

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال یازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، (پیاپی ۴۲): صص ۸۱-۷۳

"علمی-ترویجی"

اثر مقاوم سازی ستون بتن مسلح با جاکت

فولادی سراسری در بارگذاری انفجار

سمیه ملایی<sup>۱\*</sup>، اسماعیل پاکزاد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

## چکیده

اغلب اثر مخرب انفجار در سازه‌ها به صورت خرابی موضعی اعضای سازه‌ای بوده که می‌تواند با تخریب پیش‌رونده همراه شود. تخریب پیش‌رونده، که سبب تلفات گسترده جانی و مالی در زمان انفجار است، می‌تواند در اثر فروریختن و حذف ناگهانی ستون‌های سازه‌ای تحت فشار مستقیم انفجار روی دهد. بنابراین بررسی پاسخ انفجاری ستون‌ها و مقاوم‌سازی آن‌ها اطلاعات بسیار مفیدی را دربر خواهد داشت. در این پژوهش با یک روند مدل‌سازی صحت‌سنجی شده، ستون بتن مسلح با حل‌گر صریح نرم‌افزار ABAQUS تحت انفجار تحلیل شده و نسبت به تقویت آن با جاکت سرتاسری فولادی به ضخامت‌های ۲/۴ و ۶ اقدام شده است. با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی، پاسخ مدل‌های ستون تقویت شده و تقویت نشده تحت اثر بار از لحاظ مقادیر حداکثر تغییر مکان و انرژی جذب شده انفجار با یکدیگر مقایسه می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با جاکت فولادی، با کاهش تغییر شکل و انرژی رسیده به سازه، عملکرد آن را در برابر بارگذاری انفجار به صورت قابل توجهی بهبود می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** ستون بتن مسلح، بارگذاری انفجاری، مقاوم‌سازی، جاکت فولادی

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بناب، آذربایجان شرقی (s.mollaei@ubonab.ac.ir, mollaei.s@gmail.com) - نویسنده مسئول

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی اشراق بجنورد، ایران

## ۱. مقدمه

در برنامه توسعه هر کشور موضوع دفاع از سرمایه‌های مادی و معنوی در مقابل انواع تهدیدات نظامی، طبیعی و تصادفی، از اولویت‌های راهبردی تلقی می‌شود و در این راه رشته‌های گوناگون علوم مهندسی و انسانی از جمله مفاهیم پدافند غیرعامل می‌توانند مفید واقع شده و نقش مفید و حیاتی داشته باشند. پدافند غیرعامل، به کارگیری مجموعه اقداماتی است تا در صورت بروز هرگونه تهدید، آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ابنیه و تجهیزات حساس به حداقل میزان خود برسد و در این راستا، باور هر چه بیشتر کارشناسان به این امر، می‌تواند ضریب ایمنی کشور در برابر تهاجمات احتمالی نظامی را افزایش دهد.

حملات و اتفاقات سال‌های اخیر بر روی ساختمان‌های بتن آرمه سبب افزایش سطح آگاهی مهندسی در خصوص آسیب‌پذیری سازه‌ها تحت اثرات انفجار شد. به گونه‌ای که این افزایش سطح آگاهی در کشور ما، سبب تدوین مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان [۱] تحت عنوان پدافند غیرعامل گردید. در بررسی سامانه‌های ساختمانی تحت انفجار، قابلیت تغییر شکل، مقاومت، سختی و پایداری سامانه و عملکرد آن در تخریب پیش‌رونده، پارامترهای بسیار مهمی هستند. در ارزیابی این پارامترها برای ساختمان‌های بتنی، می‌توان با تحلیل رفتار ستون بتن مسلح به‌عنوان عناصر باربر کلیدی، در برابر بارگذاری انفجار و تقویت مناسب آن، از تخریب ستون و خرابی پیش‌رونده سازه در انفجار جلوگیری نمود. بنابراین در این تحقیق با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی بر روی یک نمونه ستون بتن مسلح به بررسی نحوه رفتار آن در برابر بار انفجار و مقاومت‌سازی آن پرداخته شده است.

اثر انفجار بر روی اجزای سازه‌ای که به محل انفجار نزدیک‌ترند بیشتر و شدیدتر است. این بدان معنا است که مهم‌ترین نقاط آسیب‌پذیر سازه در مقابل بار ناشی از انفجار اجزای سازه‌ای خارجی (قاب محیطی نزدیک به موج انفجار) هستند و این اجزا بیشتر از قاب‌های سازه‌ای داخلی در معرض تخریب قرار دارند. بارهای ناشی از انفجار در ستون‌های نزدیک محل انفجار ایجاد نیروی برشی به نسبت زیادی نموده که این نیرو در ستون‌های قاب‌های بعد به شدت کاهش می‌یابد [۲]. افزایش تعداد دهانه‌های قاب تأثیر چندانی بر نیروی ایجا شده در ستون‌های ردیف اول (نزدیک محل انفجار) ندارد، اما باعث تغییر مکان کلی قاب می‌گردد. با افزایش تعداد طبقات ساختمان، نیروهای ایجاد شده در ستون‌های طبقات پایین افزایش چندانی نمی‌یابد. بنابراین ساختمان‌های کوتاه به دلیل بالا بودن نیروهای ناشی از انفجار در آن‌ها نسبت به نیروهای طراحی معمولی سازه، در مقایسه با ساختمان‌های بلند دارای آسیب‌پذیری بیشتری در مقابل بارهای ناشی از انفجار خارج از ساختمان می‌باشند.

تحلیل اثر بارگذاری انفجار بر روی سازه‌ها از دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. ارتش آمریکا، نشریه‌ای تحت عنوان «سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجارهای تصادفی» منتشر کرد که ویرایش‌های بعدی این اثر با عنوان TM 5-1300 [۳] و UFC 3-340-02 ارائه گردید [۴]. در حوزه رفتار ستون‌های سازه‌ای تحت انفجار، شی و همکاران [۵]، یک معیار خرابی پیشنهادی بر اساس ظرفیت محوری پسماند برای ستون بتن مسلح تعریف کرده و با استفاده از مدل سازی عددی با نرم‌افزار LS-DYNA به ترسیم و بررسی نمودار فشار - ضربه و پیش‌بینی میزان خسارت ستون‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار پرداختند. باو و لی [۶]، مطالعات پارامتریک به روی ستون‌های بتن مسلح با استفاده از مدل‌سازی عددی در هیدروکد LS-DYNA انجام داده‌اند. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای ستون بتن‌آرمه از قبیل میزان آرماتور مصرفی، میزان بار محوری و ابعاد ستون، بر روی پاسخ سازه تحت اثر انفجار بررسی شد. آن‌ها رابطه‌ای جهت برآورد میزان ظرفیت محوری باقیمانده، بر اساس نسبت جابه‌جایی وسط ستون به ارتفاع ستون، ارائه دادند.

