی و مصالح مشابه با مدل های CM1 تا CM6 در این مقاله هستند [۱۷]. این مدل ها تحت بارگذاری انفجار نشان داده شده در شکل (۱۴) تحلیل شده اند. فشار حاصل از انفجار به طور یکنواخت بر وجه رو به انفجار ستون وارد شده است. نمودارهای شکل (۱۵) جابه جایی افقی مرکز ارتفاع ستون (خمیدگی ستون) بر حسب زمان را برای همه مدل ها نشان می دهد.



شکل ۱۸- نمونه‌ای از تغییر شکل ستون‌های مربعی.



شکل ۱۹- نمونه‌ای از تغییر شکل ستون‌های دایره‌ای.

در بخش بعدی مقاله، این روند مدل‌سازی صحت‌سنجی شده جهت بررسی رفتار ستون‌های مربعی و دایره‌ای مورد نظر در اینجا تحت انفجار ۶۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری از بر ستون‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۵- نتایج و بحث

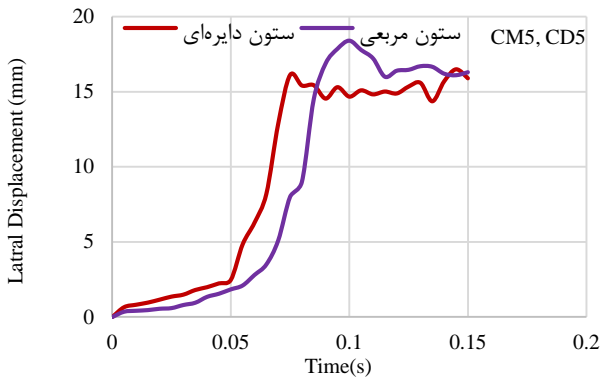
در اینجا، به منظور بررسی بهتر و ساده‌تر نتایج حاصل و مقایسه آن‌ها، برنامه‌ای در متلب نوشته شده است. این برنامه خروجی‌های تحلیل در ABAQUS را به‌طور خودکار به‌عنوان ورودی دریافت کرده و در ابتدا دیگرام نیرو - جابه‌جایی محوری را برای تمام ستون‌ها (قبل از انفجار) ترسیم می‌کند. سپس، پارامترهای ورودی مدل (شامل مقاومت بتن و درصد فولاد) را گام به گام در محدوده مورد نظر تغییر داده و ABAQUS را فراخوانی می‌کند تا تحلیل هر مدل را انجام دهد. برنامه نوشته شده، داده‌های خروجی این تحلیل‌ها را با هم در یک نمودار ترسیم می‌کند تا مقایسه آن‌ها ساده‌تر و گویاتر باشد. همچنین، نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها تحت انفجار نیز توسط این برنامه دریافت شده و نمودارهای جابه‌جایی جانبی مدل‌ها در وسط ارتفاع را ترسیم می‌کند. در شکل (۱۸ و ۱۹) نمونه‌هایی از تغییر شکل به ترتیب در ستون‌های مربعی و دایره‌ای تحت انفجار آورده شده است.

۵-۱- جابه‌جایی جانبی

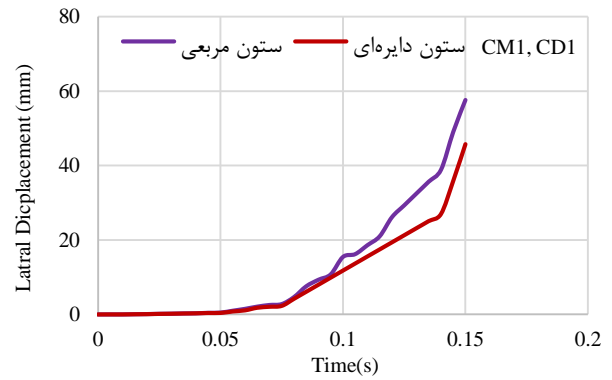
با توجه به نمودارهای شکل (۲۰) مشخص می‌شود که رفتار ستون‌های دایره‌ای و مربعی بدون مقاوم‌سازی، ترد بوده و جابه‌جایی جانبی ستون به‌طور ناگهانی افزایش یافته است. در حالی که، ستون‌های مقاوم‌سازی شده با جاکت‌های فولادی رفتار شکل‌پذیرتری دارند که در شکل‌های (۲۵-۲۱) قابل مشاهده است. ستون‌های دایره‌ای و مربعی دارای جاکت‌های فولادی یک طرفه پهن و باریک بالاترین ظرفیت انفجار جانبی را دارند (شکل‌های (۲۲ و ۲۳)). زیرا، تغییر شکل آن‌ها تحت بارگذاری انفجار دارای کمترین مقدار است. این مقدار برای ستون مربعی در حدود ۵ میلی‌متر و برای ستون‌های دایره‌ای تقریباً ۴ میلی‌متر است.

