

بررسی عملکرد ستون‌های بتنی مقاوم‌سازی شده با صفحات FRP تحت اثر بارگذاری انفجاری

مجتبی حسینی^{۱*}، پویا حسونند^۲، علیرضا نصیری شرفی^۳

۱- دانشیار، ۳- کارشناس ارشد دانشگاه لرستان، ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه بوعلی سینا همدان
(تاریخ وصول: ۹۹/۰۳/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۴)

چکیده

در این تحقیق، تأثیر ورق‌های FRP بر عملکرد خمشی و برشی ستون‌های بتنی یک سازه در برابر انفجار مورد بررسی قرار گرفته و شدت انفجار ایمن با استفاده از انفجار با شدت‌های مختلف و در فواصل گوناگون تعیین شده است. به منظور ارزیابی عملکرد ستون‌های بتنی در برابر انفجار و تأثیر تقویت برشی آن‌ها توسط صفحات FRP، ستون مربع شکل با ابعاد مشخص مقطع و با ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شده است. ستون مذکور تحت انفجار ۸۲ کیلوگرم TNT در فواصل مختلف از ستون قرار گرفته و تحلیل شده است. ستون بتنی با استفاده از صفحات FRP به صورت غلاف کامل تقویت شده و نتایج مقایسه شدند تا اثر تقویت بر عملکرد ستون بتنی در برابر انفجار بررسی شود. در ادامه با مدل‌سازی ساختمان بتنی ۵ طبقه و در دو حالت بدون و با تقویت صفحات FRP در انتهای ستون و چشمه اتصال سعی گردیده با کنترل برش در این مناطق عملکرد ساختمان بتنی را بهبود بخشید. نتایج نشان می‌دهند استفاده از صفحات FRP در ستون بتنی تحت بارگذاری انفجاری باعث می‌شود جابه‌جایی افقی کاهش محسوسی پیدا کرده و این کاهش در فواصل نزدیک‌تر، بیشتر است. به طوری که در فواصل ۲/۵، ۵ و ۱۰ متری از خرج انفجاری به ترتیب با کاهش ۵۲/۶، ۳۲ و ۳۱ درصدی جابه‌جایی افقی روبه‌رو می‌شوید. همچنین استفاده از FRP موجب می‌گردد تا مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از انفجار به صورت خرابی سازه اتلاف گردد.

واژه‌های کلیدی: ستون بتن مسلح، اتصالات، تقویت برشی، بارگذاری انفجاری، پوشش FRP.

Investigating the Performance of Reinforced Concrete Columns with FRP Plates under Blast Loading

M. Hosseini*, P. Hassnavand, A. N. Sharafi

University of Lorestan

(Received: 06/13/2020, Accepted: 10/05/2020)

Abstract

In this research, the effect of FRP sheets on the flexural and shear performance of concrete columns of a structure against explosion has been investigated and strength and shear performance of concrete columns reinforced with FRP sheets against explosive loads is evaluated. In order to evaluate the performance of concrete columns against explosion and the effect of their shear reinforcement by FRP sheets, a square column with specific cross-sectional dimensions and a height of 3 meters has been considered. The column was subjected to an explosion of 82 kg of TNT at different distances from the column and was analyzed. The concrete column was reinforced with full sheath using FRP sheets and the results were compared to investigate the effect of reinforcement on the performance of the concrete column against explosion. Then, by modeling a 5-storey concrete building and in two modes without and by reinforcing FRP sheets at the end of the column and the connection fountain, we tried to improve the performance of the concrete building by controlling the shear in these areas. The results show that the use of FRP plates in the concrete column under explosive loading causes a significant reduction in horizontal displacement. This reduction is greater at closer distances, so that at 2.5, 5 and 10 meters distance from the explosive charge, a decrease of 52.6%, 32% and 31% of horizontal displacement have been observed, respectively. Also, the use of FRP causes a large amount of kinetic energy due to the explosion to be wasted in the form of structural damage.

Keywords: Reinforced Concrete Columns, Connections, Shear Reinforcement, Explosive Loading, FRP Coating.

۱- مقدمه

عملکرد تقویت برشی ستون‌های بتنی دارد. تأثیر استفاده از آن بر عملکرد ستون بتنی در برابر انفجار چگونه است و میزان بهبود عملکرد محاسبه و ارزیابی گردد. بنابراین سعی بر آن است که با دستیابی به نتایج این تحقیق گامی مؤثر در جهت بهبود عملکرد برشی ستون‌های بتنی برداشته شود.

در مورد تأثیر امواج ناشی از انفجار بر روی سازه‌ها تحقیقات وسیعی انجام شده است که در ادامه به مرور برخی از پژوهش‌های گذشته پرداخته می‌شود.

لوسپونی و لگو [۵] به بررسی رفتار دال‌های روسازی بتنی تحت بارهای انفجار پرداختند. هدف از انجام آزمایش سنجش میزان خرابی و ترک‌های احتمالی در روسازی‌های بتنی بر اثر بار شوک ناشی از انفجار در بالای آن بود. همچنین دو روش برای تحلیل مسئله انفجار بر روی دال‌های بتنی عرضه شد. امکان استفاده از مصالح کامپوزیت جدید برای بهبود ظرفیت مقاومت در برابر انفجار دال‌های بتن مسلح یک‌طرفه مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور دستیابی به این هدف ۵ دال تحت بارهای انفجار واقعی مورد آزمایش قرار گرفت. یکی از دال‌ها به‌عنوان واحد کنترل در نظر گرفته شد. تا خط مبنایی را برای مقایسه ۴ دال دیگر ایجاد کند. این ۴ دال با الیاف کربن و پلیمرهای مسلح شده با

الیاف فولاد مقاوم شدند که ۲ دال از یک‌طرف اصلاح شده و ۲ دال دیگر از هر دو طرف اصلاح شدند. نتایج آزمایش نشان داد زمانی که دال‌ها از یک‌طرف اصلاح شوند افزایش قابل توجه مقاومت در برابر انفجار مشاهده نمی‌شود با وجود این در دال‌هایی که از دو طرف اصلاح می‌شوند افزایش قابل توجهی در مقاومت در برابر انفجار مشاهده می‌شود. مسالم و همکاران [۶] مدل‌های عددی را با استفاده از روش المان محدود برای تحلیل اجزای غیرخطی دال‌های بتنی مسلح شده که در معرض بارگذاری انفجار قرار می‌گیرند، مطرح کردند. این مدل‌ها به‌منظور بررسی پارامترهای متفاوت از جمله مدت‌زمان بارگذاری و اثر اصلاح CFRP بر تراکم آسیب، مورد استفاده قرار گرفتند. نمایش محلی آسیب برحسب کرنش‌های فولاد تقویتی مورد بحث قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در زمانی که از سامانه اصلاح با کامپوزیت CFRP استفاده می‌شود، ظرفیت تحمل بار تا ۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد. به‌علاوه، حداکثر جابه‌جایی با اصلاح CFRP، در مقایسه با دال ساخته‌شده بدون اصلاح، از ۴۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. رفتار دال اصلاح شده با CFRP زمانی که هر دو طرف دال اصلاح می‌شود، بهترین وضعیت را داشت. جین وون و همکارانش [۷] مقاومت در برابر انفجار دال‌های بتن مسلح اصلاح شده GFRP را با استفاده از برنامه LS-DYNA مورد تحلیل قرار دادند. همچنین کارایی سامانه اصلاح شده با GFRP به‌وسیله مقایسه نتایج تحلیل برای دال‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده، مورد ارزیابی قرار گرفت و کارایی دال اصلاح شده با الیاف مسلح پلیمری را اثبات کردند. نمونه مورد آزمایش در این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است. وو و همکاران [۸]، ۶ دال را مطابق

امروزه بحث پدافند غیرعامل و افزایش انعطاف‌پذیری و مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار، برخورد و ضربه یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های سازمان‌های دولتی در سراسر دنیا از جمله ایران است. از جمله سازه‌های حیاتی که باید پدافند غیرعامل را در مورد آن‌ها رعایت کرد می‌توان به ساختمان‌های دولتی، بانک‌ها، پل‌ها، ساختمان‌های نظامی، تأسیسات شهری، سفارت‌خانه‌ها و ... اشاره کرد. علاوه بر انفجارهایی که عامل انسانی دارند، انفجارهایی که ناشی از وقوع حادثه در نیروگاه، پتروشیمی و ... نیز هستند، جای نگرانی فراوانی دارند. در چنین شرایطی باید اطمینان لازم را پیدا کرد که حداقل قسمت‌های حیاتی سازه همچون اتاق کنترل کماکان پس از وقوع حادثه نیز به فعالیت خود ادامه دهند، بنابراین سازه باید انعطاف‌پذیری مناسبی در برابر انفجار و برخورد و ضربه داشته باشد. همچنین توجه به موضوع خرابی پیش‌رونده در سال‌های اخیر باعث پرننگ‌تر شدن اهمیت مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای ناگهانی مانند انفجار شده است. این در حالی است که اکثر سازه‌های موجود مقاومت و شکل‌پذیری کافی در برابر انفجار و برخورد و ضربه را ندارند [۱].

