

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، ششم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، (پیاپی ۳۰): صص ۶۲-۵۵

مقاوم سازی ستون های بتن مسلح تحت انفجار با استفاده

از پوشش های پلیمری مسلح شده با الیاف

محمد اسماعیل نیا عمران^{۱*}، میثم محمودی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

انفجار ناشی از مواد منفجره حجیم و متمرکز در محوطه اطراف یک ساختمان می تواند اثرات مصیبت باری داشته باشد و باعث خسارت و خرابی ساختمان و همچنین، صدمات جانی ساکنین گردد. البته، این اثر بر روی ساختمان های مسکونی به مراتب مخرب تر خواهد بود، چرا که، این سازه ها فقط در برابر نیروی زلزله طراحی می گردند. از آنجایی که استفاده از سازه های بتنی و سامانه های قاب خمشی بتن مسلح در ساختمان های امروزی کاربرد بیشتری پیدا کرده است؛ همچنین، ستون ها به عنوان مهم ترین عضو سازه در برابر بارگذاری انفجاری می باشند. بر این اساس، هدف از این تحقیق، بررسی دقیق رفتار ستون بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری و مقاوم سازی آن ها می باشد. به این منظور، ابتدا، شبیه سازی انفجار و مدل سازی ستون های بتن مسلح توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته و صحت روش مدل سازی ارائه شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس، با انجام تحلیل های دینامیکی غیر خطی، به مقایسه ستون های تقویت شده و بدون تقویت تحت اثر انفجار از لحاظ پارامترهای بیشینه تغییر مکان و مقادیر تنش در میلگردهای فولادی، پرداخته شده است. همچنین، با بررسی انواع حالت های استفاده از ورق های FRP، هدف، انتخاب بهترین حالت مقاوم سازی و بهینه کردن آن بوده است.

کلید واژه ها: بارگذاری انفجاری، مقاوم سازی، ستون بتن مسلح، تحلیل دینامیکی غیر خطی، ورق های FRP

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه کردستان، Email:m.esmaeilnia@uok.ac.ir- نویسنده مسئول

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه کردستان

۱- مقدمه

امروزه با افزایش ناآرامی‌ها و احتمال گسترش اقدامات تروریستی، بایستی مطالعات بیشتری در مورد رفتار سازه‌ها در برابر انفجار صورت گیرد. اگرچه، به دلیل ماهیت پویای تهدیدات، هیچ‌گاه نمی‌توان سازه‌های کاملاً مقاوم در برابر انفجار ساخت ولی، می‌توان از شدت و دامنه خسارات وارده کاست. پدافند غیرعامل، برای مقابله با این تهدیدات به‌عنوان یک راهکار ارائه شده است. پدافند غیرعامل، مجموعه‌ای از اقدامات غیرمسلحانه است که موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروهای انسانی، تاسیسات، سرمایه‌ها و ... در مقابل حملات مخرب دشمن می‌شود.

با این‌که وقوع بارهای شدیدی همانند انفجار در سازه‌های معمولی به‌ندرت اتفاق می‌افتد، اثرات ناشی از آن می‌تواند موجب خرابی ناگهانی سازه و عواقب فاجعه‌آمیز پس از آن گردد. این خرابی یا به‌صورت خرابی موضعی اعضای سازه‌ای بوده و یا تخریب کلی یا بخشی از سازه به صورت انهدام پیش‌رونده است که عامل اصلی تلفات در زمان حوادث انفجار می‌باشد. علت اصلی انهدام پیش‌رونده سازه‌های ساختمانی، تخریب ستون‌های آن است. امروزه با گسترش تأسفات حملات تروریستی، تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز توسعه یافته است و آیین‌نامه‌های متعددی توسط مراجع مختلف برای تحلیل و طراحی انفجاری ارائه شده است. از طرفی با پیدایش مصالح نوین، گسترش کاربرد آن‌ها در مهندسی عمران و افزایش کاربری آن‌ها در مقاوم‌سازی سازه‌های موجود، چشم‌انداز جدیدی در جهت مقابله با این وقایع فراهم شده است.

تحلیل اثر بارگذاری انفجار بر روی سازه‌ها از دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. در سال ۱۹۵۹ ارتش آمریکا، نشریه‌ای تحت عنوان "سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجارهای تصادفی" منتشر کرد. ویرایش‌های بعدی این اثر با عنوان TM 5-1300 در ۱۹۹۰ و UFC 3-340-02 در ۲۰۰۸ ارائه گردید [۱].

کراوفورد و همکاران در سال ۱۹۹۷ به بررسی ستون‌های تقویت‌شده توسط ورق‌های FRP پرداختند. ایشان در این مطالعه که به‌صورت تجربی انجام گرفت، اثر روش مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح توسط ورق‌های FRP را بررسی نمودند [۲].