یکی از علل کمتر بودن جابه‌جایی ستون دایره‌ای در مقایسه با ستون مربعی مشابه می‌تواند در تفاوت توپولوژی آن‌ها باشد. سطح بارگیر انفجار در ستون دایره‌ای کمتر از ستون مربعی است و شکل هندسی ستون‌های دایره‌ای باعث عبور بار انفجار از لبه‌های آن می‌شود.

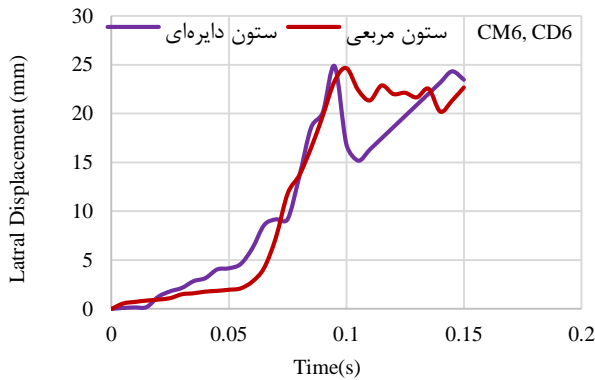
با توجه به شکل (۲۱)، جاکت فولادی کامل نمی‌تواند در کاهش تغییر شکل جانبی تحت انفجار به اندازه جاکت‌های فولادی یک طرفه مؤثر باشد. علت این امر آن است که در اینجا مقطع این دو نوع جاکت معادل با یکدیگر انتخاب شده و به همین دلیل ضخامت جاکت فولادی کامل کاهش یافته است. طبق شکل‌های (۲۴ و ۲۵)، جاکت‌های فولادی دوطرفه کارایی کمتری در کاهش تغییر شکل جانبی نسبت به سایر فرم‌های مقاوم‌سازی دارند که در اینجا بررسی شده است. علت این مسئله می‌تواند تغییر شکل شدید قسمت‌های مختلف جاکت فولادی دارای بست دو طرفه پهن یا باریک باشد.



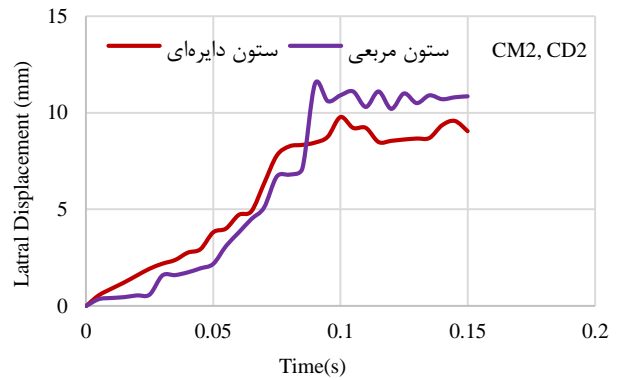
شکل ۲۴- جابه‌جایی جانبی CM5 و CD5.



شکل ۲۰- جابه‌جایی جانبی CM1 و CD1.