ستون‌ها از اعضای مهم سازه‌ای هستند که می‌بایست توانایی مقاومت در برابر بارها و نیروهای مختلف را دارا باشند از این رو می‌بایست همواره در سازه اهتمام ویژه‌ای به ستون‌هایی که مستعد خرابی هستند، داشت تا بتوان از وقوع خرابی‌ها جلوگیری به عمل آید. از جمله مواردی که ستون‌ها در آن مستعد خرابی هستند، بحث طبقه نرم است. معمولاً در سازه‌هایی که طبقه اول آن‌ها به‌عنوان پارکینگ استفاده می‌شود یا در تالارها یا فروشگاه‌هایی که به دلیل ایجاد فضای بیشتر برخی از دیوارها حذف می‌شوند که همین امر سبب می‌گردد که سختی طبقه کاهش یابد و طبقه نرم ایجاد گردد. یکی دیگر از انواع ستون‌هایی که ممکن است در معرض خرابی و به‌ویژه شکست‌های برشی قرار گیرد و نیاز به مقاوم‌سازی داشته باشد، ستون‌های کوتاه هستند، ستون‌های کوتاه به ستون‌هایی اطلاق می‌شود که نسبت ارتفاع به حداقل بعد مقطع آن کمتر از ۳ و بیشتر از ۱۲ نباشد. این ستون‌ها با توجه به طول کوتاه و عملکرد برشی می‌توانند با توجه به تحمل بارهای برشی زیاد دچار گسیختگی برشی شوند. بنابراین تقویت آن‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۲].

امروزه محبوبیت پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) به‌عنوان یک راه‌حل نوین در حال افزایش است. تاکنون از FRP در موارد مختلف استفاده شده است اما استفاده رایج از آن برای تقویت ستون‌های بتنی، المان‌های سازه‌ای پل‌ها به‌صورت فابریک‌های کامپوزیت نصب خارجی یا ژاکت بر روی تیرها و ستون‌ها است که موجب حصول مقاومت فشاری، برشی و خمشی مناسب می‌گردد [۳ و ۴]. حال مسئله این است که استفاده از ورق‌های FRP چه تأثیری روی

در دو فاصله مقیاس شده متفاوت توسط مدل بارگذاری انفجار ConWep شبیه‌سازی شده و بر روی مدل سازه‌ای مورد بررسی اثر داده شدند. با توجه به نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده و تحلیل‌های غیرخطی صورت گرفته مشخص شد، انرژی کرنش با کوچک‌تر شدن فاصله مقیاس شده افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از صفحات FRP با ضخامت اختیاری و اثر آن بر افزایش عملکرد، مقاومت سازه در برابر بارهای ناشی از انفجار را بهبود می‌بخشد. ملیس و همکاران [۱۴] بر روی حفاظت از ستون‌های بتن مسلح در برابر انفجار به وسیله نوارهای نازک از جنس GFRP به صورت سرتاسری تحقیقاتی را انجام دادند. ستون‌های بتنی در مقیاس مدل تحت بارگذاری انفجاری ناشی از خرج TNT در نزدیکی نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفتند. در این تحقیق ستون‌های بتنی با مقطع مربع و تقویت شده با میلگرد و الیاف فولادی کوتاه مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاوم‌سازی، مقاومت فشاری باقیمانده ستون‌های تقویت شده با الیاف کوتاه را بهبود بخشید. اثرات تکه‌تکه شدن/ورقه شدن کلی برای بتن نیز کاهش یافت.

حال مسئله این است که استفاده از ورق‌های FRP چه تأثیری می‌تواند روی عملکرد تقویت برشی ستون‌های بتنی داشته باشد. تأثیر استفاده از آن بر عملکرد ستون بتنی در برابر انفجار چگونه است و میزان بهبود عملکرد محاسبه و ارزیابی گردد. بنابراین سعی بر آن است که با دستیابی به نتایج این پژوهش گامی مؤثر در جهت بهبود عملکرد برشی ستون‌های بتنی برداشته شود.

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، ابتدا به بررسی نحوه مدل‌سازی انفجار و ستون‌های بتنی پرداخته خواهد شد. پس از انتخاب مدل مناسب در نرم‌افزار المان محدود و صحت‌سنجی بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی صورت پذیرفته توسط دیگر محققین سعی خواهد شد به بررسی و ارزیابی عملکرد ستون بتنی مقاوم‌سازی شده با صفحات FRP در برابر انفجار ماده TNT در فواصل مختلف از ستون بتنی و ساختمان ۵ طبقه پرداخته می‌شود. در نهایت تأثیر شدت‌های مختلف انفجار، فاصله ماده منفجره از محل ساختمان و ستون و همچنین تأثیر استفاده از صفحات FRP ارزیابی می‌گردد و توصیه‌هایی جهت بهبود عملکرد و تقویت این سازه‌ها ارائه می‌گردد که می‌تواند در موضوعات پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مبانی نظری تحقیق

۲-۱- انفجار

تعداد بی‌شماری از بارهای غیرعادی وجود دارد که به‌طور بالقوه می‌توانند منجر به خرابی در ساختمان‌ها شوند مانند ضربه ناشی از برخورد هواپیماها، آتش‌سوزی، اضافه‌بارهای تصادفی، خطاهای ساخت و طراحی، انفجار گازها و بمب‌ها، ضربه ناشی از برخورد وسایل نقلیه و مصالح خطرناک و غیره [۱۵]. به‌طور کلی، انفجار نتیجه آزاد شدن بسیار سریع مقدار زیادی انرژی در یک فضای محدود است (شکل (۱)) [۱۶].

شکل (۳) مورد آزمایش قرار دادند تا واکنش آن‌ها را در مقابل بارگذاری انفجاری تعیین کنند. ۶ دال شامل این موارد می‌شوند: دو دال مسلح متداول RC برای نمونه‌های کنترل، دو دال بتن مسلح با الیاف مسلح پلیمری تقویت شده روی سطح فشاری و یک دال ساخته شده با بتن بسیار مقاوم بدون فولادگذاری و یک دال ساخته شده با بتن بسیار مقاوم با فولادگذاری. اندازه بارهای انفجاری محدود به ۱ تا ۲۰ کیلوگرم TNT با مسافت‌های فرضی (که در مورد آن توافقی وجود ندارد) است. تاریخ‌های فشار انفجاری روی سطوح دال و تاریخ‌های جابه‌جایی دال‌ها ثبت می‌شود. توزیع فشار مورد تحلیل قرار می‌گیرد. واکنش دال‌ها مشاهده می‌شود و جذب انرژی آن‌ها با پیش‌بینی انجام شده با استفاده از تحلیل مقایسه می‌شود. ژائو و چن [۹] به بررسی رفتار دینامیکی و آسیب دال بتن مسلح تحت بار دینامیکی انفجار پرداختند، و در این زمینه به تأثیرات نرخ کرنش و فاکتور افزایش دینامیکی و معادلاتی برای بتن برای سازوکار آسیب و پاسخ دینامیکی رسیدند. محسن نجمی وزنه و ایرج محمودزاده کنی [۱۰] به تحلیل دینامیکی غیرخطی دو سازه متفاوت مقاوم در برابر حملات هوایی توسط برنامه رایانه‌ای ANSYS پرداختند که در تحلیل‌های متفاوت با تغییرات در مدل‌سازی درصدهای فولاد و ضخامت‌های بتن مناسب را پیشنهاد کردند. سید جمال‌الدین موسوی و علی علوی نیا [۱۱] به بررسی پارامترهای مؤثر بر ناحیه تخریب بتن تحت اثر بارگذاری انفجاری پرداختند. به همین منظور از نرم‌افزار LS-DYNA برای شبیه‌سازی عددی بارگذاری انفجاری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که افزایش استحکام فشاری، درصد میلگردهای تقویتی و چگالی بتن موجب کاهش حجم تخریب می‌شود و نیز تنش‌ها با افزایش استحکام فشاری بتن و درصد میلگردهای تقویتی بیشتر می‌شود درحالی‌که تغییر چگالی بتن اثری بر تنش‌ها ندارد. تغییر ضریب پواسون بتن نیز بر حجم ناحیه تخریب و تنش‌ها اثری ندارد. هونگ‌هائو و همکاران [۱۲] بر روی تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان ستون‌های بتن مسلح و قاب‌های تقویت شده با FRP در معرض بارهای انفجاری تحقیقاتی را انجام دادند. تحلیل مؤلفه قابلیت اعتماد برای محاسبه احتمال خرابی ستون‌ها با و یا بدون تقویت با FRP انجام شد. در این تحقیق تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه برای محاسبه احتمال تخریب یک نمونه قاب بتنی مسلح در دو سناریو انفجار انجام شد. فاصله مقیاس‌بندی شده انفجار از احتمال صفر تا احتمال اطمینان، مربوط به میزان خسارت‌های مختلف ستون‌های بتنی مسلح با و بدون تقویت FRP، تعیین می‌شوند. نتایج به دست آمده در این مطالعه اثر بخشی تقویت FRP در حفاظت از سازه را نشان می‌دهد و همچنین این نوع تقویت می‌تواند برای ارزیابی عملکرد سازه‌های بتنی مسلح تحت بارهای انفجار استفاده شود. نماتا ساییدو و همکاران [۱۳] بر روی عملکرد بارهای ناشی از انفجار بر روی یک ساختمان دوطبقه مقاوم‌سازی شده با FRP مطالعاتی انجام دادند. مطالعه صورت گرفته به صورت عددی و در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شد. بارهای ناشی از انفجار در دو سناریوی مختلف و

می‌گردند که در این روش دسته‌های الیاف پس از آغشته شدن با رزین پس از عبور از یک قالب در کنار هم قرار گرفته و یک پروفیل دارای مقطع ثابت را به وجود می‌آورد. محصولات پلیمری مورد استفاده در سازه‌ها به شکل ورق، میلگرد، مش و پروفیل‌های FRP وجود دارد. از این محصولات برای ساخت و تقویت سازه‌ها استفاده می‌شود [۱۸].