لوچینیکی از پژوهشگرانی است که در زمینه انفجار مطالعات بسیاری انجام داده است. وی در سال ۲۰۰۶ به‌همراه لویگ، رفتار دال بتنی را تحت اثر بار انفجار بررسی نمود. در این تحقیق، او ابتدا به‌صورت آزمایشگاهی دال بتنی را تحت اثر بار انفجاری قرار دادند و سپس نتایج به‌دست آمده را با مدل‌سازی توسط نرم‌افزارهای ABAQUS و ANSYS مقایسه نمودند و پس از نمایش صحت

مدل‌سازی، کوشیدند رابطه بین قطر حفره ناشی از انفجار، وزن مواد منفجره و محل انفجار ارائه نمایند و در پایان مقایسه‌ای بین مدل‌ها و نرم‌افزارهای استفاده شده انجام داده و در هر مورد، نقاط ضعف و قوت آن‌ها را تشریح نمودند [۳].

شی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی نمودار فشار-ضربه و پیش‌بینی میزان خسارت ستون‌های بتنی تحت بارگذاری انفجار پرداخته و روش پیشنهادی خود را برای پیش‌بینی میزان خسارت ارائه نمودند [۴].

فیوض و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ رفتار سازه‌های فولادی و بتنی را با شکل‌ها و شرایط مختلف تحت اثر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان با مقایسه سازه‌های بتنی و فولادی تحت انفجار، عملکرد سازه‌های بتنی را مناسب‌تر ارزیابی نمودند. همچنین در مورد اثر شکل سازه‌ها، سازه‌هایی که سطوح عمود بر انفجار کمتری دارند؛ عملکرد بهتری تحت انفجار از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، عملکرد سازه‌های کروی بهتر از سازه‌های مکعبی می‌باشد [۵].

آستاری اوکلو و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح تحت ترکیبی از بارمحوری و بارعرضی انفجار پرداختند. ایشان یک مدل تک‌درجه آزادی توسعه یافته برای بررسی رفتار ستون بتن مسلح تحت انفجار معرفی کرده‌اند. طبق نتایج، میزان بارمحوری در رفتار ستون بتن مسلح تحت انفجار بسیار مهم بوده به‌گونه‌ای که، حتی اگر بارمحوری نصف بارمحوری بحرانی ستون باشد، موجب کاهش شدید ظرفیت آن در برابر بارعرضی انفجار می‌شود [۶].

آرلری و همکاران در سال ۲۰۱۳ به شبیه‌سازی عددی ستون بتنی و بررسی میزان خسارت و کاهش ظرفیت باربری ستون تحت بار انفجار پرداختند. در این تحقیق، یک روش عددی برای شبیه‌سازی رفتار ستون مسلح بتنی تحت میدان انفجار نزدیک و تخمین ظرفیت باقی‌مانده باربری ارائه شد. ایشان با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نشان دادند که از بین پارامترهای تغییر یافته ضخامت ستون، شعاع وزن خرج انفجار و نسبت فاصله رویارویی به این شعاع مهم‌ترین اثرات را داشته‌اند؛ ارتفاع، عرض و مقاومت فشاری بتن در ستون، اثر کمتری بر پاسخ انفجاری دارند. همچنین، با ارائه فرمولی تجربی میزان خسارت بتن را پیش‌بینی نمودند [۷].

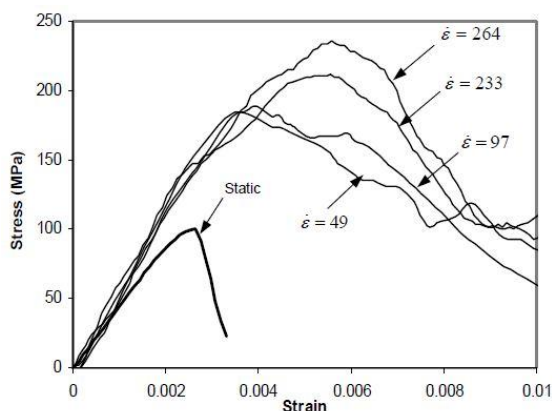
لی و هائو در سال ۲۰۱۴ به بررسی عددی خردشدن ستون‌های بتنی تحت بار انفجار پرداختند. در این تحقیق یک مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شد و در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی گردید. آن‌ها با یک شبیه‌سازی قوی به بررسی پارامترهای مختلف

آنجایی که اثر برش عرضی در این المان لحاظ شده است، می‌توان برای مدل‌های با ساختار باریک و ضخیم از آن استفاده نمود [۹].

۲-۲- رفتار مصالح در نرخ کرنش بالا

بارهای انفجاری معمولاً نرخ‌های کرنش بسیار بالایی را در محدوده ۱۰۲s-1 الی ۱۰۴s-1 ایجاد می‌کنند. این نرخ بارگذاری بالا، خصوصیات مکانیکی-دینامیکی سازه‌های هدف را تغییر داده که بر اساس آن، مکانیزم‌های خسارت مورد انتظار نیز برای اجزاء مختلف سازه تغییر می‌کنند. برای در نظر گرفتن تأثیر افزایش مقاومت مصالح با نرخ کرنش سریع، ضریب افزایش دینامیکی (DIF)، به مقادیر مقاومت استاتیکی اعمال می‌شود. این ضریب به ماهیت نوع تنش بستگی دارد. تنش‌های خمشی خیلی سریع شکل می‌گیرند، درحالی‌که، برش‌ها با تأخیر بیشتری به دلیل نرخ کرنش پایین در برش رخ می‌دهد. مقادیر نرخ کرنش برای کشش و فشار در اعضای بتنی و فولادی کمتر از حالت خمشی است و لذا ضریب افزایش دینامیکی کمتری دارند [۱۰].