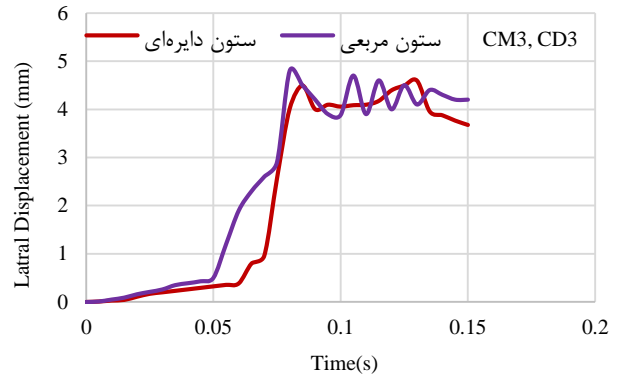
شکل ۲۵- جابه‌جایی جانبی CM6 و CD6.



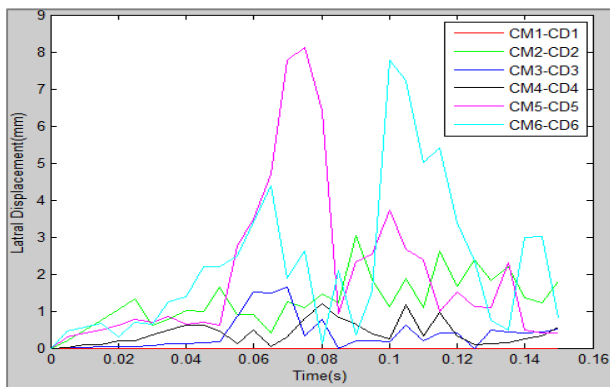
شکل ۲۱- جابه‌جایی جانبی CM2 و CD2.

۲-۵- مقایسه اختلاف جابه‌جایی ستون‌ها

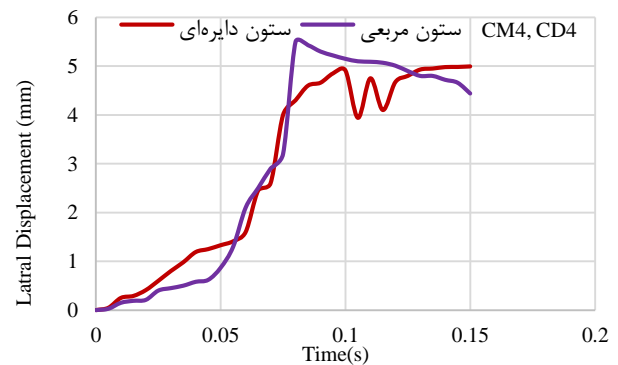
در شکل (۲۶) اختلاف جابه‌جایی میزان جانبی ستون‌های دایره‌ای و مربعی را در طول زمان ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جفت ستون‌های (CD5-CM5) و (CD6-CM6) بیشترین اختلاف جابه‌جایی جانبی یعنی حدود ۸ میلی‌متر و ستون‌های (CD1-CM1) دارای کمترین مقدار اختلاف جابه‌جایی بین ستون‌های دیگر هستند. اصولاً، رفتار ستون‌های بتن مسلح با مقطع مربعی تحت انفجار با رفتار ستون دایره‌ای متفاوت است. می‌توان اظهار کرد که تفاوت در ستون‌های مقاوم‌سازی شده بیشتر نیز می‌شود هر چند که از جاکت‌های فولادی مشابهی استفاده شده باشد.



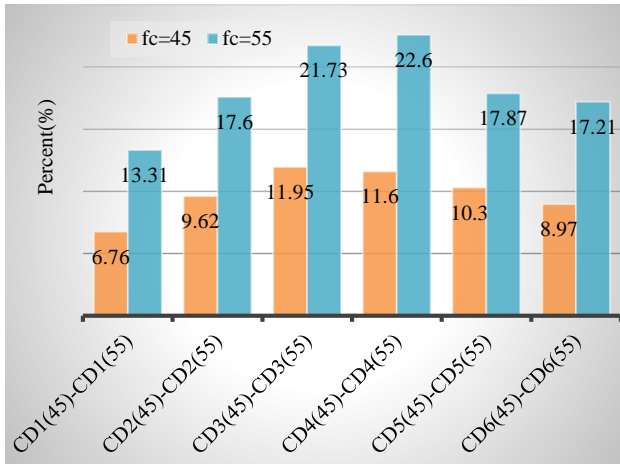
شکل ۲۲- جابه‌جایی جانبی CM3 و CD3.