از سال ۲۰۰۲ میلادی و پس از انتشار استاندارد ACI 440-02 استفاده از الیاف FRP به صورت پوششی و ورق FRP جهت تقویت المان‌های سازه‌ای و به صورت میلگرد FRP جهت مسلح نمودن مقاطع بتنی گسترش روزافزون داشته است. به گونه‌ای که در حال حاضر استفاده از این مواد پلیمری در زمینه مقاوم‌سازی ساختمان‌های و سازه‌های موجود به عنوان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها چه از منظر فنی و چه از منظر اقتصادی شناخته می‌شود و به طبع آن استفاده از الیاف FRP، جهت کاربردهای گوناگون، در ایران نیز رواج یافته است [۱۹].

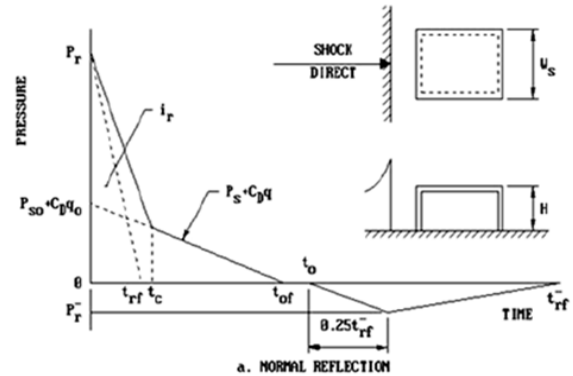
۳- روش تحقیق و مدل‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد ستون بتنی مقاوم‌سازی شده با صفحات FRP در برابر انفجار، پس از مدل‌سازی و کسب اطمینان از صحت نتایج، مدل‌سازی در شرایط انفجار ماده TNT در فاصله ۲/۵، ۵ و ۱۰ متری از ستون مورد مطالعه و در فاصله ۲۰ متری از قاب مورد مطالعه انجام می‌شود. تأثیر شدت‌های مختلف انفجار، فاصله ماده منفجره از محل ساختمان و ستون و همچنین تأثیر استفاده از صفحات FRP ارزیابی می‌گردد.

با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات مربوط به انجام مطالعات آزمایشگاهی از جمله محدودیت مربوط به ابعاد نمونه‌ها، مشکلات نصب و اجرا، هزینه و زمان بالا و ...، با انجام تحلیل‌های عددی صحیح می‌توان نتایج آزمایشگاهی را به محدوده صحیحی از سازه‌ها که امکان آزمایش عملی برای آن‌ها وجود ندارد تعمیم داد. برای اعتباربخشی به مدل‌سازی اجزاء محدود و اطمینان از فرضیات در نظر گرفته شده، چند نمونه آزمایشگاهی مدل و صحت مدل‌سازی تأیید می‌گردد.

نرم‌افزاری که از آن جهت مدل‌سازی نمونه استفاده شده است نرم‌افزار تحلیل المان محدود ABAQUS است. نرم‌افزار ABAQUS قابلیت‌های فراوانی برای تحلیل اجزای محدود انواع سازه‌ها، از تحلیل ساده استاتیکی خطی تا تحلیل پیچیده دینامیکی غیرخطی را دارا است. به‌طور کلی برای مدل‌سازی یک سامانه توسط نرم‌افزار ABAQUS مراحل عمومی زیر باید انجام گیرد. به عنوان یک گام اولیه در تحلیل اجزای محدود شبکه‌بندی مدل مورد نیاز است، به عبارت دیگر مدل به تعدادی المان‌های کوچک تقسیم شده و پس از بارگذاری، تنش و کرنش نقاط گره‌ای این المان کوچک محاسبه می‌شوند. یک گام مهم در مدل‌سازی اجزای محدود انتخاب چگالی مش است. همگرایی نتایج زمانی حاصل می‌شود که از تعداد مناسبی المان در مدل استفاده شود. این موضوع به‌ویژه زمانی نمود پیدا می‌کند که یک افزایش در چگالی

قابلیت‌ها و کاربردهای متنوع این محصول‌ها استفاده نموده و جایگزینی آن‌ها را با مصالح و مواد سنتی اجتناب‌ناپذیر کند. کنترل کیفی ساخت، مقاومت مکانیکی و مقاومت شیمیایی بالا در برابر اثرات محیط از جمله مزیت‌های این فناوری‌ها محسوب می‌گردد [۷].



شکل ۳- تغییرات فشار - زمان دیوار مقابل سازه [۱۲].

استفاده از کامپوزیت پلیمر مسلح شده با الیاف در سازه‌های بتن مسلح، یکی از موضوعات نوین در صنعت ساخت‌وساز کشور است. این در حالی است که این مواد سابقه ۴۰ ساله در ساخت انواع سازه‌های بتنی جهان توسعه یافته دارد. استفاده از FRP در برخی از انواع ساختمان‌ها از مزیت‌های شایان توجهی برخوردار است.

یکی از موارد کاربرد FRP در صنعت ساخت‌وساز، استفاده جهت تقویت و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و سازه‌های بتنی موجود است. مزایای استفاده از سامانه‌های FRP جهت تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی را می‌توان به مواردی چون سرعت بالای اجرا و همچنین عدم وجود تغییرات معماری در ساختمان و از سوی دیگر به امکان تحقق کنترل کیفیت بالا و وجود مبانی روشن فنی جهت طراحی و اجرای نسبت داد. بنابراین از بین گزینه‌های تعریف شده جهت تقویت سازه‌های بتنی، استفاده از سامانه‌های تقویت پلیمرهای مسلح شده با الیاف و در اصطلاح عام، مقاوم‌سازی با استفاده از FRP یک راهکار مناسب محسوب می‌گردد [۶].

طی سال‌های گذشته، تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از موادی نظیر الیاف کربن، شیشه و آرامید و چسباندن آن‌ها به عضو آسیب‌پذیر به عنوان روش ترمیم و تقویت انجام شده است. مطالعات اولیه در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ در سوئیس آغاز شده و نتایج آن در تقویت پل‌های بتن مسلح استفاده شد. پس از زلزله‌های سال ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه، کاربرد FRP به منظور تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و بنایی گسترش یافت.

سامانه تقویتی FRP یکی از مصالح کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس رزین از جنس پلیمر احاطه شده است. میلگردها و پروفیل‌ها به روش پالتروژن تولید

جدول ۱- مشخصات میلگرد مصرفی.

$\rho(\text{Kg/m}^3)$	γ	$E(\text{Kg/cm}^2)$	$F_u(\text{Kg/cm}^2)$	$F_y(\text{Kg/cm}^2)$
۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۰۰۰۰۰	۵۷۲۰	۴۰۶۸

۳-۲- مدل سازی انفجار در نرم افزار آباکوس

پس از ایجاد قسمت‌های مختلف ساختمان بتنی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس نظیر بخش‌های بتنی، میلگردهای عرضی و طولی و FRP رفتار مصالح با توجه به مشخصات ارائه شده بدان اختصاص می‌یابد. پس از آن در ماژول اسمبلی بخش‌های مختلف مدل در جای خود سرهم‌بندی می‌شود. در ماژول بارگذاری انتهای ستون‌های ساختمان به صورت قید گیردار تعریف شده است. در ماژول تعریف اندرکنش با استفاده از اندرکنش قید مدفون، اندرکنش بتن و میلگرد به صورت ماده مدفون نیز تعریف شده است. همچنین اندرکنش بین صفحه FRP و بتن با استفاده از گزینه Tie Contact به صورت دو صفحه به هم چسبیده با رفتار ماسی و عمودی سخت تعریف می‌شود.

در ماژول اندرکنش نرم‌افزار آباکوس، ابتدا به منظور نقطه شروع انفجار، در فاصله مشخص ۲/۵، ۵ و ۱۰ متری از ساختمان و بر روی زمین نقطه مرجعی تعریف شده است. در ادامه با استفاده از قید Incident wave و تعریف نقطه منبع انفجار و صفحه اعمال بار انفجاری، بارگذاری انفجاری صورت می‌پذیرد. لازم به ذکر است که در این بخش می‌بایست رفتار اندرکنشی incident wave تعریف گردد که در این بخش جرم ماده انفجاری بر اساس جرم TNT و ضرایب مقیاس فاصله، جرم ماده منفجره و فشار ناشی از انفجار به رفتار اندرکنشی تعریف می‌گردد. در نهایت در ماژول Step با تعریف یک Step دینامیکی Dynamic explicit با تنظیم زمان آنالیز ۵ میلی‌ثانیه و مش‌بندی مدل با تعریف یک job به تحلیل مدل پرداخته شده است.

سطوح تأثیرپذیر از انفجار سطح رو به انفجار در نظر گرفته شده است و فشار ناشی از انفجار به این سطح وارد شده است. تمام مراحل مذکور در نرم‌افزار تنها با تعریف سه مورد مطرح شده شامل نقطه مرجع، وزن خرج و سطح تأثیرپذیر صورت می‌پذیرد و محاسبات مربوط به انفجار و فشار و الگوی تغییرات آن توسط نرم‌افزار محاسبه می‌گردد.

با توجه به انتخاب ابعاد مش یکسان برای المان ستون بتنی و صفحات FRP دور‌تادور در نگاه بیننده این دو قسمت مش‌بندی از هم قابل تفکیک نیستند. در واقع مش‌های نمایش داده شده در ستون‌های تقویت شده همراه FRP هستند اما با توجه به ابعاد یکسان مش در بتن و صفحات FRP مش‌ها بر روی هم افتاده است. برای همین موضوع در نمایش تأثیر بارگذاری بر روی هر بخش سعی شده است که تنش‌ها، کرنش‌ها و یا خرابی ایجاد شده به صورت مجزا نمایش داده شود.