وو و همکاران [۷]، تحقیق مشابهی را با استفاده از تحلیل‌گر اولر-لاگرانژ دلخواه در نرم‌افزار LS-DYNA برای تحلیل پاسخ ستون‌ها تحت انفجار تماسی، انجام دادند. از نتایج حاصل جهت ارزیابی ظرفیت محوری پسماند ستون استفاده شده و اثر پارامترهای مختلف بر مقدار این ظرفیت بررسی شده است. آرلری و همکاران [۸]، اثر انفجار بسیار نزدیک بر ستون‌های بتن مسلح را به وسیله مدل‌سازی اجزای محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS/Explicit انجام دادند و با ارائه فرمولی تجربی میزان خسارت بتن را پیش‌بینی نمودند. در این تحقیق مرکز انفجار بسیار نزدیک به سازه است، که در این حالت پاسخ سازه غالباً موضعی و به صورت فرسایش مقطع ظاهر شده است. آستاری اوکلو و همکاران [۹] به شبیه‌سازی عددی ستون بتنی و بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت ترکیبی از بار محوری و بار عرضی انفجار پرداختند. ایشان یک مدل تک درجه آزادی توسعه یافته برای بررسی رفتار ستون بتن مسلح تحت انفجار معرفی کرده‌اند. لی و هائو [۱۰] به بررسی عددی خرد شدن ستون‌های بتنی تحت بار انفجار پرداختند. در این تحقیق یک مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شد و در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید.

رولر و همکاران [۱۱] مقاومت پسماند یک سری از نمونه‌های کوچک مقیاس ستون بتن مسلح با مقطع دایره‌ای را مطالعه کرده‌اند. اسماعیل نیا عمران و ملایی [۱۲] روابط تجربی برای تخمین ظرفیت پسماند ستون‌های بتن مسلح تحت انفجار را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

در حوزه مطالعه به روی رفتار ستون‌های بتن مسلح در انفجار،

مصالح پلیمری و فیبرهای کربنی و فولادی مد نظر قرار داشته و به جاکت های فولادی کمتر پرداخته شده است. از طرف دیگر، به علت عدم قطعیت‌های موجود در پدیده انفجار و پیچیدگی رفتار مقاطع بتن مسلح تحت اثر بارگذاری انفجار جانبی، نیاز به انجام بررسی‌های بیشتر در این زمینه همچنان به قوت خود باقی است. با توجه به رواج کاربرد جاکت‌ها (پوشش) فولادی در بهبود رفتار ستون‌های بتن مسلح معمولی تحت بارگذاری ثقلی و یا لرزه‌ای، نیاز است که اثر آن بر بهبود رفتار انفجاری ستون نیز بررسی گردد. بنابراین در این تحقیق ستون بتن مسلح ساده و مقاوم‌سازی شده، تحت بارگذاری انفجار قرار گرفته و نقش مقاوم‌سازی آن‌ها با جاکت‌های (پوشش‌های) فولادی سراسری بر کاهش اثرات مخرب انفجار ارزیابی می‌گردد.

### ۱-۱. بارگذاری انفجار

به طور کلی انفجار حاصل آزادسازی بسیار سریع مقدار بسیار زیادی انرژی در واحد حجم است که باعث به وجود آمدن جبهه ای از سیال متراکم در محیط می‌شود و ممکن است با پخش و پراکنده شدن ترکش‌های انفجاری همراه باشد [۲۷]. در انفجار هوایی، امواج انفجار مستقیم به سازه بر خورد کرده و نحوه گسترش آن به صورت کروی است. در صورتی که امواج ناشی از انفجار ابتدا به زمین برخورد کرده و سپس به سازه برسند، انفجار را سطحی گویند. نحوه گسترش امواج در سطح زمین به صورت نیم کره است. انفجار در داخل ساختمان بسته به شرایط ساختمان به دو دسته محبوس و نیمه محبوس تقسیم می‌شود. بهتر آن است که علاوه بر بارهای ناشی از انفجار، اثر اصابت ترکش‌های ناشی از آن و همچنین اثرات لرزش ناشی از شوک زمین حین وقوع انفجار خارجی نیز در نظر گرفته شود [۲۸]. البته در این مطالعه انفجار کروی آزاد مد نظر قرار دارد و از اثر هر نوع ترکش احتمالی صرف نظر شده است.

در ابتدای انفجار، در طول چند هزارم ثانیه، فشار از فشار اتمسفر به فشار بیشینه  $P_{s0}$  می‌رسد (فاز مثبت انفجار). سپس وقتی جبهه ضربه مسافتی را پیمود، در طول چند صدم ثانیه فشار داخل آن با چنان سرعتی کاهش می‌یابد که دوباره به فشار اتمسفر  $P_0$  باز می‌گردد، و در ادامه در طول چند دهم ثانیه فشار منفی  $P_{s0}^-$  ایجاد شده که هوا را می‌مکد. بنابراین این مرحله به نام مرحله (فاز) مکش یا منفی خوانده می‌شود. فشار بیشینه ناشی از انفجار با دور شدن از مرکز انفجار (فاصله رویارویی  $R$ ) به نحو چشم‌گیری کاهش می‌یابد ولی بر خلاف آن زمان تداوم بارگذاری  $t_0$  (زمان اثر بار ناشی از انفجار) با دور شدن از مرکز انفجار افزایش می‌یابد. پارامترهای مختلف مربوط به فشار - زمان حاصل از انفجار در شکل (۱) نشان داده شده است.