خصوصیات مکانیکی بتن تحت شرایط بارگذاری دینامیکی بسیار متفاوت از بارگذاری استاتیکی می‌باشد. تنش‌های حاصل از بارگذاری دینامیکی در یک دوره خاصی از زمان می‌تواند بسیار بیشتر از تنش‌های استاتیکی باشد. در شکل (۱) تفاوت منحنی تنش-کرنش بتن در نرخ‌های بارگذاری مختلف را نشان می‌دهد [۱۸].



شکل ۱- منحنی‌های تنش-کرنش بتن در نرخ‌های کرنش مختلف [۱۰]

ضرایب افزایش دینامیکی مقاومت بتن به میزان چهار برابر در فشار و تا شش برابر در کشش برای نرخ‌های کرنش در محدوده s-۱ تا ۱۰۲s-1 و همچنین مقاومت تسلیم نهایی فولاد تا ۵۰ درصد افزایش، گزارش شده است.

ضرایب افزایش دینامیکی مصالح را می‌توان از معادلات پیشنهادی که محققین پیشین ارائه نمودند، به‌دست آورد.

ستون تحت بار انفجار پرداختند و مشاهده کردند که میزان خرد شدن بتن به فاصله محل انفجار، میزان سختی ستون بتنی و شرایط مرزی بستگی دارد. اگرچه عمق ستون و نحوه آرماتورگذاری هم در میزان خرابی تأثیر به‌سزایی دارد، به‌طوری‌که با افزایش عمق ستون و آرماتورها میزان خرابی کمتر می‌شود [۸].

مقاوم‌سازی قاب‌های ساختمانی موجود در برابر بارهای احتمالی حاصل از انفجار خارجی، یکی از دغدغه‌های موجود در بهبود عملکرد سازه‌ها می‌باشد. ستون‌های طبقات زیرین ساختمان‌ها، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین المان سازه‌ای محسوب شده که می‌تواند به‌طور مستقیم تحت تأثیر بارهای حاصل از انفجار قرار گیرد. خرابی یک یا چند ستون در ساختمان، می‌تواند موجب بروز پدیده مهلک تخریب پیش‌رونده شود. به‌طور کلی، رفتار ستون‌ها در برابر بارهای دینامیکی شدید از جمله انفجار، در مقایسه با اعضای سازه‌ای دیگر نظیر تیرها و دال‌ها، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از طرف دیگر، روش مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی با پوشش‌های FRP یکی از روش‌های متداول مقاوم‌سازی در برابر زلزله است و باید میزان تأثیر آن بر بهبود رفتار ستون تحت بارهای انفجار، بررسی گردد.

۲- روش پژوهش

در این تحقیق روش مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به‌کار گرفته شده است. همچنین جهت انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، با توجه به ماهیت بارهای انفجاری، از روش تحلیل صریح^۱ استفاده شده است.

۲-۱- نوع المان مورد استفاده

جهت مدل‌سازی بتن از المان‌های ۸ گرهی (C3D8R) توپر استفاده می‌شود که این نوع المان قابلیت لحاظ کردن تغییر شکل‌های پلاستیک و ترک‌خوردن در سه جهت متعامد در هر نقطه انتگرال‌گیری را دارا می‌باشد [۹].

جهت مدل‌سازی میلگردهای فولادی از المان‌های دوگره‌ای 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 [۹].

همچنین کامپوزیت‌های FRP با استفاده از المان‌های پوسته‌ای (S4R)، مدل‌سازی شده‌اند. المان پوسته چهارگره‌ای چندمنظوره، قابلیت کاهش دادن نقاط انتگرال‌گیری برای به‌حداقل رساندن محاسبات و در نتیجه کاهش زمان تحلیل را دارا می‌باشد. از

ضرایب افزایش دینامیکی برای کامپوزیت‌های FRP لحاظ نشده است.

۳-۲- بارگذاری

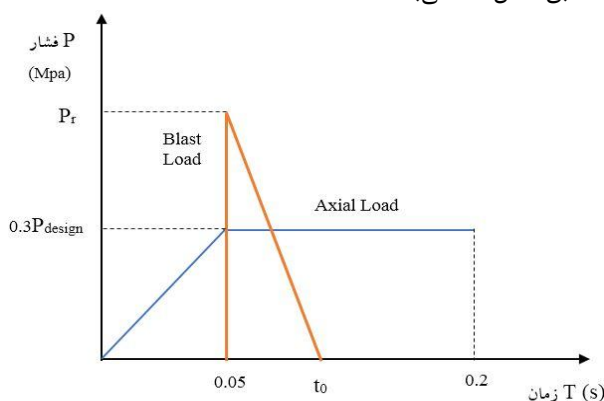
در این پژوهش ستون‌های مورد نظر تحت دو نوع بار، بار محوری اولیه و بار انفجار بررسی شده‌اند. بار محوری اولیه و ثابتی از همان ابتدای تحلیل به ستون‌ها وارد می‌شود که در حدود ۰/۳ ظرفیت محوری اسمی آن می‌باشد (بار محوری در شرایط بهره‌برداری).