۳-۳- صحت‌سنجی نتایج تحلیل نرم‌افزاری

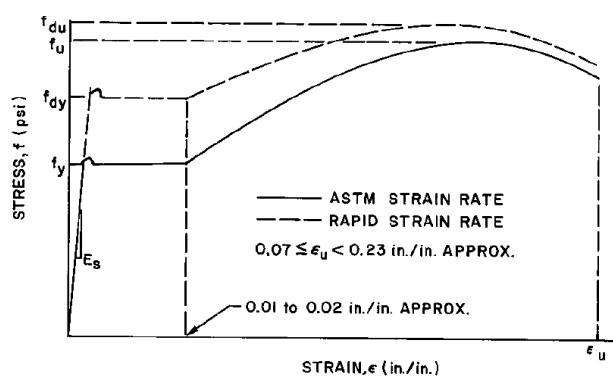
به‌منظور کسب اطمینان از صحت نتایج در مدل‌سازی اثر انفجار بر

مش اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی نتایج می‌گذارد. بنابراین در مدل‌سازی اجزای محدود به دست آورد چگالی مش مناسب به سعی و خطا نیاز دارد [۲۰].

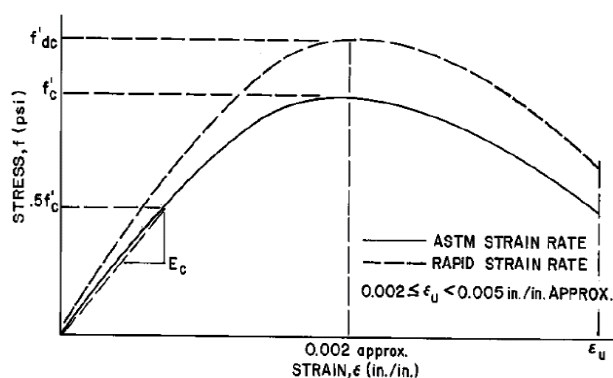
۳-۱- مشخصات مصالح مصرفی در مدل‌سازی

عضو سازه‌ای که تحت بارگذاری انفجاری قرار می‌گیرد، از خود مقاومت بیشتری نسبت به حالتی که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفته نشان می‌دهد. این افزایش مقاومت برای هر دو مصالح بتن و فولاد به همراه نرخ بالای کرنش است که در اعضایی که تحت بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرند رخ می‌دهد. از این تنش‌های افزایش‌یافته یا مقاومت دینامیکی مصالح برای محاسبه مقاومت دینامیکی اعضاء تحت بارگذاری انفجاری استفاده می‌شود. بنابراین مقاومت نهایی دینامیکی عضوی که تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفته، بیشتر از مقاومت استاتیکی نهایی آن است. برای در نظر گرفتن این ویژگی از ضریب DIF استفاده می‌شود. ضریب DIF به صورت نسبت مقاومت فشاری نهایی دینامیکی بتن (نمونه ۲۸ روزه) به مقاومت فشاری بتن است تعریف می‌شود. در شکل‌های (۴ و ۵) اثرات نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش بتن و فولاد نشان داده شده است [۱۵].

همچنین میلگرد مصرفی از نوع AI و مشخصات آن بر اساس دستورالعمل UFC 3-340-02 [۱۵] با احتساب مقدار ضریب افزایش دینامیکی فولاد (DIF) برای تنش تسلیم و تنش نهایی به ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۱ طبق جدول (۱) در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- اثر نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش فولاد [۱۵].



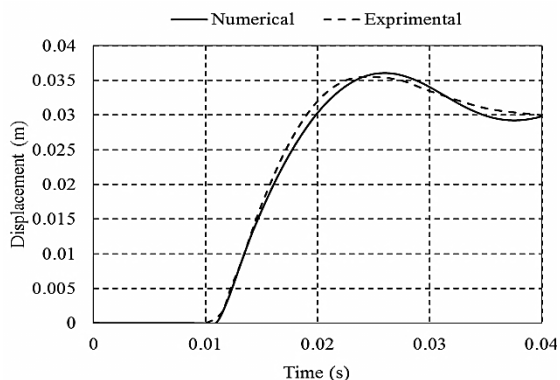
شکل ۵- اثر نرخ کرنش بر منحنی تنش - کرنش بتن [۱۵].

۱۱/۳ میلی‌متر) با فواصل ۷۵ میلی‌متری در نزدیک تکیه‌گاه‌ها و ۱۵۰ میلی‌متری در وسط ستون استفاده شده است. در شکل (۶) شمای کلی بارگذاری ستون و شرایط مرزی آن ارائه شده است. در انتها تاریخچه تغییر شکل افقی ستون و خرابی المان‌های ستون بعد از اعمال بار انفجار به ترتیب در شکل‌های (۷ و ۸) مقایسه و ارزیابی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، تغییر شکل‌های ایجاد شده در دو مدل آزمایشگاهی و عددی به ترتیب ۳۵/۵ میلی‌متر و ۳۶/۷ میلی‌متر است که با اختلاف حدود ۳/۵ درصد، تقریباً یکسان و مشابه بوده و خرابی المان‌های ستون در دو حالت به درستی مدل‌سازی شده است که حاکی از اعتبار نتایج است.

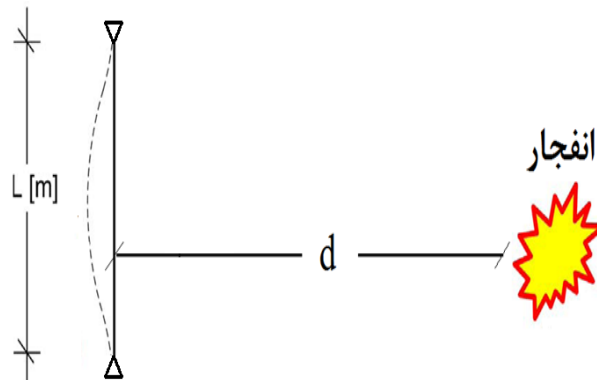
ستون بتنی، مدل آزمایشگاهی و عددی توسط پاتیل و پروف خوردا [۲۱]، انتخاب و مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی ستون مربع شکل با ابعاد مشخص مقطع ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۳ متر که تکیه‌گاه‌های آن در دو انتها مفصل است، در نظر گرفته شده است. ستون مذکور تحت انفجار ۸۲ کیلوگرم TNT در فاصله ۲ متری و در ارتفاع ۱ متری از ستون قرار گرفته و تحلیل شده است. در جدول (۲) رفتار بتن در فشار و کشش ارائه شده است. همچنین مقاومت تسلیم فولاد تسلیح حدود ۴۷۰ MPa با مدول الاستیسیته ۲۰۰ GPa است. در ستون بتنی مورد مطالعه میلگرد فولادی طولی مصرفی از نوع ۲۵ M (قطر حدود ۱۹/۵ میلی‌متر) با نسبت مساحت ۲/۳ درصد استفاده شده است. همچنین خاموت‌های از نوع ۱۰ M (قطر حدود

جدول ۲- مشخصات بتن

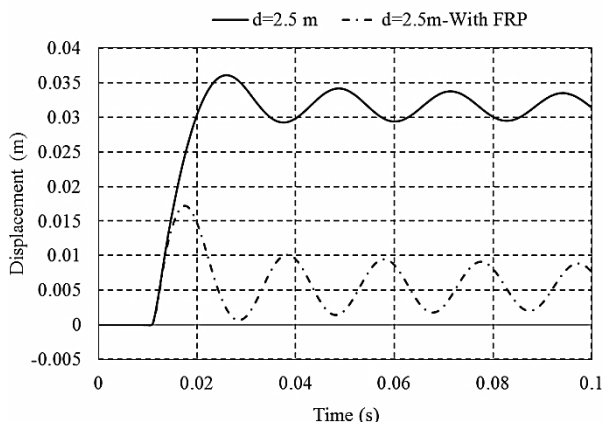
E (MPa)	ν	ψ	ϵ	$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	چگالی kg/m^3
۲۵۰۰۰	۰/۲	۳۶/۳۱	۱	۱/۱۶	۲۴۴۳
رفتار کرنش سختی و خرابی فشاری			رفتار کرنش سختی و کششی و خرابی بتن		
تنش (MPa)	کرنش خردشدگی	درصد خرابی المان	تنش (MPa)	کرنش ترک خوردگی	درصد خرابی المان
۱۲	۰	۰	۴/۹۳	۰	۰
۲۶	۰/۰۰۱۶	۰/۹۷	۴/۷	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۶۸
			۳/۹۱	۰/۰۰۰۳۶	۰/۲۱۹
			۲/۶۷	۰/۰۰۰۸۵	۰/۴۳۵
			۱/۵۹۸	۰/۰۰۱۸۱	۰/۶۴
			۰/۹۱۸	۰/۰۰۳۷۵	۰/۷۸
			۰/۵۳	۰/۰۰۷۶۱	۰/۸۸
			۰/۳۲	۰/۰۱۵	۰/۹۶۱



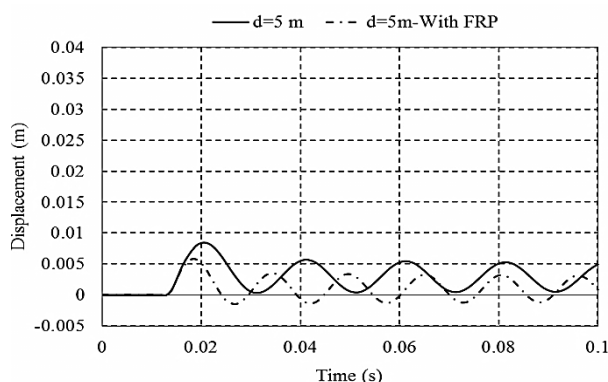
شکل ۷- مقایسه تغییر شکل ستون بتنی تحت انفجار در دو مدل آزمایشگاهی و مدل عددی صورت گرفته در این تحقیق.