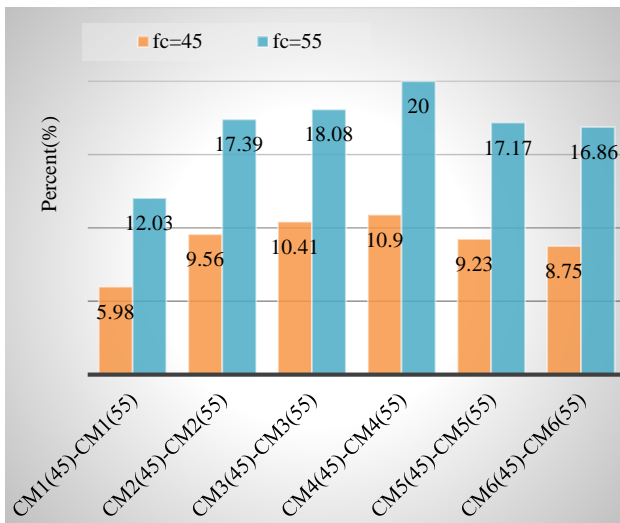
شکل ۲۶- اختلاف جابه‌جایی جانبی ستون‌های دایره‌ای و مربعی.



شکل ۲۳- جابه‌جایی جانبی CM4 و CD4.



شکل ۲۹- درصد کاهش جابه‌جایی جانبی در اثر افزایش مقاومت فشاری ستون دایره‌ای.



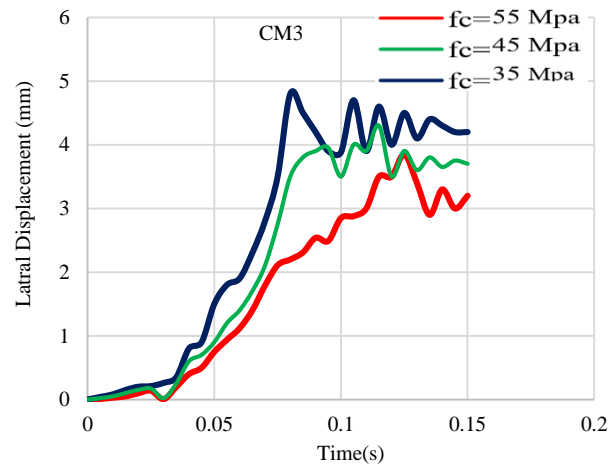
شکل ۳۰- درصد کاهش جابه‌جایی جانبی در اثر افزایش مقاومت فشاری ستون مربعی.