همچنین، بار انفجار به دو پارامتر زمان و مکان وابسته است. برای معادل‌سازی بار انفجار فاصله‌ی مقیاس‌شده (Z) به صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد [۱۰].

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

در این رابطه R فاصله مرکز انفجار از نقطه مورد نظر (فاصله رویارویی) و W جرم معادل TNT ماده منفجره (وزن خرج) می‌باشد.

در این پژوهش کلاً انفجارهای دور مورد مطالعه قرار گرفته است و از بررسی انفجارهای نزدیک و یا تماسی خودداری شده است. بر همین اساس، برای ساده‌سازی و کاهش زمان عملیات شبیه‌سازی رایانه‌ای مدل‌ها از وابستگی مکانی بارگذاری صرف‌نظر شده و تنها به توزیع زمانی بار پرداخته شده است. به عبارت دیگر، توزیع فشار ناشی از انفجار به صورت یک فشار یک‌نواخت ولی تابع زمان بر روی سطح ستون فرض می‌شود. این امر را می‌توان با استناد به آیین‌نامه انفجار UFC مورد قبول دانست. برطبق این آیین‌نامه که در انفجارهای دور می‌توان اثر بار انفجار را به صورت فشار یک‌نواخت بر روی سازه در نظر گرفت [۱]. نحوه بارگذاری و زمان‌بندی آن در این پژوهش مطابق شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۲- نحوه اعمال بارگذاری در پژوهش حاضر

۴-۲- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی مدل‌سازی در این پژوهش از نتایج مطالعه تجربی کراوفورد و همکاران در سال ۱۹۹۷ که بر روی ستون‌های

CEB-FIP در سال ۱۹۹۰ روابط زیر را برای ضرایب افزایش دینامیکی بتن در فشار ارائه نمود [۱۰].

$$CDIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1.026\alpha} \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \quad (1)$$

$$CDIF = \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1/3} \quad \text{for } \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

که در این روابط $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، $\dot{\epsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی که برابر s-۱ $10^{-6} \times 3 \times 10^{-2}$ ، $\log \gamma = 6.156\alpha - 2$ ، $\alpha = 1/(5 + 9 f_{cs}/f_{c0})$ ، f_{cs} و $f_{c0} = 10 \text{ Mpa} = 1450 \text{ Psi}$ مقاومت فشاری استاتیکی می‌باشند.

مالوار و همکاران در سال ۱۹۹۸ روابط زیر را برای بتن در کشش ارائه نمودند [۱۱].

$$TDIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1.016\delta} \quad \text{for } \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

$$TDIF = \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s}\right)^{1/3} \quad \text{for } \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

که در این روابط $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، $\dot{\epsilon}_s$ نرخ کرنش استاتیکی که برابر s-۱ $10^{-6} \times 3 \times 10^{-2}$ ، $\log \beta = 7.11\delta - 2.33$ و $\delta = 1/(10 + 6 f_{cs}/f_{c0})$ ، f_{cs} و $f_{c0} = 10 \text{ Mpa} = 1450 \text{ Psi}$ مقاومت فشاری استاتیکی می‌باشند [۱۱].

همچنین برای ضرایب افزایش دینامیکی فولاد در بارگذاری انفجاری رابطه (۵) را پیشنهاد نمودند [۱۲].

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}}\right)^{\alpha} \quad (5)$$

که در آن مقادیر α برای تنش تسلیم و نهایی فولاد $\alpha_{fy} = 0/074 - 0/04(f_y/414)$ و $\alpha_{fu} = 0/019 - 0/009(f_y/414)$ می‌باشند [۱۲].

در این تحقیق، در قسمت اعتبارسنجی مدل که نیاز به پیش‌بینی رفتار مصالح به صورت واقعی و دقیق می‌باشد، از این روابط مذکور استفاده شده است. لیکن، در قسمت مطالعه پارامتری از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه UFC استفاده شده است.

کامپوزیت‌های FRP مصالح نوینی هستند که امروزه در مقاوم‌سازی سازه‌ها استفاده می‌شوند، به همین دلیل، هنوز مطالعات کاملی در این حوزه صورت نگرفته است. رفتار این نوع مصالح در بارگذاری‌های با نرخ کرنش بالا، آن‌چنان بررسی نشده و منابع و آیین‌نامه‌ها نیز هیچ‌گونه رابطه یا مقادیری برای ضرایب افزایش دینامیکی FRP ارائه نداده‌اند. در این تحقیق نیز جهت اطمینان

در جدول‌های بالا E1 مدول طولی، E2 مدول عرضی، ν_{12} ضریب پواسون داخلی، G12 مدول برش داخلی و G23 مدول برشی خارجی؛ همچنین، σ_{11} مقاومت طولی، σ_{22} مقاومت عرضی و τ_{12} مقاومت برشی داخلی ورق‌های FRP می‌باشند.