خیلی زود نظرات به سمت مقاوم‌سازی این اعضای سازه‌ای و بهبود رفتار انفجاری آن‌ها جلب گردید. کراوفورد [۱۳] مروری بر برخی از روش‌های استفاده از FRP را برای تقویت ستون‌های بتن مسلح تحت اثر بار انفجار و نیروی محوری گزارش کرد. تمرکز این مطالعات بر روی کاربرد FRP در مقاوم‌سازی انفجاری ستون‌ها بوده و دیگر روش‌ها برای اصلاح ستون‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار نگرفت.

کریه و همکاران [۱۴] پوشش‌های SRP را به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای فیبر کربن (CFRP) برای ارتقای عناصر بتن مسلح در برابر انفجار معرفی کرده‌اند. در این مطالعه، مقیاس نمونه‌های مورد مطالعه کوچک بوده است. زو و همکاران [۱۵] در مورد مقاومت انفجاری ستون‌های بتن فوق توانمند (UHPC) با انجام یک سری آزمون‌های میدانی مورد بحث قرار گرفت.

هائو و شی [۱۶] به بررسی تحلیل قابلیت اعتماد ستون‌های بتن آرمه معمولی و تقویت شده با FRP، تحت بارهای انفجاری تصادفی، پرداختند. در مطالعه آن‌ها، ابعاد ستون، میزان آرماتور و مقاومت مصالح با توزیع نرمال و با پارامترهای طراحی به صورت مقادیر میانگین در نظر گرفته شده بود. در کاری دیگر، پاسخ بتن فیبری با عملکرد بالا (UHPFRC) تحت بارگذاری انفجار ایده آل توسط آستارلی‌اوقلو و کروثامر [۱۷] و همچنین آئودی و همکاران [۱۸] مورد آزمایش قرار گرفته است. از طرف دیگر در مطالعات کرافورد و همکاران [۱۹] به مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح با جاکت فولادی پرداخته شده و اثر مثبت این نوع مقاوم‌سازی بر افزایش ظرفیت انفجاری ستون نشان داده شده است.

تعدادی مطالعات آزمایشگاهی نیز به روی رفتار ستون بتن مسلح مقاوم‌سازی شده با انواع جاکت فولادی تحت بارگذاری انفجار انجام شده که در برخی به ستون‌های دایره‌ای [۷ و ۲۰] و در برخی به ستون‌های با مقطع مربعی یا مستطیلی [۲۴-۲۱] پرداخته شده است. در آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توان رفتار واقعی تر اعضای سازه‌ای را بررسی کرد اما هزینه انجام این‌گونه آزمایش‌ها بسیار بالا بوده همچنین امکان ثبت داده‌ها در آن‌ها محدود است. در این راستا، اسماعیل نیا عمران و ملایی [۲۵] بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار انفجاری ستون‌های بتنی مقاوم‌سازی شده را انجام داده‌اند که در آن از رویکرد اجزای محدود صحت‌سنجی شده‌ای استفاده شده است. ایزدی فرد و رهبری [۲۶] رفتار ستون‌های مربعی بتنی با غلاف فولادی CFDST را تحت انفجار بررسی کرده‌اند.

با مروری بر مطالعات انجام شده بر روی ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجار مشاهده می‌شود در اغلب مطالعاتی که به مقاوم‌سازی انفجاری ستون‌های بتنی پرداخته‌اند، استفاده از

آرماتورهای طولی باشد به جای ورق فلزی می‌توان از نوارهای فلزی پیرامونی نیز استفاده نمود. در این تحقیق از جاکت فولادی سراسری برای پوشش ستون بتنی استفاده شده است.

## ۲. مدل‌سازی

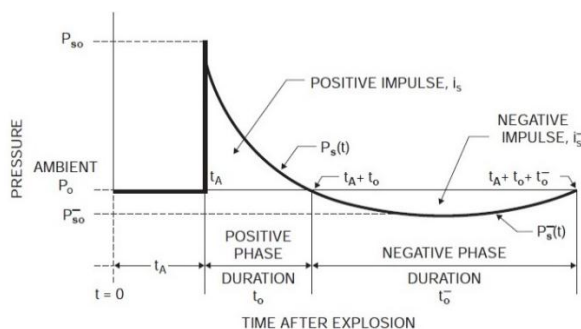
ABAQUS / Explicit محصولی با هدف‌های ویژه برای حل مسائل اجزای محدود است و از روش دینامیکی صریح در حل عددی استفاده می‌کند. این نوع تحلیل برای مسائل دینامیکی شدید مانند برخورد، ضربه، انفجار و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیر خطی که در آن‌ها شرایط تماس تغییر می‌کند، مناسب است. این محصول دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح، به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری جزء تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسائل غیر خطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم‌افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به صورت خودکار محاسبه می‌کند. در اینجا، مدل ستون‌های بتن مسلح با مقطع مستطیلی با و بدون جاکت فولادی تحت بارگذاری انفجار تحلیل می‌شود.

### ۲-۱. مشخصات مصالح و مش‌بندی

#### ۲-۱-۱. بتن

مقاومت فشاری بتن ۳۴/۵ MPa در نظر گرفته شده، چگالی بتن  $2400 \text{ kg/m}^3$ ، مدول الاستیسیته ۲۹ GPa و ضریب پواسون ۰/۲ می‌باشد. برای مدل‌سازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب در آن از مدل خسارت مومسانی بتن<sup>۳</sup> (CDP) استفاده شده که توسط کاریرا و چو [۳۱] ارائه گردیده است. در این مدل، دو عامل اصلی برای خرابی بتن، شامل خرد شدگی فشاری و ترک خوردگی کششی، فرض می‌شود. با استفاده از مفاهیم پلاستیک فشاری و کششی و الاستیک آسیب دیده ایزوتروپیک، رفتار غیر خطی بتن توصیف می‌شود. همچنین جهت تعیین مقادیر تنش و کرنش پلاستیک مورد نیاز در این پژوهش از مدل هاگنستات استفاده شده است.