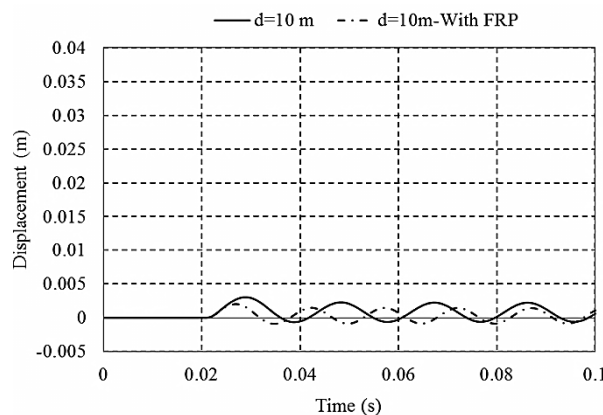
شکل ۶- نحوه بارگذاری و شرایط مرزی ستون.



شکل ۹- تغییر شکل افقی ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۲/۵ متر و در شرایط با و بدون صفحات FRP

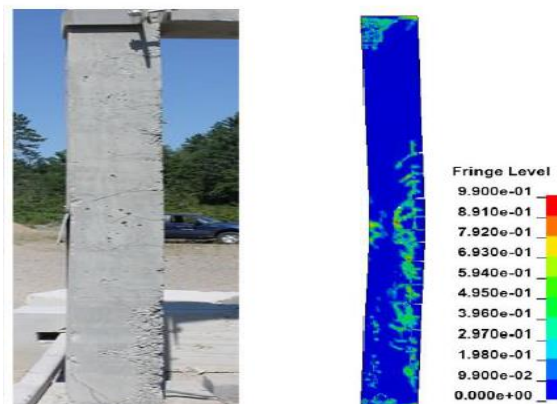


شکل ۱۰- تغییر شکل افقی ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۵ متر و در شرایط با و بدون صفحات FRP

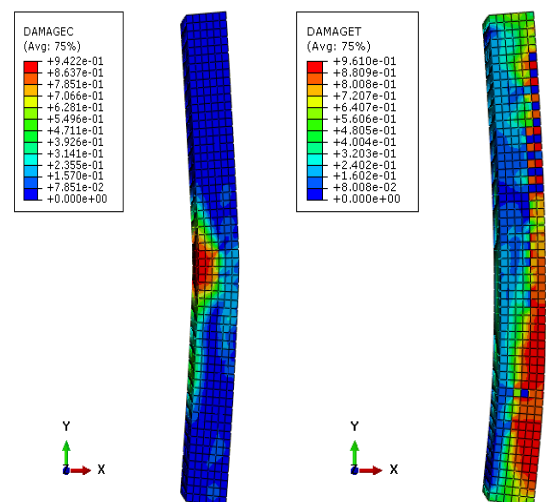


شکل ۱۱- تغییر شکل افقی ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۱۰ متر و در شرایط با و بدون صفحات FRP

همان‌طور که مشاهده می‌گردد استفاده از غلاف FRP موجب کاهش جابه‌جایی ۵۲/۶ درصدی حداکثر جابه‌جایی در ستون بتنی تحت انفجار در فاصله ۲/۵ متری شده است. از طرفی استفاده از صفحات FRP در فاصله‌های ۵ و ۱۰ متر به ترتیب موجب کاهش ۳۲ و ۳۱ درصدی در ستون شده است. همچنین استفاده از صفحات FRP موجب گردیده جابه‌جایی ماندگار در ستون تحت انفجار در فواصل مختلف کاهش یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۸- مقایسه خرابی ستون بتنی تحت انفجار در (الف) مدل آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط پاتیل و پروف خورد [۲۱] و (ب) مدل عددی انجام شده در این تحقیق.

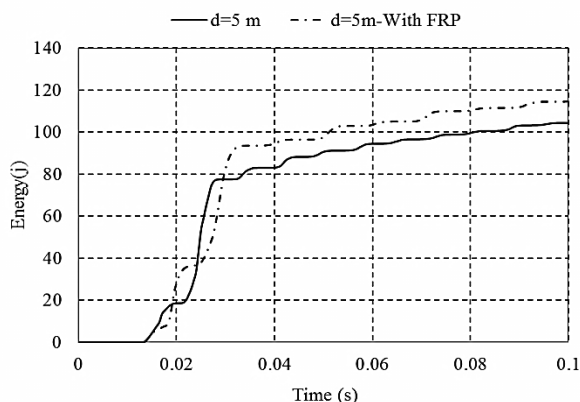
۴- یافته‌ها

۴-۱- ارزیابی تغییر شکل افقی ستون تحت سناریوهای مختلف انفجاری در شرایط با و بدون صفحات FRP

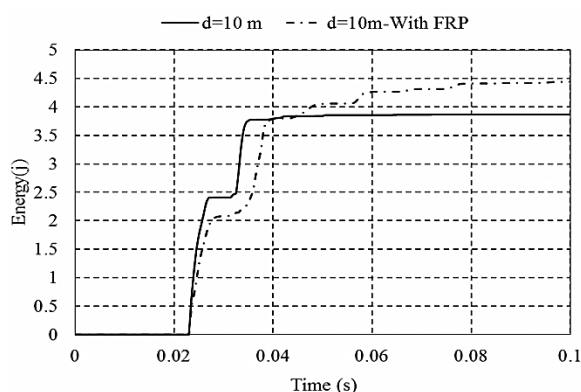
به‌منظور ارزیابی تأثیر استفاده از صفحات FRP بر مقاومت ستون بتنی در برابر بار انفجار در فواصل مختلف خرج انفجاری، مدل ستون بتنی مورد مطالعه با استفاده از صفحات FRP با مشخصات جدول (۳) دورپیچ شده و تحت بار انفجاری تحلیل شده است. در شکل‌های (۹ تا ۱۱) تغییر شکل افقی ستون در دو حالت با و بدون FRP نمایش داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مکانیکی صفحات FRP.

Width (mm)	Thickness (mm)	Tensile strength	Maximal strain	Young modulus (GPa)
50	1.4	2800	1.6%	163



شکل ۱۴- انرژی اتلاف شده برای خرابی در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۵ متر و در شرایط با و بدون صفحات FRP.



شکل ۱۵- انرژی اتلاف شده برای خرابی در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۱۰ متر و در شرایط با و بدون صفحات FRP.

۳-۴- نمایش کانتور تنش و خرابی المان‌های بتن در ستون

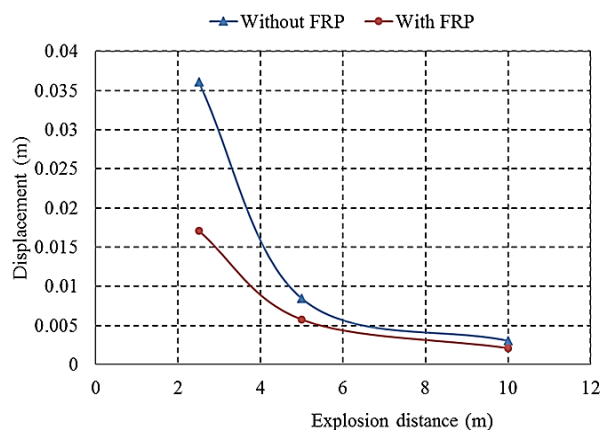
تحت سناریوهای مختلف انفجاری در شرایط با و بدون FRP

همان‌طور که در شکل‌های (۱۶ تا ۲۱) مشاهده می‌گردد، استفاده از صفحات FRP به‌صورت دورپیچ موجب گردیده خرابی کششی و فشاری در ستون فشاری در فاصله‌های مختلف انفجار کاهش یابد. با افزایش فاصله تعداد المان‌های ترک‌خورده کاهش می‌یابد و خردشدگی فشاری هم در فاصله ۱۰ متری انفجار به وجود نمی‌آید.

۴-۴- ارزیابی عملکرد قاب بتنی ۵ طبقه

در ادامه به‌منظور ارزیابی عملکرد تقویت مقاطع بتنی با صفحات FRP قاب ساختمانی بتنی ۵ طبقه‌ای تحت بارگذاری انفجاری در فاصله ۲۰ متری انتخاب و مدل‌سازی شده است. در ادامه و در شکل (۲۳) هندسه قاب و مقاطع ستون نمایش داده شده است. اتصال تیرها به ستون‌ها و همچنین اتصال پای ستون‌ها به پی چه در صفحه قاب و چه عمود بر صفحه قاب به‌صورت گیردار است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۳۰ MPa با مدول الاستیسیته ۲۵ GPa است. مقاومت تسلیم فولاد تسلیم حدود ۴۰۰ MPa با مدول الاستیسیته ۲۰۰ GPa است.

در فاصله‌های ۵ و ۱۰ متری هم جابه‌جایی ماندگار به‌شدت کاهش پیدا می‌کند. در ادامه روند تغییرات حداکثر جابه‌جایی افقی ستون در شرایط مختلف در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد استفاده از FRP موجب می‌شود جابه‌جایی افقی کاهش محسوسی پیدا کرده و این کاهش در فواصل نزدیک‌تر، بیشتر است.