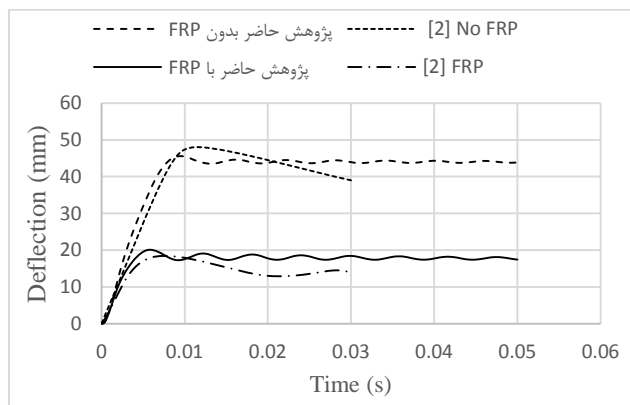
جهت اعمال اثر نرخ کرنش بالا و اعمال ضرایب افزایش دینامیکی که از اهمیت بالایی برخوردار هستند، در این مدل ابتدا، با به‌دست آوردن نرخ کرنش $\dot{\epsilon}$ برای تحلیل دینامیکی غیرخطی این مدل برابر $S-1 = 339/4 \dot{\epsilon}$ و جاگذاری مقدار آن در روابط (۲)، (۴) و (۵)؛ مقادیر ضرایب دینامیکی واقعی برای این مدل مطابق جدول (۵) حاصل می‌شوند.

جدول ۵- ضرایب دینامیکی بتن و فولاد حاصل شده برای

مدل مرجع [۲]

DIF	تنش
۳/۳۲	بتن در فشار
۳/۸۵	بتن در کشش
۱/۶۴	تنش تسلیم میلگردهای طولی
۱/۱۵	تنش نهایی میلگردهای طولی

پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بر روی ستون تقویت‌شده و بدون تقویت در این آزمایش تحت انفجار مورد نظر، نتایج نشان داده شده در شکل (۴) و جدول (۶) حاصل شده است.

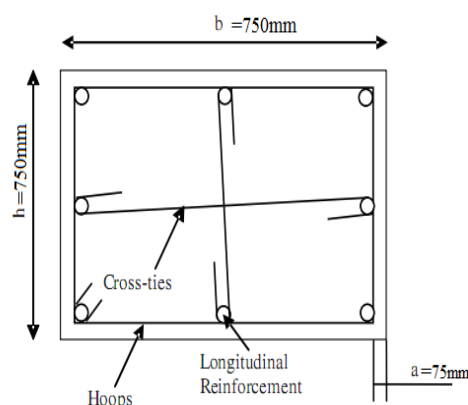


شکل ۴- مقایسه منحنی تغییرمکان- زمان پژوهش حاضر با مرجع [۲]

جدول ۶- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج مرجع [۲]

تغییرمکان بیشینه (mm)	نوع مطالعه	ستون بدون تقویت
۴۸	تجربی مرجع [۲]	ستون تقویت‌شده
۴۵/۵	تحلیل عددی پژوهش حاضر	
۱۸	تجربی مرجع [۲]	ستون تقویت‌شده
۲۰	تحلیل عددی پژوهش حاضر	

تقویت‌شده و بدون تقویت انجام دادند، استفاده شده است. در این مطالعه ستون بتنی تحت فشار معادل $17/2$ مگاپاسکال که ناشی از انفجار 682 کیلوگرم TNT در فاصله $6/1$ متری قرار گرفته است. در این ستون که به طول 3650 میلی‌متر و ابعاد 750×750 میلی‌متر می‌باشد، از 8 میلگرد طولی به‌صورت یک‌نواخت با قطر 32 میلی‌متر و 9 میلگرد عرضی با قطر 10 میلی‌متر با فواصل 450 میلی‌متری از هم، استفاده شده است. جزئیات هندسه و آرایش میلگردهای آن در شکل (۳) نشان داده شده است [۲].



شکل ۳- هندسه و آرایش آرماتورهای ستون مورد آزمایش در مرجع [۲]

خصوصیات مصالح ستون مورد مطالعه در جدول‌های (۴-۱) به‌طور کامل نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات مصالح بتن [۲]

vc	Ec (Gpa)	fc (Mpa)	ρ (kg/m3)
۰/۲	۲۹	۳۴/۵	۲۴۰۰

جدول ۲- خصوصیات مصالح فولاد [۲]

vs	Es (Gpa)	fu (Mpa)	fy (Mpa)	ρ (kg/m3)
۰/۳	۲۰۰	۶۲۰	۴۲۰	۷۸۰۰

در جدول‌های بالا، ρ چگالی، f_c مقاومت فشاری بتن، f_c تنش تسلیم فولاد، f_c تنش نهایی فولاد، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون می‌باشند.

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی ورق‌های FRP مرجع [۲]

G23 (Gpa)	G12 (Gpa)	ν_{12}	E2 (Gpa)	E1 (Gpa)	چگالی (kg/m3)
۲/۲۴	۵/۲۵	۰/۲	۹/۶۵	۱۳۸	۱۵۸۰

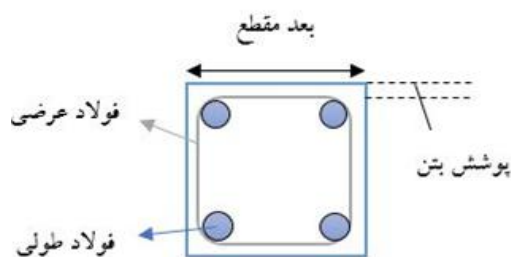
جدول ۴- مقادیر تنش فروپاشی ورق‌های FRP مرجع [۲]

کششی	فشاری	کششی	فشاری	برشی
σ_{11} (Mpa)	σ_{11} (Mpa)	σ_{22} (Mpa)	σ_{22} (Mpa)	τ_{12} (Mpa)
۲۲۸۰	۱۴۴۰	۵۷	۲۲۸	۷۱

می‌شود. سپس در قسمت بعد، انواع حالت‌های پوششی ورق‌های FRP، جهت تقویت ستون‌ها، بررسی شده است.