در مدل پلاستیک آسیب دیده بتن به کار رفته در این پژوهش، مقادیر زاویه اتساع، خروج از محوریت، نسبت  $f_{b0}/f_{c0}$  (نسبت تنش فشاری تسلیم دو جهته به تنش تسلیم فشاری یک جهته)، پارامتر سطح تسلیم  $k$  و پارامتر ویسکوزیته  $\mu$  به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۱۶، ۰/۶۶۷ و ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. در اینجا، پارامترهای مربوط به رفتار مصالح بتن تحت انفجار از مدل پیشنهادی توسط دنگ و همکاران [۳۲] استخراج شده است. جهت مدل‌سازی بتن از المان‌های ۸ گرهی (C3D8R)



شکل (۱): شوک انفجاری حاصل از انفجار ناگهانی [۲۹]

به منظور این که انفجار با خرج‌های مختلف را به نوعی با هم مرتبط سازند از رابطه‌های مقیاس‌سازی (قوانین مقیاس<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود. اساس مقیاس‌سازی، بر اساس تشابه هندسی می‌باشد که مهندسیین اغلب از آن برای مقیاس کردن آزمایش کوچک به یک مدل تمام مقیاس استفاده می‌کنند. یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مقیاس‌سازی‌ها، مقیاس هایپکینسیون-کرانتز<sup>۲</sup> (رابطه ۱) یا ریشه سوم است. برای این که دو انفجار، موج انفجاری برابری داشته باشند باید فاصله آن‌ها متناسب با ریشه سوم مقدار انرژی آزاد شده باشد. یعنی:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $R$  فاصله رویارویی و  $W$  وزن خرج معادل TNT ماده منفجره است.  $Z$  فاصله مقیاس شده است که به عنوان معیار پرکاربرد از شدت بار انفجار وارده به سازه به کار می‌رود. جزئیات بیشتر در مورد بارگذاری سازه‌ها تحت انفجار در مراجع معتبری همانند بحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان ایران [۱] و UFC 3-325 [۴] آورده شده است. در این مطالعه، از مدل CONWEP [۳۰] که براساس توصیه‌های UFC 3-325 تهیه شده استفاده خواهد شد.

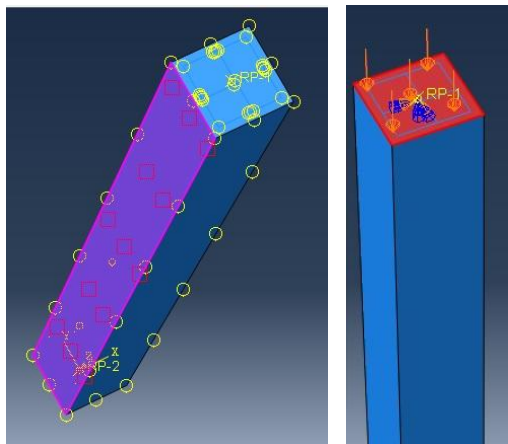
### ۲-۱. مقاوم‌سازی با جاکت‌های فولادی

جاکت فولادی یکی از روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌های بتنی می‌باشد که ضمن افزایش مقاومت و شکل‌پذیری سازه، تأثیر قابل توجهی در وزن ساختمان ندارد. در این روش مقطع ستون در محل‌های آسیب‌پذیر با استفاده از پروفیل‌های فولادی تقویت می‌شوند. در این میان در ساختمان‌ها، تقویت ستون از اهمیت خاصی برخوردار است، چرا که انهدام ستون به فروریختن کلی سازه می‌انجامد. مقاوم‌سازی ستون‌ها با جاکت فولادی بر حسب مورد می‌تواند به صورت دورپیچ، نواری و یا موضعی باشد. در مواردی که هدف از مقاوم‌سازی تنها افزایش مقاومت برشی تیر و یا جبران کمبود خاموت در ستون‌ها برای جلوگیری از کماتش

### ۲-۱-۳. بارگذاری انفجار

وارد نمودن بار انفجار (TNT) به مدل به دو صورت امکان‌پذیر است. در روش اول، می‌بایست بار انفجار را معادل‌سازی و به بار فشاری تبدیل نمود و سپس بر وجه بیرونی مدل اعمال کرد. در روش دوم، می‌بایست مقدار وزن خرج TNT به صورت مستقیم در نرم‌افزار ABAQUS وارد شود و سپس محل انفجار و وجه مورد تأثیر مدل را می‌بایست مشخص نمود. در این پژوهش از روش دوم برای تعریف بار انفجار و اعمال آن به مدل استفاده شده است که روش دقیق‌تری می‌باشد. در این روش از مدول CONWEP [۳۰] در ABAQUS برای بارگذاری انفجار استفاده می‌شود. 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 ...) نرم‌افزار توزیع فشار - زمان را بر وجه سازه محاسبه می‌کند. در نظر گرفتن توزیع مکانی بار انفجار در کنار توزیع زمانی موجب بالا رفتن دقت محاسبات خواهد شد. مطابق با شکل (۳) سطح اثر بارهای وارد بر ستون تعریف شده است.

در اینجا، سطح اثر فشار انفجار فقط وجه رو به انفجار آن در نظر گرفته شده است. فرض بر آن است که این ستون، در طبقه زیرین یک قاب ساختمانی در ضلع بیرونی ساختمان بوده و تحت اثر انفجار آزاد خارج از ساختمان قرار می‌گیرد. این سناریو، یک سناریوی محتمل در حملات تروریستی در مناطق شهری محسوب می‌شود [۳۵ و ۳۶]. در قاب ساختمانی واقعی، دهانه‌های طرفین ستون‌های خارجی توسط دیوارهای محیطی و پرکننده گرفته شده و در نتیجه امواج انفجار فقط به یک وجه ستون برخورد می‌کند.



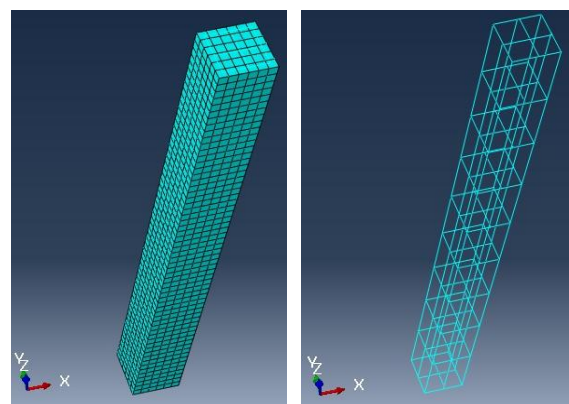
شکل (۳): تعریف سطح اثر بار محوری ۲/۱ MPa (راست) و سطح اثر موج انفجار (چپ) در ستون بتن مسلح

توپر استفاده می‌شود که این نوع المان قابلیت لحاظ کردن تغییر شکل‌های پلاستیک و ترک خوردن در سه جهت متعامد در هر نقطه انتگرال‌گیری را دارا می‌باشد.