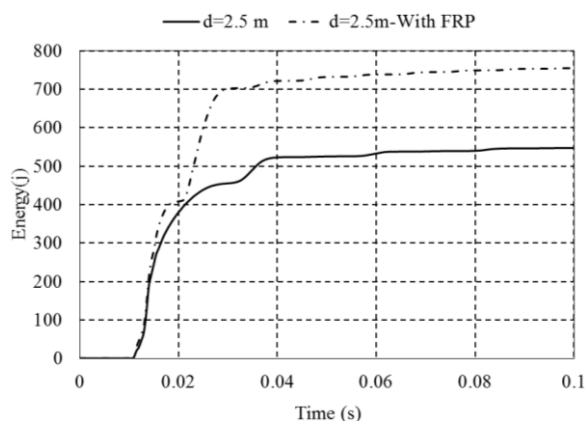


شکل ۱۲- مقایسه تغییر شکل افقی ستون تحت انفجار با فاصله‌های مختلف خرج انفجاری در شرایط با و بدون صفحات FRP

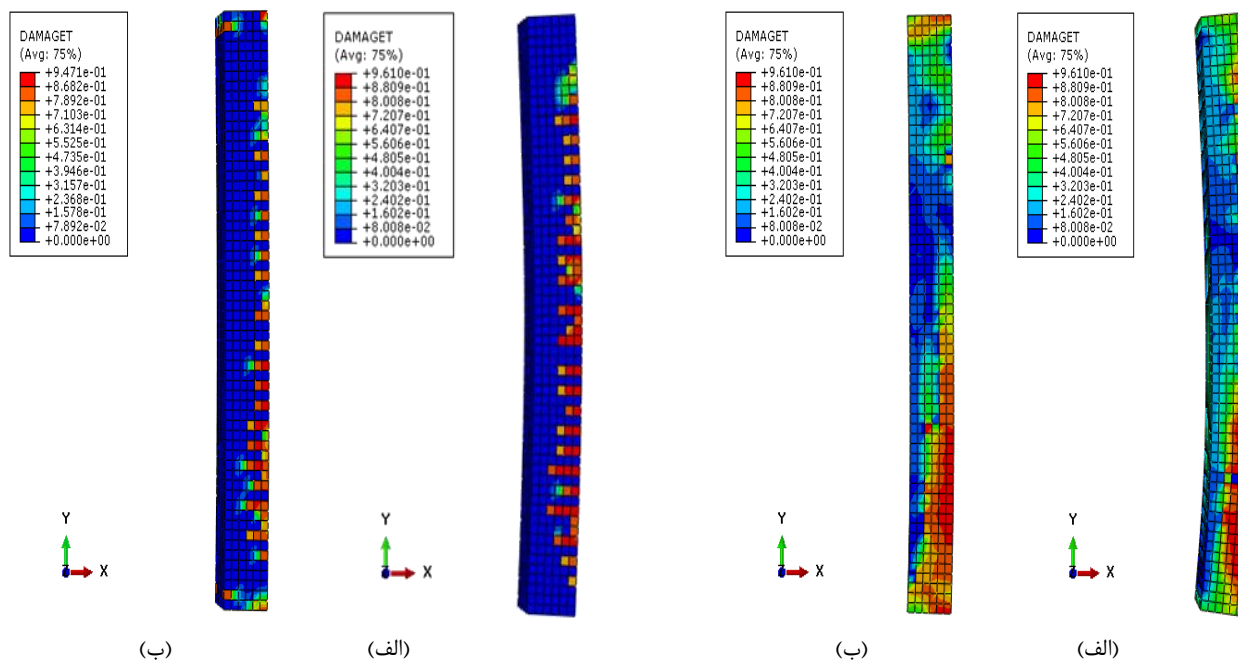
۲-۴- ارزیابی اتلاف انرژی توسط ستون تحت سناریوهای

مختلف انفجاری در شرایط با و بدون صفحات FRP.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۳ تا ۱۵) مشاهده می‌شود استفاده از FRP موجب می‌گردد تا انرژی بیشتری از انفجار صرف خرابی سازه گردد و مقدار بیشتری از انرژی جنبشی ناشی از انفجار به‌صورت خرابی اتلاف می‌گردد. با افزایش فاصله خرج انفجاری میزان افزایش انرژی اتلاف شده به‌منظور خرابی در دو حالت با و بدون صفحات FRP اختلاف کمتری نسبت به هم داشته‌اند. در واقع تأثیر FRP در فواصل نزدیک‌تر انفجار بیشتر است.

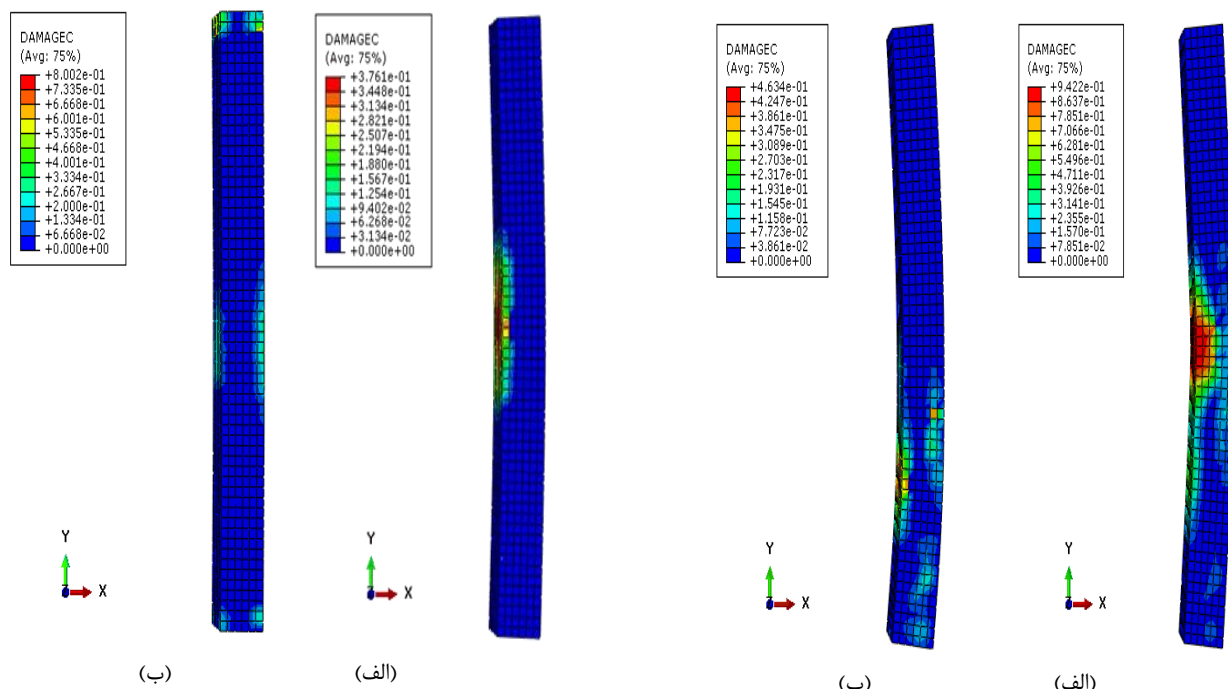


شکل ۱۳- انرژی اتلاف شده برای خرابی در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۲/۵ متر و در شرایط با و بدون صفحات FRP.



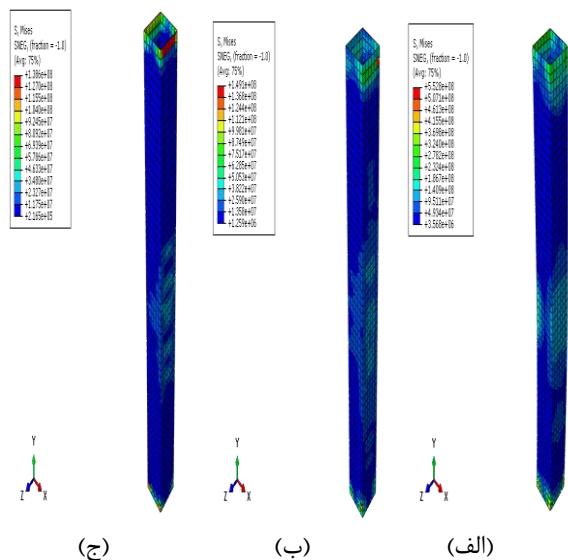
شکل ۱۸ - مقایسه خرابی کششی المان‌های بتن در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۵ متر (الف) بدون صفحات FRP و (ب) با صفحات FRP.

شکل ۱۶ - مقایسه خرابی کششی المان‌های بتن در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۲/۵ متر (الف) بدون صفحات FRP و (ب) با صفحات FRP.



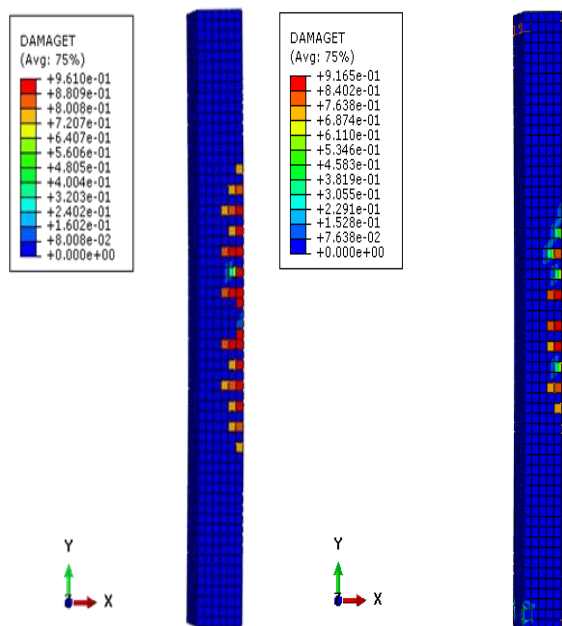
شکل ۱۹ - مقایسه خرابی فشاری المان‌های بتن در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۵ متر (الف) بدون صفحات FRP و (ب) با صفحات FRP.