۳-۱- نرخ بارگذاری انفجار

جهت بررسی روش مقاوم‌سازی با ورق‌های FRP دو نمونه ستون بتن مسلح بدون تقویت و تقویت‌شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. جزئیات و ویژگی‌های مصالح ستون بررسی‌شده در این پژوهش مطابق شکل (۵) و جدول (۷) می‌باشد.



شکل ۵- هندسه ستون مورد بررسی در این پژوهش

با مقایسه نتایج مدل‌سازی انجام گرفته و مطالعه تجربی، صحت مدل‌سازی صورت گرفته مشاهده می‌شود. با بررسی دقیق نتایج بیشینه تغییر مکان‌ها، میزان درصد خطا به ترتیب برای نمونه بدون تقویت و تقویت‌شده، ۵/۲ و ۱۱/۱۱ درصد می‌باشد. تفاوت ناچیز موجود در نتایج و منحنی‌های تغییر شکل به دلایلی از قبیل خطاهای جزئی در مدل‌سازی مانند سائز شبکه‌ها، خطاهای حل عددی، همچنین تفاوت در انتخاب دقیق ضرایب افزایش دینامیکی (DIF) و مشخص نبودن دقیق زمان تداوم انفجار در نمونه‌های بررسی‌شده می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش قبل مشاهده شد، مدل‌سازی انجام گرفته در این پژوهش اعتبارسنجی گردید. اکنون با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی ابتدا با اعمال سه نرخ بارگذاری انفجار بر روی نمونه‌های تقویت‌شده و بدون تقویت، میزان تأثیر مقاوم‌سازی ستون توسط ورق‌های FRP در بهبود عمل‌کرد آن‌ها تحت انفجار ارزیابی

جدول ۷- مشخصات هندسی و مصالح ستون مورد بررسی در این پژوهش

مشخصات هندسی (mm)						
فولاد عرضی	فولاد طولی	پوشش بتن	بعد مقطع مربعی	طول دهنه		
φ۱۰ @ ۳۰۰	۴φ۲۰	۵۰	۳۰۰	۳۰۰۰		
مشخصات بتن						
Ec (Gpa)	vc	fc (Mpa)	چگالی (kg/m3)			
۲۵	۰/۲	۳۰	۲۴۰۰			
مشخصات فولاد						
فولاد عرضی (Mpa)		فولاد طولی (Mpa)		ES (Gpa)	vS	چگالی (kg/m3)
fu	fy	fu	fy	۲۰۰	۰/۳	۷۸۵۰
۳۶۰	۲۴۰	۵۰۰	۳۴۰			

جدول ۹- مقادیر تنش فروپاشی ورق‌های CFRP [۱۳]

برشی	فشاری	کششی	فشاری	کششی
τ12 (Mpa)	σ22 (Mpa)	σ22 (Mpa)	σ11 (Mpa)	σ11 (Mpa)
۶۸	۲۴۶	۴۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش، اثر انفجارهای نسبتاً دور بررسی می‌شود. بر این اساس مطابق آیین‌نامه UFC، فاصله مقیاس شده بایستی بیشتر از مقدار از $Z=1 \text{ ft/Ib}^{1/3} = 0.39 \text{ m/kg}^{1/3}$ باشد [۱]. بنابراین، انفجارهای انتخاب‌شده با فرض فاصله ثابت ۴ متری از سازه و تغییر مقادیر وزن ماده منفجره مطابق جدول (۱۰) اختیار شده‌اند.

در این پژوهش، رفتار ستون‌ها تحت بارگذاری انفجار خمشی بوده، بر این اساس، ضریب افزایش دینامیکی (DIF) مطابق آیین‌نامه UFC مقادیر ۱/۲ برای بتن و تنش تسلیم فولاد و ۱/۰۵ برای تنش نهایی فولاد اتخاذ شده است [۱].

در این قسمت برای تقویت ستون‌ها از ورق‌های کامپوزیتی متشکل از رزین اپوکسی و الیاف از جنس کربن (T300) استفاده شده است. ضخامت ورق‌ها ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده و خصوصیات مصالح آن مطابق جدول‌های (۸-۹) می‌باشد.