### ۲-۱-۲. فولاد

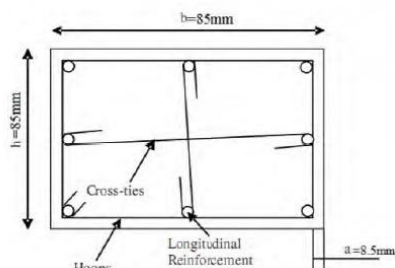
در این مدل چگالی فولاد  $7850 \text{ kg/m}^3$ ، تنش تسلیم و تنش نهایی برای میلگردهای طولی به ترتیب مقادیر  $450 \text{ MPa}$  و  $510 \text{ MPa}$  و برای میلگردهای عرضی به ترتیب مقادیر  $400 \text{ MPa}$  و  $610 \text{ MPa}$  تعریف شده است. مدل رفتاری فولاد به صورت الاستیک-پلاستیک فرض شده که در این مدل رفتار فولاد قبل از رسیدن به تنش تسلیم به صورت کاملاً الاستیک و خطی بوده و پس از آن تا رسیدن به تنش حد گسیختگی به صورت پلاستیک و غیرخطی است.

جهت مدل‌سازی میلگردهای فولادی از المان‌های دو گرهی میله‌ای (B31)، استفاده شده است. استفاده از المان‌های تیر برای میلگردها به دلیل قابلیت انتقال نیرو در خم‌ها می‌باشد، این در حالی است که المان‌های خرپایی این قابلیت را ندارند [۳۳]. در این پژوهش، برای مدل‌سازی اندرکنش بین بتن و میلگردهای طولی و عرضی، از مدل المان‌های مدفون<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش اگر گره‌ای از المان‌های میلگرد در بین المان‌های بتن قرار گیرد، درجات آزادی انتقالی آن گره حذف شده و با استفاده از درجات آزادی گره‌های المان بتن که در مجاور این گره مدفون شده‌اند، محاسبه می‌شود. بنابراین تعداد درجات آزادی در هر گره مدفون شده بستگی به درجه آزادی گره المان بتن در مجاورت آن دارد [۳۴]. در شکل (۲) مدل‌سازی و مش‌بندی مدل ستون بتن مسلح نشان داده شده است.



شکل (۲): شبکه میلگردها (راست) و مش‌بندی (چپ) مدل ستون بتن مسلح

شکل به ابعاد  $900 \text{ mm} \times 850 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$  بوده و دارای ۸ میلگرد طولی به قطر  $3/2 \text{ mm}$  و ۱۰ میلگرد عرضی با قطر  $1/6 \text{ mm}$  به فاصله  $100 \text{ mm}$  می‌باشد. سایر مشخصات لازم در جدول‌های (۲) و (۳) و شکل (۵) آورده شده است.



شکل (۵): آرایش آرماتورها و هندسه ستون مورد آزمایش در مرجع [۵]

جدول (۲): خصوصیات مصالح بتن [۵]

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۰,۲	۲۹۰۰۰	۴۲	۲۴۰۰

جدول (۳): خصوصیات مصالح فولادی ستون بتن مسلح [۵]

ضریب پواسون	E (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	نوع آرماتور
۰,۳	۲۰۰۰۰۰	۵۱۰	۴۵۰	۷۸۵۰	طولی
۰,۳	۲۰۰۰۰۰	۶۱۰	۴۰۰	۷۸۵۰	عرضی

کانتورهای تغییر شکل ستون در اثر انفجار در شکل (۶) آورده شده است. تغییر مکان میانه ستون بتن مسلح در آزمایش شی و همکاران [۵] در مقابل بارگذاری انفجار در فاصله  $1070 \text{ mm}$ ،  $12/5 \text{ mm}$  می‌باشد که منحنی تغییر مکان ستون بتن مسلح مورد آزمایش و تحلیل شده در اینجا در شکل (۷) نشان داده شده است. تغییر مکان میانی مدل ستون بتن مسلح حاصل از تحلیل در اینجا  $13/7 \text{ mm}$  به دست آمده است. همان‌طور که در شکل (۷) نیز نشان داده شده است تطابق مطلوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی دیده می‌شود.

#### ۴. نتایج و بحث

در اینجا روند مدل‌سازی و تحلیل صحت‌سنجی شده برای مقایسه حداکثر تغییر مکان نقطه میانی ستون و تنش در میلگردهای

در این پژوهش ستون‌های مورد نظر تحت دو نوع بار، بار محوری اولیه و بار انفجار بررسی شده‌اند. بار محوری اولیه و ثابت  $2/1 \text{ MPa}$  از همان ابتدای تحلیل به ستون وارد می‌شود. بارگذاری انفجاری به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. در این پژوهش، فاصله ماده منفجره از نمونه برابر  $1/07 \text{ m}$  و به ارتفاع  $229 \text{ mm}$  از سطح زمین قرار داشته و به مقدار  $8 \text{ kg TNT}$  می‌باشد.

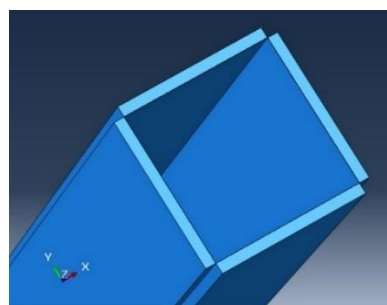
#### ۲-۱-۴. مدل‌سازی جاکت فولادی

برای مدل‌سازی جاکت فولادی از المان shell نوع S4R استفاده شده است که المان پوسته‌ای سه بعدی ۴ گرهی با ۶ درجه آزادی در هر گره می‌باشد [۳۴]. در جدول (۱) مشخصات مصالح جاکت فولادی خلاصه شده است.