شکل ۱۷ - مقایسه خرابی فشاری المان‌های بتن در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۲/۵ متر (الف) بدون صفحات FRP و (ب) با صفحات FRP.



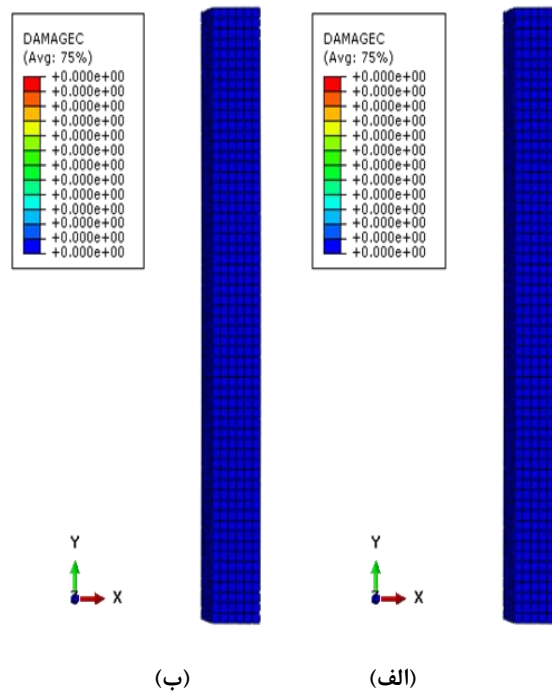
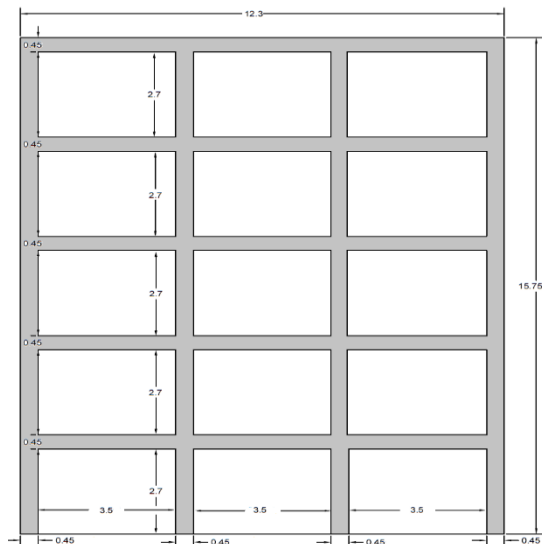
(ج) (ب) (الف)

شکل ۲۲- تنش صفحات FRP در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با (الف) ۲/۵ متر، (ب) ۵ متر و (ج) ۱۰ متر.



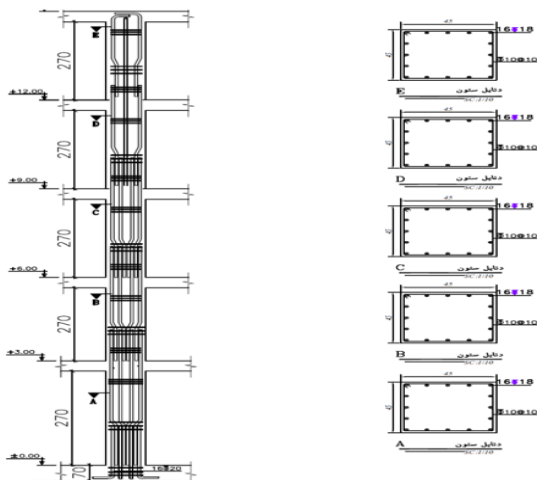
(ب) (الف)

شکل ۲۰- مقایسه خرابی کششی المان‌های بتن در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۱۰ متر (الف) بدون صفحات FRP و (ب) با صفحات FRP.

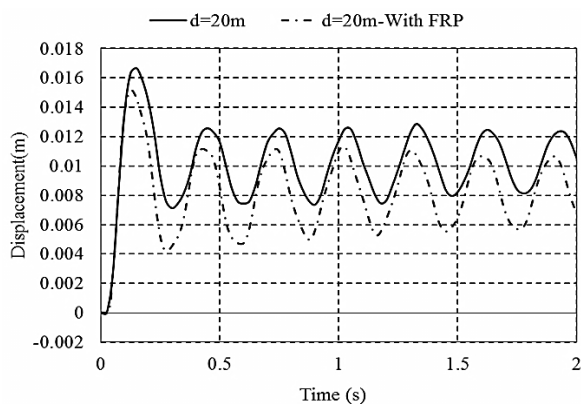


(ب) (الف)

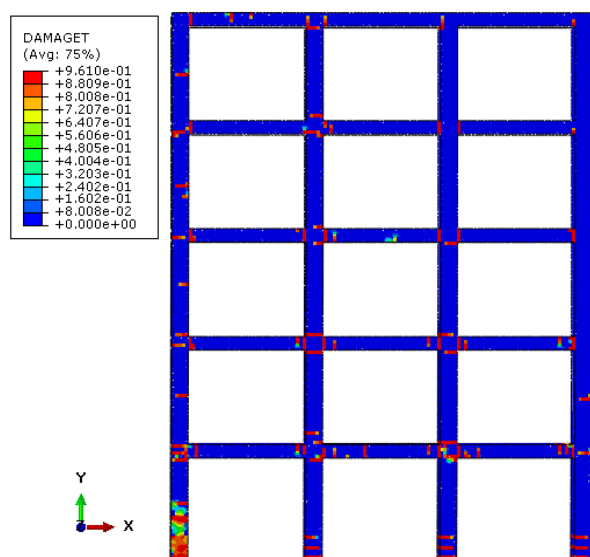
شکل ۲۱- مقایسه خرابی فشاری المان‌های بتن در ستون تحت انفجار با فاصله خرج انفجاری برابر با ۱۰ متر (الف) بدون صفحات FRP و (ب) با صفحات FRP.



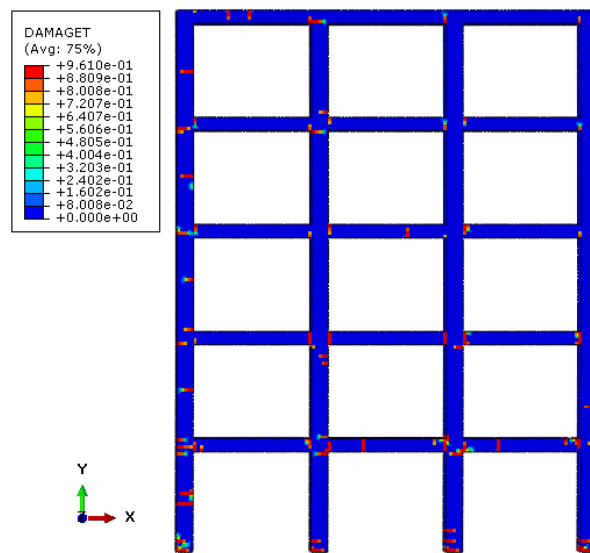
شکل ۲۳- هندسه قاب و مقاطع ستون در قاب ۵ طبقه.



شکل ۲۵- تغییر شکل قاب بتنی مورد مطالعه در شرایط با و بدون صفحات FRP و در برابر انفجار ۱ تن ماده TNT در فاصله ۲۰ متری.



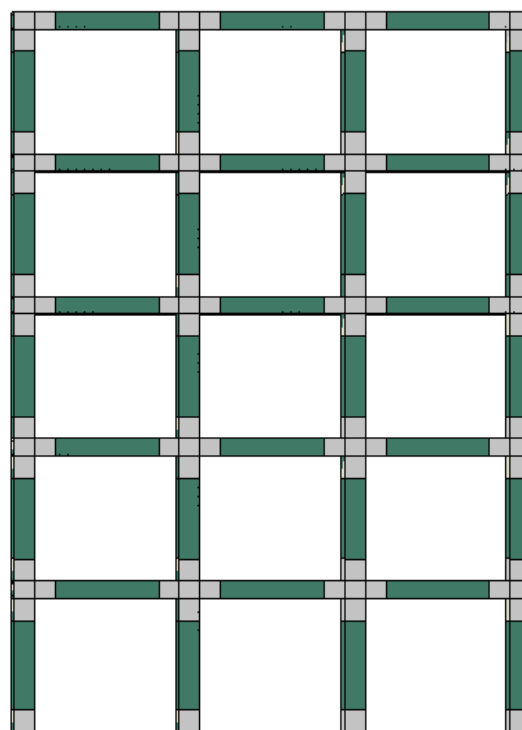
(بدون صفحات FRP)



(با صفحات FRP)

شکل ۲۶- ترک‌های ایجاد شده در مدل قاب بتنی با و بدون استفاده از صفحات FRP تحت انفجار ۱ تن TNT در فاصله ۲۰ متری.

قاب ساختمانی مذکور در دو حالت بدون صفحات FRP و با تقویت FRP در دو طرف ستون به طول ۵۰ سانتی‌متر و در دو طرف اتصال به طول ۵۰ سانتی‌متر و به منظور کنترل برش در چشمه اتصال و در ستون مدل‌سازی شده است. در شکل (۲۴) نحوه استفاده از صفحات FRP نمایش داده شده است. لازم به ذکر است ضخامت صفحات ۱ میلی‌متر و رفتار آن همانند بخش قبل است. در ادامه اثر انفجار ۱ تن ماده منفجره TNT در یک طرف قاب و بر روی سطح زمین در فاصله ۲۰ متری ارزیابی شده است.