جدول ۸- خصوصیات مکانیکی ورق‌های CFRP [۱۳]

G23 (Gpa)	G12 (Gpa)	v12	E2 (Gpa)	E1 (Gpa)	چگالی (kg/m3)
۳/۲۴	۷/۱۷	۰/۲۸	۱۰/۳	۱۸۱	۱۶۰۰

مطابق الگوی شکل (۲) بوده و بار انفجار آن ۲/۷۵ مگاپاسکال (معادل ۱۸/۹۶ کیلوگرم TNT) در فاصله ۴ متر می‌باشد. در این نمونه‌ها جهت مقایسه دقیق عملکرد، میزان CFRP مصرفی ثابت در نظر گرفته شده است. به نحوی که با تغییر ضخامت ورق‌ها، در مجموع CFRP مصرفی برای نمونه‌ها ثابت فرض شده است. حالت‌های تقویت‌شده این قسمت به شرح زیر است:

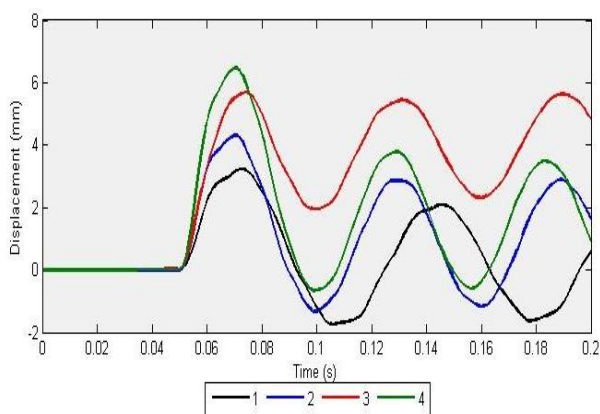
- تقویت ستون به‌طور کامل به‌صورت دورپیچ (با ضخامت ۳ میلی‌متر)

- تقویت سطح مقابل به انفجار (با ضخامت ۱۲ میلی‌متر)

- تقویت سطح پشت به انفجار (با ضخامت ۱۲ میلی‌متر)

- تقویت سطوح جانبی انفجار (با ضخامت ۶ میلی‌متر)

جهت مقایسه نمونه‌ها از نمودارهای تاریخچه پاسخ تغییر شکل که معیار خوبی جهت سنجش عمل‌کرد ستون‌ها در این بخش می‌باشد، استفاده شده است (شکل ۶).



شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای حالت‌های مختلف تقویت ستون بتن مسلح تحت انفجار با ورق CFRP

مطابق نتایج این قسمت روش تقویت کامل (دورپیچی) بهترین روش در تقویت ستون با حداکثر تغییر مکان ۳ میلی‌متر می‌باشد. از نظر اجرایی و همچنین از لحاظ جداسازی در خرابی‌ها نیز این حالت تقویت بهترین حالت می‌باشد. با مقایسه‌ی حالت‌های ۲، ۳ و ۴ می‌توان دریافت، سطح مقابل به انفجار مهمترین وجه ستون و نسبت به دیگر سطح‌ها و سپس، سطح پشت به انفجار و بعد از آن، سطوح جانبی از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشند. سطح مقابل به انفجار در معرض فشار انفجاری قرار دارد به همین دلیل، مهمترین وجه ستون تحت انفجار می‌باشد. سطح پشت به انفجار نیز به دلیل این‌که، در رفتار خمشی ستون نسبت به انفجار تنش‌های کششی شدیدی را تجربه می‌کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

جدول ۱۰- سه نرخ انفجار در نظر گرفته شده در این پژوهش

شماره انفجار	TNT (kg)	Z (m/kg ^{1/3})	Pr (Mpa)	t0 (ms)
۱	۱۵/۶۲۵	۱/۶	۲/۰۶۷	۴/۸۸
۲	۲۹/۱۳	۱/۳	۳/۴۴۵	۶/۴
۳	۶۴	۱	۶/۸۹	۷/۰۹

مقادیر Pr و t0 حداکثر فشار بازتابی انفجار و مدت زمان تداوم آن می‌باشند که براساس آیین‌نامه UFC اتخاذ شده‌اند.

با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی بر روی نمونه‌های بدون تقویت و تقویت‌شده تحت این سه نرخ بارگذاری انفجار مشاهده می‌شود که ستون بدون تقویت در انفجار ۲ به‌طور کامل وارد ناحیه پلاستیک شده و قادر به تحمل انفجار ۳ نبوده است. لیکن، ستون تقویت‌شده هر سه نرخ انفجار را تحمل نموده و تغییر شکل‌های قابل قبولی را داشته است. مقادیر بیشینه تغییر مکان (X_m) و حداکثر تنش کششی موجود در میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۱۱- مقادیر بیشینه تغییر مکان و حداکثر تنش فولاد

شماره انفجار	حداکثر تنش کششی (Mpa)		X_m (mm)
	فولاد طولی	فولاد عرضی	
ستون بدون تقویت			
۱	۱۶۷	۲۴۷	۲۷
۲	۴۹۵	۳۷۰	۱۷۷/۲
۳	-	-	-
ستون تقویت‌شده			
۱	۶۰	۱۵	۲
۲	۶۷	۵۱	۴/۹۲
۳	۳۱۵	۲۹۴	۱۵/۹۴

نتایج جدول بالا حاصل از انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی توسط نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus می‌باشند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اثر مثبت مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح با استفاده از ورق‌های FRP به‌وضوح دیده می‌شود.