جدول (۱): خصوصیات جاکت فولادی

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۰,۳	۲۱۰۰۰۰	۴۴۵	۳۰۸	۷۸۵۰

مدل جاکت فولادی با ابعاد  $85 \times 85 \text{ mm}$  طراحی می‌شود از طرفی چون ضخامت  $2/4 \text{ mm}$  و  $6 \text{ mm}$  جاکت فولادی به ابعاد مدل اضافه می‌شود لازم است سطح مرجع در نرم‌افزار ABAQUS مشخص گردد. بنابراین در این پژوهش سطح مرجع مدل جاکت فولادی Bottom Surface در نظر گرفته شده است تا ضخامت جاکت به سمت بیرون افزایش یابد و تداخلی با ابعاد ستون بتن مسلح  $85 \times 85 \text{ mm}$  نداشته باشد. تصویری از مدل جاکت فولادی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): مدل جاکت فولادی

#### ۳. صحت‌سنجی

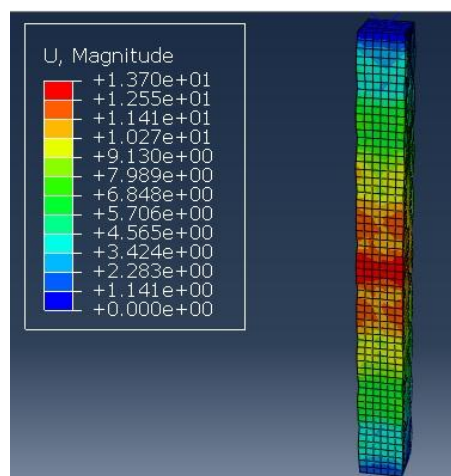
به منظور اطمینان از درستی و صحت بارگذاری انفجار و اطمینان از شیوه انجام کار، مدل آزمایشگاهی ستون بتن مسلح که توسط شی و همکاران [۵] تحت اثر بار انفجار قرار گرفته، در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی می‌شود. این ستون بتن مسلح مربعی

مشاهده می‌شود که مقادیر حداکثر جابه‌جایی در ستون تقویت نشده حاصل از تحلیل به میزان ۹/۶ درصد با نتایج آزمایشگاهی اختلاف دارد. حداکثر تغییر مکان نقطه میانی ستون تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm برابر با ۳/۰۶ mm بوده و برای ستون تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۶ mm برابر ۱/۸ mm است. این امر نشان می‌دهد اثربخشی مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با جاکت فولادی بسیار مؤثر می‌باشد به نحوی که با تقویت ستون با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm حدود ۷۷ درصد تغییر مکان میانی ستون بتن مسلح کاهش پیدا کرده است. در ضمن، تقویت ستون بتن مسلح با جاکت فولادی به ضخامت ۶ mm نیز موجب کاهش تغییر مکان میانه ستون بتن حدود ۸۶ درصد شده است.

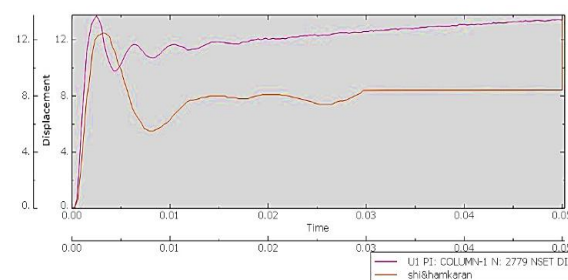
فشار جانبی ناشی از بارگذاری انفجار بر ستون بتن مسلح باعث ایجاد انرژی جنبشی در ستون بتن می‌شود که با توجه به مقدار آن ممکن است موجب آسیب یا تخریب قسمتی از ستون بتن مسلح شود. بنابراین تقویت ستون بتن مسلح با جاکت فولادی، باعث می‌شود بخش زیادی از این انرژی توسط جاکت فولادی جذب شده و آسیب کمتری به ستون بتن مسلح وارد شود. همچنین محاسبه میزان انرژی وارد بر سازه‌ها همواره به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌ها بر پایه انرژی می‌باشد. شکل (۹)، نمودار انرژی جنبشی - زمان برای ستون بتن مسلح مورد نظر در این تحقیق، همان ستون تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و همچنین ستون تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۶ mm در برابر بارگذاری انفجار را نشان می‌دهد.

انرژی جنبشی در حدود ۵۲۶ ژول در ابتدای انفجار به ستون بتن مسلح وارد شده است. برای مدل ستون بتن مسلح تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm انرژی جنبشی در حدود ۱۲۷ ژول در ابتدای انفجار بوده و برای مدل ستون بتن مسلح تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۶ mm انرژی جنبشی در حدود ۹۱ ژول در ابتدای انفجار به ستون بتن مسلح وارد شده است. همان‌طور که در نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود، تقویت ستون بتن مسلح با جاکت فولادی تأثیر بسیار بالایی در جذب انرژی جنبشی ناشی از بار انفجار داشته و باعث می‌شود آسیب کمتری به ستون بتن مسلح وارد شود. به طوری که تقویت ستون بتن مسلح با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm در حدود ۷۵ درصد از انرژی جنبشی وارد به ستون بتن مسلح را جذب نموده است. همچنین تقویت ستون بتن مسلح با جاکت فولادی به ضخامت ۶ mm هم در حدود ۸۳ درصد از انرژی جنبشی وارد به ستون بتن مسلح را کاهش داده است.

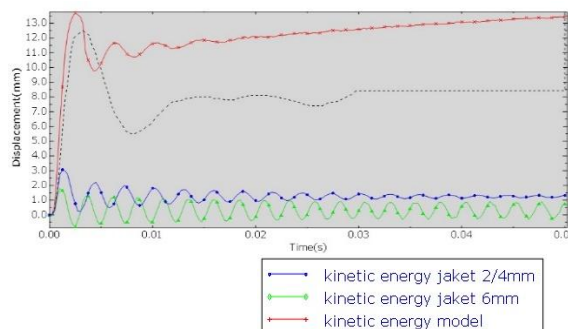
فولادی استفاده شده است. پارامترهایی که برای مقایسه بین رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده و بدون تقویت، مدنظر قرار گرفته‌اند، شامل تغییر مکان نقطه میانی ستون بتن مسلح، انرژی جذب شده و حداکثر تنش در میلگردهای فولادی می‌باشد. در شکل (۸) نمودار تغییر مکان - زمان ستون بتن مسلح در برابر بارگذاری انفجار برای ستون در پژوهش شی و همکاران [۵]، مدل همان ستون در این تحقیق، ستون بتن مسلح تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و همچنین ستون تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۶ mm نشان داده شده است.