شکل ۲۴- نحوه استفاده از صفحات FRP در مدل به منظور تقویت برشی ستون و چشمه اتصال.

در شکل (۲۵) منحنی جابه‌جایی حداکثر در قاب مورد مطالعه تحت بارگذاری انفجاری ۱ تن ماده TNT در فاصله ۲۰ متری نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در این فاصله از ساختمان استفاده از FRP تأثیر محسوسی بر جابه‌جایی قاب داشته و به میزان ۱۳ درصد جابه‌جایی حداکثر قاب بتنی و ۲۷ درصد جابه‌جایی ماندگار آن کاهش یافته است.

در ادامه و در شکل (۲۶) ترک‌های ایجاد شده در قاب بتنی در دو حالت با و بدون صفحات تقویتی FRP در دو انتهای ستون و چشمه اتصال تحت بارگذاری ۱ تن ماده TNT در فاصله ۲۰ متری نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد علاوه بر مناطق اطراف چشمه اتصال ستون پایینی نزدیک به انفجار هم دچار ترک‌های بسیاری شده است. در این حالت استفاده از صفحات FRP موجب کنترل محسوس ترک‌های قاب بتنی شده است.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از صفحات FRP موجب کنترل محسوس ترک‌های قاب بتنی و در نتیجه جلوگیری از خرابی پیش‌رونده و فروپاشی کل سازه می‌گردد.

مراجع

- [1] Alsayed, S. H.; Al-Salloum, Y. A.; Almusallam, T. H.; Siddiqui, N. A. "Seismic Response of FRP-upgraded Exterior RC Beam-column Joints"; *J. Compos. Construct.* ASCE. 2010, 14, 195-208.
- [2] Carlos, Ch.; Manual A. G. S. "Monotonic Axial Behavior and Modeling of RC Circular Columns Confined with CFRP"; *Eng. Struct.* 2010, 32, 2268-2277.
- [3] Aoude, H.; Dagenais, F. P.; Burrell, R. P.; Saatcioglu, M. "Behaviour of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Columns Under Blast Loading"; *Int. J. Impact Eng.* 2015, 80, 185-202.
- [4] Yu Low, H.; Hao, H. "Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs Under Explosive Loading"; *Struct. Safety* 2001, 23, 157-178.
- [5] Luccioni, B. M.; Luege, M. "Concrete Pavement Slab under Blast Loads"; *Int. J. Impact Eng.* 2006, 32, 1248-1266.
- [6] Mosalam, Kh. M.; Mosallam, A. S. "Seismic Response of FRP-upgraded Exterior RC Beam-Column Joints"; *Compos. Struct.* 2001, 32, 623-636.
- [7] Nam, J. W.; Kim, H. J.; Kim, S. B.; Yi, N. H.; Jay Kim, J. H. "Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Pressure"; *Compos. Struct.* 2010, 92, 1212-1222.
- [8] Jones, J.; Wu, C.; Oehlers, D. J.; Whittaker, A. S.; Sun, J. Marks, S.; Coppola, S. "Finite Difference Analysis of Simply Supported RC Slabs for Blast Loadings"; *Compos. Struct.* 2009, 31, 2825-2832.
- [9] Zhao, C. F.; Chen, J. Y.; Wang, Y.; Lu, S. J. "Damage Mechanism and Response of Reinforced Concrete Containment Structure Under Internal Blast Loading"; *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2012, 61, 12-20.
- [10] Najmi Weight, M.; Mahmoudzadeh Kani, I. "Investigation of The Effect of Explosion in Air Strikes On Military Structures"; Master Thesis, University of Tehran, 2000.
- [11] Mousavi, S. J.; Alavi Nia, A. "Numerical Analysis of the Effects of Explosion On Concrete Structures"; Master Thesis, Bu-Ali Sina University of Hamedan, 2007.
- [12] Hao, H.; Li, Z. X.; Shi, Y. "Reliability Analysis of RC Columns and Frame with FRP Strengthening Subjected to Explosive Loads"; *J. Perform. Constr. Facil.* 2016, 30, 04015017.
- [13] Saidou Sabiou, N.; Koçak, A. "Blast Loading Performance of FRP Retrofitting of Two Storey Building"; *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2017, 6, 239-243.
- [14] Vapper, M.; Lasn, K. "Blast Protection of Concrete Columns with Thin Strips of GFRP Overlay"; *Struct.* 2020, 25, 491-499.
- [15] Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02) "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Department of Defense, Washington DC, 2008.
- [16] Bangash, N. Y. H.; Bangash, T. "Shock, Impact and Explosion: Structural Analysis and Design"; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009th Ed. 32, 388-393.
- [17] "Loads on the Building, Sixth Topic"; Office of Development and Promotion of National Building Regulations, Iran Development Publishing, Second Ed. 2013.
- [18] Orakcal, K.; Massone, L. M.; Wallace, J. W. "Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flexural Responses"; University of California, Los Angeles, PEER Report, 2006.

در این تحقیق به منظور ارزیابی عملکرد ستون‌های بتنی در برابر انفجار و تأثیر تقویت برشی آن‌ها توسط صفحات FRP ابتدا ستون بتنی مربع شکل با ابعاد مشخص مقطع ۳۰۰ در ۳۰۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شده است. تکیه‌گاه‌های آن در دو انتها مفصلی در نظر گرفته شده است. ستون مذکور تحت انفجار ۸۲ کیلوگرم TNT در فاصله‌های مختلف از ستون در ارتفاع ۱ متری قرار گرفته و تحلیل شده است. در ادامه تحلیل‌های صورت گرفته برای شرایطی که ستون بتنی با استفاده از صفحات FRP به صورت غلاف کامل تقویت شده تکرار و نتایج مقایسه شدند تا اثر تقویت بر عملکرد ستون بتنی در برابر انفجار ارزیابی شود. در ادامه با مدل‌سازی ساختمانی ۵ طبقه و در دو حالت بدون و با تقویت صفحات FRP در انتهای ستون و چشمه اتصال سعی گردید با کنترل برش در این مناطق موجب بهبود عملکرد ساختمان بتنی شد. نتایج این تحقی نشان داد که با افزایش فاصله خرج انفجاری جابه‌جایی حداکثر ستون در راستای افقی با شدت بیشتری کاهش پیدا کرده این بدان معناست که ستون در فواصل نزدیک و به دلیل خرابی فشاری جناح رو به انفجار بیشتر تحت تأثیر بار انفجار بوده و جابه‌جایی بیشتری را تجربه می‌کند. افزایش فاصله خرج انفجاری موجب می‌گردد خرابی فشاری در جناح رو به انفجار رخ ندهد و تنها خرابی کششی در جناح پشت به انفجار روی دهد که موجب می‌گردد هر چه فاصله خرج انفجاری بیشتر شود، جابه‌جایی افقی ستون با شدت بیشتری کاهش یابد. استفاده از غلاف FRP موجب کاهش جابه‌جایی ۵۲/۶ درصدی حداکثر جابه‌جایی در ستون بتنی تحت انفجار در فاصله ۲/۵ متری شده است. از طرفی استفاده از صفحات FRP در فواصل ۵ و ۱۰ متر به ترتیب موجب کاهش ۳۲ و ۳۱ درصدی در ستون شده است. همچنین استفاده از صفحات FRP موجب گردید جابه‌جایی ماندگار در ستون تحت انفجار در فواصل مختلف کاهش یابد. استفاده از FRP موجب می‌گردد جابه‌جایی افقی کاهش محسوسی پیدا کرده و این کاهش در فواصل نزدیک‌تر، بیشتر است. از طرف دیگر، استفاده از FRP موجب می‌گردد تا انرژی بیشتری از انفجار صرف خرابی سازه گردد و مقدار بیشتری از انرژی جنبشی ناشی از انفجار به صورت خرابی اتلاف می‌گردد. با افزایش فاصله خرج انفجاری میزان افزایش انرژی اتلاف شده به منظور خرابی در دو حالت با و بدون صفحات FRP اختلاف کمتری نسبت به هم داشته‌اند. در واقع تأثیر FRP در فاصله‌های نزدیک‌تر انفجار بیشتر است. در شرایطی که قاب بتنی تحت انفجار با فاصله‌ای ۲۰ متری از ساختمان استفاده از FRP تأثیر محسوسی بر جابه‌جایی قاب داشته و به میزان ۱۳ درصد جابه‌جایی حداکثر قاب بتنی و ۲۷ درصد جابه‌جایی ماندگار آن کاهش یافته است. در شرایطی که قاب بتنی مورد مطالعه تحت انفجار خرج انفجاری ۱ تنی و با فاصله‌ای ۲۰ متری قرار دارد، علاوه بر مناطق اطراف چشمه اتصال، ستون پایینی نزدیک به انفجار هم دچار ترک‌های بسیاری شده است. در این حالت

- [21] Patil, M. N.; Khurd, V. G. "Effects of Different Reinforcement Schemes and Column Shapes on the Response of Reinforced Concrete Columns Subjected to Blast Loading"; *Int. Res. J. Eng. & Technol.* 2018, 5, 1-11.
- [19] Nanni, A.; Massone, L. M.; Wallace, J. W. "North American Design Guidelines for Concrete Reinforcement and Strengthening Using FRP Principles, Applications and Unresolved Issues"; *Constr. Build. Mater.* 2003, 17, 439-446.
- [20] Nam, J. W.; Kim, H. J. Kim, S. B.; Yi, N. H.; Kim, J. H. J. "Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Pressure"; *Compos. Struct.* 2010, 92, 1212-1222.