۴-۵- اثر درصد فولاد طولی در جابه‌جایی جانبی

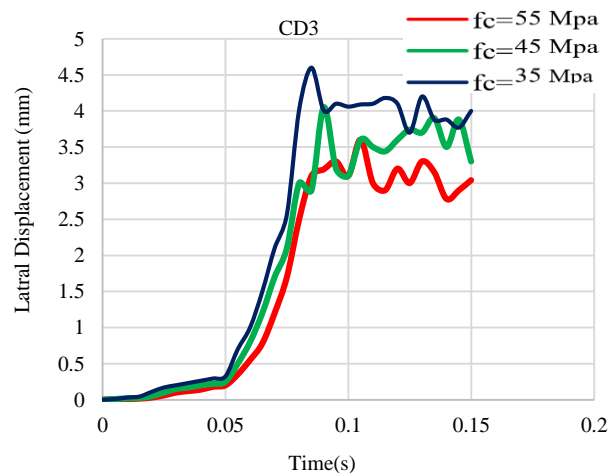
همان‌طور که از نمودارهای شکل (۳۱ و ۳۲) مشخص است با افزایش درصد فولاد طولی (پارامتر f_v) میزان جابه‌جایی جانبی کاهش یافته است. میزان کاهش جابه‌جایی جانبی به ازای هر ۰/۰۱ درصد افزایش در فولاد طولی مقطع، به ترتیب برای ستون‌های دایره‌ای حدود ۸ درصد و برای ستون‌های مربعی تقریباً ۵ است. در شکل (۳۳ و ۳۴) نیز درصد کاهش جابه‌جایی جانبی در اثر افزایش درصد فولاد طولی از ۰/۰۱ به ۰/۰۲ و ۰/۰۳ درصد، در تمامی مدل‌ها نشان داده شده است. در میان مدل‌های ستون دایره‌ای CD3 و CD4 و در ستون‌های مربعی CM3 و CM4 بیشترین کاهش جابه‌جایی جانبی را داشته‌اند. ستون دایره‌ای و مربعی ساده (CD1 و CM1) کمترین کاهش جابه‌جایی را داشته‌اند. بنابراین، افزایش فولاد طولی برای بهبود ظرفیت انفجاری ستون، در حضور جاکت فولادی مؤثرتر است.

۳-۵- اثر مقاومت فشاری بتن در جابه‌جایی جانبی

همان‌طور که از نمودارهای شکل (۲۷ و ۲۸) مشخص است با افزایش مقاومت فشاری بتن (f_c) میزان جابه‌جایی جانبی کاهش یافته است. به ازای هر ۱۰ مگاپاسکال افزایش در مقاومت فشاری بتن در ستون‌های دایره‌ای، جابه‌جایی جانبی حدود ۱۱ درصد و در ستون‌های مربعی تقریباً ۹ درصد کاهش می‌یابد. درصد کاهش جابه‌جایی جانبی، در صورت افزایش مقدار f_c از ۳۵ MPa به مقادیر ۴۵ و ۵۵ مگاپاسکال، برای تمام نمونه‌ها در شکل (۲۹ و ۳۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های (۲۹ و ۳۰) مشخص می‌شود در هر دو نوع ستون دایره‌ای و مربعی مدل‌های نوع ۴ (جاکت فولادی به صورت بست یک طرفه باریک) دارای بیشترین کاهش جابه‌جایی جانبی در انفجار هستند. ستون دایره‌ای و مربعی ساده (CD1 و CM1) کمترین کاهش جابه‌جایی را داشته‌اند. پس می‌توان اظهار کرد که استفاده از جاکت فولادی سبب افزایش مقاومت بخش بتنی مقطع در برابر انفجار می‌شود که این پدیده در اثر افزایش محصوریت بتن روی می‌دهد.



شکل ۲۷- جابه‌جایی جانبی در f_c مختلف در نمونه CM3.



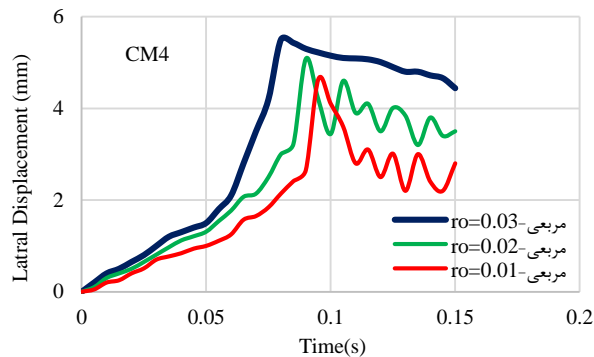
شکل ۲۸- جابه‌جایی جانبی در f_c مختلف در نمونه CD3.