شکل (۶): تغییر شکل مدل ستون بتن مسلح در برابر بارگذاری انفجار



شکل (۷): مقایسه منحنی تغییر مکان - زمان پژوهش حاضر با نتایج آزمایشگاهی شی و همکاران



شکل (۸): نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان - زمان نقطه میانی ستون بتن تقویت شده با جاکت فولادی و مدل صحت‌سنجی شده و ستون مرجع

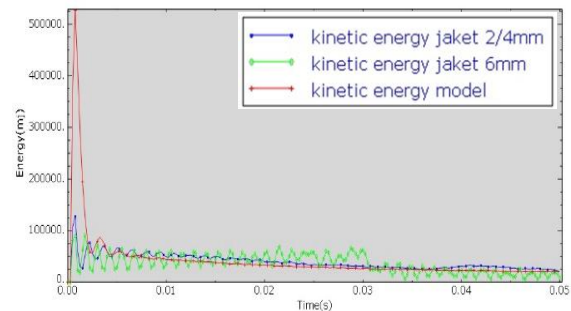


بر بهبود عملکرد ستون بتن مسلح در برابر بارگذاری انفجار دارد و تغییر مکان میانی ستون بتن مسلح را به شدت کاهش می‌دهد. به طوری که، تقویت مدل ستون بتن مسلح با جاکت‌های فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶، به ترتیب ۷۷ درصد و ۸۶ درصد موجب کاهش تغییر مکان در میانه ارتفاع ستون بتن مسلح شده‌اند.

- بدیهی است افزایش ضخامت جاکت فولادی، منجر به کاهش تغییر مکان بیشتر ستون بتن مسلح خواهد شد اما این کار موجب افزایش وزن سازه و هزینه می‌گردد.
- تقویت مدل ستون بتن مسلح با جاکت‌های فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶، به ترتیب ۷۵ درصد و ۸۳ درصد موجب کاهش انرژی جنبشی ناشی از انفجار وارده به ستون بتن مسلح شده‌اند.
- تقویت مدل ستون بتن مسلح با جاکت‌های فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶، به ترتیب ۸۷ درصد و ۷۶ درصد موجب کاهش انرژی اتلافی پلاستیک ناشی از انفجار وارده به ستون بتن مسلح شده‌اند.
- کاربرد پوشش‌های فولادی در پارامترهای انرژی داخلی سازه و مقادیر اتلاف انرژی سازه با تغییر شکل‌های پلاستیک نقش به‌سزایی در بهبود عملکرد سازه تحت بار انفجار داشته است.

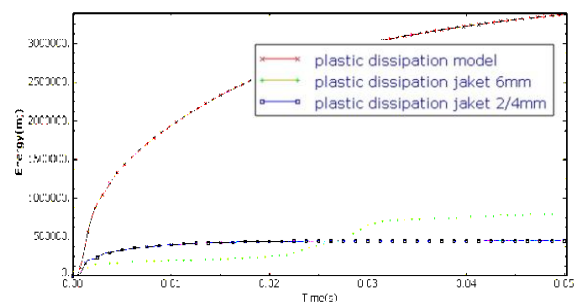
## ۶. منابع

1. Road, "Housing and Urban Development Research Center, Department of Rules and Regulations Compilation," Iranian National Building Code 21: Passive Defense, 1395. (In Persian)
2. M. Esmacil-Nia and S. Mollaie, "Estimation of RC Columns' Behavior under Blast Loading," Passive Defense Quarterly, vol.8, no.4, pp. 29-37, Winter 1396. (In Persian)
3. U. S. Army, U. S. Navy, and U. S. A. Force, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions," TM5-1300, p. 1400, 1990.
4. Unified Facilities Criteria (UFC 3-325-52), "Structure to Resist the Effects of Accidental Explosion," U. S. Army Corps of Engineers, 2009.
5. Y. Shi, H. Hao, and Z. X. Li, "Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Loads," Int. J. Impact Eng., vol. 32, no. 5, pp. 1213-1226, 2008.
6. X. Bao and B. Li, "Residual strength of Blast Damaged Reinforced Concrete Columns," Int. J. Impact Eng., vol. 37, pp. 295-308, 2010.
7. K.C. Wu, B. Li, and K. C. Tsai, "The Effects of Explosive Mass Ratio on Residual Compressive Capacity of Contact Blast Damaged Composite Columns," J. Constr. Steel. Res., vol. 67, pp. 602-612, 2011.
8. M. Arlery, A. Rouquand, and S. Chhim "Numerical Dynamic Simulations for the Prediction of Damage and Loss of Capacity of RC Column Subjected to Contact



شکل (۹): نمودار مقایسه‌ای انرژی جنبشی- زمان در ستون بتن مسلح بدون تقویت و تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶

یکی دیگر از موارد تأثیرگذاری که برای میزان خرابی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، انرژی پلاستیک است که در اثر ایجاد مفصل‌های پلاستیک، توسط مصالح سازه جذب می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مدل‌های ستون بتن مسلح تقویت شده با جاکت‌های فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶، با جذب انرژی بیشتر ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. به طوری که انرژی که در اثر ایجاد مفصل‌های پلاستیک توسط مصالح مدل ستون بتن مسلح تقویت نشده جذب شده مقدار ۳۳۷۵ ژول می‌باشد و انرژی جذب شده توسط مصالح مدل ستون بتن مسلح تقویت شده با جاکت فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶، به ترتیب مقدار ۴۵۱ و ۷۹۶ ژول می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه‌ای انرژی اتلافی پلاستیک- زمان برای مدل‌سازی ستون بتن مسلح بدون تقویت و تقویت شده با جاکت‌های فولادی به ضخامت ۲/۴ mm و ۶