۳-۲- تقویت ستون در جهت‌های مختلف

در این بخش با بررسی قرارگیری ورق‌های FRP در جهت‌ها و مکان‌های مختلف ستون بتن مسلح، در پی انتخاب بهترین حالت پوشاندن ستون‌ها می‌باشد.

جهت بررسی این موضوع ستون بتن مسلح معرفی‌شده در قسمت قبل (جدول ۷) توسط CFRP‌های جدول ۸ و ۹ در ۴ حالت مختلف تقویت شده و بررسی می‌گردد. بارهای وارد بر نمونه‌ها

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل سازی اجزای محدود، رفتار ستون و مقاوم سازی با ورق های FRP تحت بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کمبود نتایج تجربی و هزینه های بالای کارهای تجربی در زمینه انفجار، امروزه استفاده از مدل سازی های عددی با استفاده از نرم افزارهای کاربردی در این حوزه روش مطلوبی است که بایستی هرچه بیشتر از آن استفاده شود و سعی در افزایش دقت و واقعی نمودن مدل سازی ها گردد. با انجام تحلیل های دینامیکی غیرخطی در این پژوهش نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- مدل تحلیلی کامل برای ستون بتنی تقویت شده با ورق های FRP تحت بار انفجار ارائه گردید و مشاهده شد که تطابق خوبی با نتایج تجربی پیشین دارد.
- ۲- مقاوم سازی با استفاده از ورق های FRP تاثیر قابل توجهی در کاهش تغییر مکان ستون و تنش در میلگردهای فولادی داشته است.
- ۳- با افزایش نرخ بارگذاری اثر بهبود عمل کرد ستون های تقویت شده، افزایش می یابد.

۴- در بین سطوح مختلف ستون تحت انفجار سطح مقابل به انفجار از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد و سطوح پشت و جوانب انفجار، به ترتیب از اهمیت کمتری برخوردار می باشند.

۴- منابع

1. Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-02), "Structure to Resist the Effects of Accidental Explosion," U.S. Army Corps of Engineers, 2008.
2. J. E. Crawford, L. J. Malvar, J. W. Wesevich, J. Valancius, and A. D. Reynolds, "Retrofit of reinforced concrete structures to resist blast effects," ACI Structural Journal, vol. 94, pp. 371-377, 1997.
3. B. M. Luccioni and M. Luege, "Concrete pavement slab under blast loads," International Journal of Impact Engineering, vol. 32, pp. 1248-1266, 2006.
4. Y. Shi, H. Hao, and Z. X. Li, "Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads," International Journal of Impact Engineering, vol. 35, pp. 1213-1227, 2008.
5. فیوض، مجتهدپور، توکلی زاده، بررسی تاثیر مصالح و شکل سازه بر روی عملکرد سازه در برابر انفجار، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت، ۱۳۸۸.
6. S. Astarlioglu, T. Krauthammer, D. Morency, and T. P. Tran, "Behavior of Reinforced Concrete Columns under Combined Effects of Axial and Blast-Induced Transverse Loads," Engineering Structures, vol. 55, pp. 26-34, 2013.

7. 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 Detonations," VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2013.
http://framcos.org/FraMCoS-8/p619.pdf
8. J. Li and H. Hao, "Numerical study of concrete spall damage to blast loads," International Journal of Impact Engineering, vol. 68, pp. 41-55, 2014.
9. P. Kmiecik and M. Kamiński, "Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration," Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 11, pp. 623-636, 2011.
10. T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay "Blast loading and blast effects on structures-an overview," Electronic Journal of Structural Engineering, vol. 7, pp. 76-91, 2007.
11. L. J. Malvar and J. E. Crawford, "Dynamic increase factors for concrete," DTIC Document, 1998.
12. L. J. Malvar and J. E. Crawford, "Dynamic increase factors for steel reinforcing bars," In Proceedings of the Twenty-Eighth DoD Explosives Safety Seminar, 1998.
13. L. P. Kollár and G. S. Springer, "Mechanics of composite structures," Cambridge university press, 2003.

Retrofitting of Reinforced Concrete Columns under the Blast Using Fiber-Reinforced Plastic Wraps

M. Esmailnia Omran^{*}, M. Mahmoudi

Abstract

Explosion caused by massive and congested explosives around a building can have catastrophic effects, causing damage and destruction to buildings, as well as injuries to residents. However, the effect on residential buildings will be far more devastating because these structures are designed only against the force of an earthquake. Using concrete structures and reinforced concrete moment frame systems in modern building is being more common nowadays. Also columns are the most important structural elements against blast loading. According to these facts, the aim of this study is investigating RC columns' behavior precisely and retrofitting them under the blast loading.

At first, the blast simulation and modeling of RC columns have been presented by ABAQUS finite element software and the accuracy of the presented modeling method is evaluated using experimental results. Then, by applying nonlinear dynamic analysis, reinforced and unreinforced columns are compared based on the maximum deflection parameters and stress values in rebar. Various forms of the FRP wraps are tested, during the finite element modeling, in order to find the best retrofitting strategy.

Key Words: *blast loading, retrofitting, RC column, nonlinear dynamic analysis, FRP wraps*

^{*} University of Kurdistan, (m.esmailnia@uok.ac.ir) - Writer-in-Charge