۶- نتیجه گیری

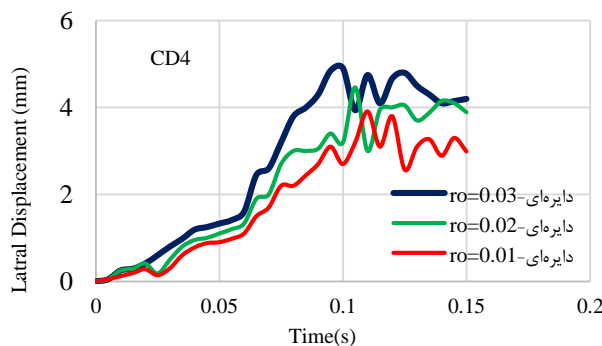
در اینجا، مدل‌های ستون‌های بتن مسلح دایره‌ای و مربعی مقاوم‌سازی شده با یک سری جاکت‌های فولادی، تحت بارگذاری انفجار با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit تحلیل شده‌اند. به‌طور کلی، سطح بارگیر انفجار در ستون دایره‌ای کوچک‌تر از ستون مربعی است و شکل هندسی ستون‌های دایره‌ای باعث عبور بار انفجار از لبه‌های آن می‌شود. در نتیجه ستون دایره نسبت به مربعی، رفتار مطلوب‌تری در انفجار دارد. با توجه به طرح‌های مقاوم‌سازی مطرح شده در اینجا، مقاوم‌سازی ستون با جاکت‌های فولادی می‌تواند عملکرد ستون در برابر انفجار را تا حد بسیار زیادی بهبود دهد. جاکت فولادی کامل نمی‌تواند در کاهش تغییر شکل جانبی تحت انفجار به اندازه جاکت‌های فولادی یک طرفه مؤثر باشد مگر آنکه ضخامت آن افزایش یابد که این امر از نظر شاخص‌های وزن سازه و اقتصادی مقرون به صرفه نیست. افزایش مقاومت فشاری بتن مقطع و همچنین درصد فولاد طولی، بر بهبود رفتار ستون تحت انفجار مؤثر است. این اثر در ستون‌های دایره‌ای مهم‌تر بوده و همچنین وجود جاکت فولادی نیز مقدار این اثربخشی را بیشتر می‌کند. به‌طور کلی از نتایج این مطالعه برمی‌آید که استفاده از جاکت فولادی رفتار انفجاری ستون‌های دایره‌ای و مربعی را تغییر داده و نمی‌توان روند این تغییر رفتار در ستون‌های مربعی را به ستون‌های دایره تعمیم داد. یعنی، هر سامانه مقاوم‌سازی باید به‌طور جداگانه مدل‌سازی و تحلیل شود. در این مطالعه، برنامه‌ای در متلب تهیه شد که استفاده از خروجی‌های تحلیل در نرم‌افزار را بسیار ساده می‌کند. یکی از قابلیت‌های این برنامه ترسیم نمودار نیروی محوری - جابه‌جایی جانبی، برای بررسی ظرفیت محوری پسماند ستون پس از انفجار است.

مراجع

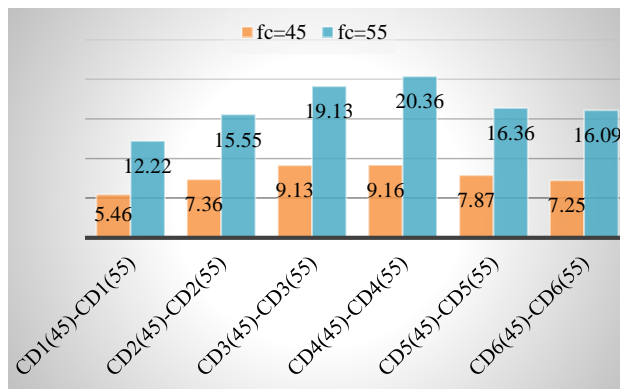
- [1] Corley, W. G.; Mlakar Sr, P. F.; Sozen, M. A.; Thornton, C. H. "The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation"; J. Perform. Constr. Fac. 1998, 12, 100-112.
- [2] Li, J.; Hao, H. "Numerical Study of Structural Progressive Collapse Using Substructure Technique"; Eng. Struct. 2013, 52, 101-113.
- [3] Kazemi-Moghaddam, A.; Sasani, M. "Progressive Collapse Evaluation of Murrah Federal Building Following Sudden Loss of Column G20"; Eng. Struct. 2015, 89, 162-171.
- [4] Shi, Y.; Li, Z. X.; Hao, H. "A New Method for Progressive Collapse Analysis of RC Frames under Blast Loading"; Eng. Struct. 2010, 32, 1691-1703.
- [5] Roller, C.; Mayrhofer, C.; Riedel, W.; Thoma, K. "Residual Load Capacity of Exposed and Hardened Concrete Columns Under Explosion Loads"; Eng. Struct. 2013, 55, 66-72.
- [6] Esameelnia Omran, M.; Mollaei, S. "Assessment of Empirical Formulas for Estimating Residual Axial Capacity of Blast Damaged RC Columns"; Eur. J. Sustainable Development 2017, 6, 383-396.
- [7] Astarlioglu, S.; Krauthammer, T. "Response of Normal-Strength and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Columns to Idealized Blast Loads"; Eng. Struct. 2014, 61, 1-12.