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد ستون‌های بتن مسلح بدون تقویت و تقویت شده با جاکت فولادی در برابر بارگذاری انفجار با استفاده از پکیج نرم‌افزاری اجزای محدود صریح ABQUS/Explicit مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، موارد زیر قابل بیان است:

- مقاومت‌سازی با استفاده از جاکت فولادی، تأثیر قابل توجهی



23. R. Codina, D. Ambrosini, and F. de-Borbón, "Alternatives to Prevent the Failure of RC Members under Close-In Blast Loadings," *Eng. Fail Anal.*, vol. 60, pp. 96-106, 2016.
24. R. Codina, D. Ambrosini, and F. De-Borbón, "New Sacrificial Cladding System for The Reduction of Blast Damage in Reinforced Concrete Structures," *Int. J. of Protective Structures*, vol. 8, pp. 221-236, 2017.
25. M. Esmailnia Omran and S. Mollaei, "Investigation of Axial Strengthened Reinforced Concrete Columns under Lateral Blast Loading," *Shock Vib.*, ID. 3252543, 2017.
26. R. A. Izadifard and R. Rahbari, "Numerical Simulation of the Axial Load Effects on Lateral Deformation of Concrete Filled Double Skin Steel Tubular under Blast Loading," *Advanced Defense Sci. & Tech*, vol. 04, pp. 211-219, 2019 (In Persian).
27. M. Y. H. Bangash and T. Bangash, "Explosion – Resistant Buildings: Design, Analysis. and Case Studies," Springer, New York, 2006.
28. H. Draganic', D. Varevac, and S. Lukic, "Overview of Methods for Blast Load Testing and Devices for Pressure Measurement," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 2018, ID. 3780482, 2018.
29. O. D. Dusenberry, "Handbook for Blast-Resistant Design of Buildings," John Wiley & Sons Inc., Canada, 2010.
30. D. Hyde, "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.
31. J. D. Carreir and K. H. Chu, "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression," *ACI Struct. J.*, pp. 82-72, 2011.
32. J. Deng, C. Liu, and J. Liu, "Effect of Dynamic Loading on Mechanical Properties of Concrete," *Adv. Mat. Res.*, vol. 568, pp. 147-153, 2012.
33. P. Kmiecik and M. Kamiński, "Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Degradation Taken into Consideration," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 11, pp. 623-636, 2011.
34. Abaqus 6.13 Documentation, <http://129.97.46.200:2080/v6.13>. 2013.
35. S. Lan, J. E. Crawford, and K. B. Morrill, "Design of Reinforced Concrete Columns to Resist the Effects of Suitcase Bombs," *Proc. of 6th Int. Conf. on Shock and Impact Loads on Structures*, pp. 5-10, Australia, 2005.
36. FEMA 452, "Risk Assessment: A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings," FEMA, 2005.
9. S. Astarlioglu, T. Krauthammer, D. Morency, and T. Tran, "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Combined Effects of Axial and Blast-Induced Transverse Loads," *Eng. Struct.*, vol. 55, pp. 26-34, 2013.
10. J. Li and H. Hao, "Numerical Study of Concrete Spall Damage to Blast Loads," *Int. J. Impact. Eng.*, vol. 68, pp. 41-55, 2014.
11. C. Röller, C. Mayrhofer, W. Riedel, and K. Thoma, "Residual Load Capacity of Exposed and Hardened Concrete Columns Under Explosion Loads," *Eng. Struct.*, vol. 55, pp. 66-72, 2013.
12. M. Esmailnia-Omran and S. Mollaei "Assessment of Empirical Formulas for Estimating Residual Axial Capacity of Blast Damaged RC Columns," *European J. of Sustainable Development*, vol. 6, no. 3, pp. 383-396, 2017.
13. J. E. Crawford, "State of the Art for Enhancing the Blast Resistance of Reinforced Concrete Columns with Fiber-Reinforced Plastic," *Can. J. Civil. Eng.*, vol. 40, no. 11, pp. 1023-1033, 2013.
14. M. Carriere, P. J. Heffernan, R. G. Wight, and A. Braimah, "Behaviour of Steel Reinforced Polymer (SRP) Strengthened RC Members under Blast Load," *CAN J. Civil. Eng.*, vol. 36, no. 8, pp. 1356-1365, 2009.
15. J. Xu, C. Wu, H. Xiang, Y. Su, Z.X. Li, Q. Fang, H. Hao, Z. Liu, Y. Zhang, and J. Li, "Behaviour of Ultrahigh Performance Fiber Reinforced Concrete Columns Subjected to Blast Loading," *Eng. Struct.*, vol. 118, pp. 97-107, 2016.
16. H. Hao, Z. X. Li, and Y. Shi, "Reliability Analysis of RC Columns and Frame with FRP Strengthening Subjected to Explosive Loads," *J. Perform. Constr. Fac.*, vol. 30, no. 2, 04015017, 2015.
17. S. Astarlioglu and T. Krauthammer, "Response of Normal-Strength and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Columns to Idealized Blast Loads," *Eng. Struct.*, Vol. 61, pp. 1-12, 2014.
18. H. Aoude, F. P. Dagenais, R. P. Burrell, and M. Saatcioglu, "Behavior of Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete Columns Under Blast Loading," *Int. J. Impact. Eng.*, vol. 80, pp. 185-202, 2015.
19. J. E. Crawford, J. Wesevich, J. Valancius, and A. Reynolds, "Evaluation of Jacketed Columns as a Means to Improve the Resistance of Conventional Structures to Blast Effects," 66th Shock and Vibration Symposium, Biloxi, 1995.
20. S. Fujikura and M. Bruneau, "Experimental Investigation of Seismically Resistant Bridge Piers under Blast Loading," *J. Bridge Eng.*, vol. 6, no. 1, 2011.
21. P. Fouché, M. Bruneau, and V. P. Chiarito, "Modified Steel-Jacketed Columns for Combined Blast and Seismic Retrofit of Existing Bridge Columns," *J. Bridge Eng.*, vol. 21, no. 7, 2016.
22. T. Rodriguez-Nikl, C. S. Lee, G. A. Hegemier, and F. Seible, "Experimental Performance of Concrete Columns with Composite Jackets under Blast Loading," *J. Struct. Eng.*, vol. 138, no. 1, pp. 81-89, 2012.