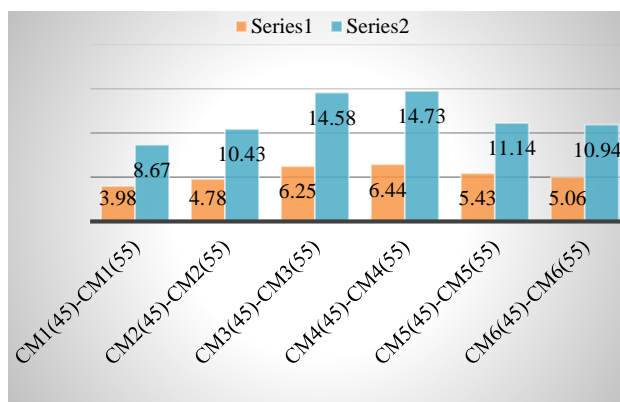
شکل ۳۱- جابه‌جایی جانبی در r_o مختلف برای نمونه CM4.



شکل ۳۲- جابه‌جایی جانبی در r_o مختلف برای نمونه CD4.



شکل ۳۳- درصد کاهش جابه‌جایی جانبی در اثر افزایش درصد فولاد طولی ستون دایره‌ای.



شکل ۳۴- درصد کاهش جابه‌جایی جانبی در اثر افزایش درصد فولاد طولی ستون مربعی.

- [۲۰] ایزدی فرد، رضاعلی؛ پارسیان، طه؛ مؤذن، علیرضا؛ موبدی، احسان "شبیه‌سازی تغییر شکل و تخریب در قاب‌های بتن مسلح توسط مقطع معادل‌سازی شده تحت بار انفجار"؛ تحقیقات بتن، شماره ۵ (۱)، ۶۸-۵۵، ۱۳۹۱.
- [21] Abaqus 6.13 Documentation, <https://things.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqusdocs/docs/v6.12/books/usb/default.htm>. 2013.
- [22] Oswald, C. "Component Explosive Damage Assessment Workbook (CEDAW) Methodology Manual V1.0"; Protective Design Centre U.S. Army Corps of Engineers, BakerRisk Project No. 02-0752-001, 2005.
- [23] Gebbeken, N.; Greulich, S.; Pietzsch, A.; Doege, T. "Interaction of Local and Global Structural Behavior of Buildings under Catastrophic Loadings"; Response of Structures to Extreme Loading Conf., Toronto, 2003.
- [24] Braimah, A.; Contestabile, E. "Blast Vulnerability Assessment: Challenges and Myths, Structures under Extreme Loading"; Proceedings of First International Workshop on Performance, Protection, and Strengthening of Structures Under Extreme Loading, Whistler, 2007.
- [25] Farouk, S. "Near-Field Explosion Effects on Reinforced Concrete Columns: An Experimental Investigation"; Master of Civil Engineering Thesis, Carleton University, Ottawa, 2014.
- [26] Belal, M. F.; Mohamed, H. M.; Morad, S. A. "Behavior of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Steel Jacket"; HBRC J. 2015, 11, 201-212.
- [27] Deng, J.; Liu, C.; Liu, J. "Effect of Dynamic Loading on Mechanical Properties of Concrete"; Adv. Mat. Res. 2012, 568, 147-153.
- [28] U.S. Department of Defense (DOD), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. UFC 3-340-02. Washington: DOD, 2008.
- [29] Cooper, P. W. "Comments on TNT Equivalence"; 20th Int. Pyrotechnics Seminar, Colorado, 1994.
- [30] FEMA (Federal Emergency Management Association), "Designer's Notebook--Blast Consideration"; FEMA Press, 2006.
- [31] U.S. Dept. of Army, the Navy and Air Force "The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; TM 5-1300, Technical Manual, Washington, 1990.
- [32] Hyde, D. User's Guide for Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO, Applications of TM 5-855-1: Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, USA Army Engineers Waterways Experimentation, 1988.
- [8] Aoude, H.; Dagenais, F. P.; Burrell, R. P.; Saatcioglu, M. "Behavior of Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete Columns Under Blast Loading"; Int. J. Impact Eng. 2015, 80, 185-202.
- [9] Crawford, J. E.; Wesevich, J.; Valancius, J.; Reynolds, A. "Evaluation of Jacketed Columns as a Means to Improve the Resistance of Conventional Structures to Blast Effects"; 66th Shock and Vibration Symposium, Biloxi, 1995.
- [10] Fujikura, S.; Bruneau, M. "Experimental Investigation of Seismically Resistant Bridge Piers under Blast Loading"; J. Bridge Eng. 2011, 6(1), DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000124.
- [11] Fouché, P.; Bruneau, M.; Chiarito, V. P. "Modified Steel-Jacketed Columns for Combined Blast and Seismic Retrofit of Existing Bridge Columns"; J. Bridge Eng. 2016, 21, Article ID 04016035.
- [12] Morrill, K. B.; Malvar, L. J.; Crawford, J. E.; Ferritto, J. M. "Blast Resistant Design and Retrofit of Reinforced Concrete Columns and Walls"; Structures Congress, Nashville, 2004.
- [13] Rodriguez-Nikl, T.; Lee, C. S.; Hegemier, G. A.; Seible, F. "Experimental Performance of Concrete Columns with Composite Jackets Under Blast Loading"; J. Struct. Eng. 2012, 138, 81-89.
- [14] Codina, R.; Ambrosini, D.; de-Borbón, F. "Alternatives to Prevent the Failure of RC Members Under Close-In Blast Loadings"; Eng. Fail. Anal. 2016, 60, 96-106.
- [15] Codina, R.; Ambrosini, D.; De-Borbón, F. "New Sacrificial Cladding System for The Reduction of Blast Damage in Reinforced Concrete Structures"; Int. J. Protective Struct. 2017, 8, 221-236.
- [۱۶] ایزدی فرد، رضاعلی؛ قلی‌پور، رضا؛ حاجی‌کریمیان، حامد "بررسی آسیب در تیرهای بتن مسلح زیر بارگذاری انفجاری (آزمایش میدانی و شبیه‌سازی عددی)؛" مجله علمی- پژوهشی مواد پراثرژی، سال دوازدهم، شماره ۱، شماره پیاپی ۳۳، ۴۳-۳۳، ۱۳۹۶.
- [17] Esmailnia Omran, M.; Mollaei, S. "Investigation of Axial Strengthened Reinforced Concrete Columns under Lateral Blast Loading"; Shock Vib. 2017.
- [۱۸] ایزدی فرد، رضاعلی؛ رهبری، رزا "شبیه‌سازی عددی اثر نیروی محوری بر تغییر شکل جانبی ستون بتنی؛" نشریه علمی- پژوهشی علوم و فناوری‌های نوین، سال دهم، شماره ۳، ۲۱۹-۲۱۱، ۱۳۹۸.
- [19] Arlery, M.; Rouquand, A.; Chhim, S. "Numerical Dynamic Simulations for the Prediction of Damage and Loss of Capacity of RC Column Subjected to Contact Detonations"; 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8), Toledo, 2013.