

ارزیابی خسارت ستون‌های بتن آرمه تقویت‌شده با کامپوزیت‌های نوین الیافی تحت اثر بارهای انفجاری به کمک نمودارهای فشار - ضربه

هاشم جهانگیر^۱، محمدرضا معرف‌زاده^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده‌ی پدافند غیر عامل، تهران، ایران

چکیده

بارهای انفجاری به علت اعمال انرژی فراوان در زمانی کوتاه می‌توانند موجب شکست المان‌های اصلی سازه شوند و خرابی‌های جبران‌ناپذیری در پی داشته باشند. مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری می‌تواند راهکاری مناسب برای جلوگیری از چنین خرابی‌هایی باشد. از بین روش‌های مختلف مقاوم‌سازی، پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP)، به علت دارا بودن ویژگی‌های مکانیکی مناسب، نصبی آسان و نسبت مقاومت به وزن بالا، معمول‌ترین گونه از کامپوزیت‌ها هستند که برای تقویت و بهسازی کاربری‌های سازه‌ای استفاده می‌شوند. در سال‌های اخیر، به علت برخی از کاستی‌های کامپوزیت‌های FRP مانند مقاومت کم در برابر آتش، ناتوانی در اعمال بر روی سطح‌های مرطوب و در دماهای پایین، کامپوزیت‌های نوین پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف (FRCM)، به عنوان جایگزینی مناسب برای آن‌ها به حساب می‌آیند. در این مقاله، ستون‌های بتن‌آرمه به عنوان یکی از المان‌های اصلی سازه در برابر بارهای انفجاری، به کمک دو سامانه‌ی کامپوزیتی سنتی FRP و نوین FRCM مقاوم‌سازی شده است. رفتار ستون‌های تقویت‌شده به کمک این دو سامانه بر اساس منحنی‌های فشار - ضربه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که در بیشتر حالت‌های خسارت، کارایی ستون‌های تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM نسبت به ستون‌های تقویت‌شده با کامپوزیت‌های سنتی FRP مناسب‌تر است و می‌توان از این سامانه‌ی نوین تقویتی در برابر بارهای انفجاری بهره جست.

کلمات کلیدی: نمودار فشار - ضربه، برآورد خسارت، بارهای انفجاری، کامپوزیت‌های نوین الیافی، ستون‌های تقویت‌شده‌ی بتن‌آرمه.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

doi:	10.22065/jsce.2018.116964.1445	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
محمدرضا معرف‌زاده						
moarefzadeh@ihu.ac.ir						
*نویسنده مسئول:						
پست الکترونیکی:						

Damage Evaluation of RC Columns strengthened with Novel Fiber Composites under Blast Loads using Pressure – Impulse Diagrams

Hashem Jahangir¹, Mohammad Reza Moarefzadeh^{2*}

1- Ph.D. Student of structural engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Assistance Professor, Imam Hossein University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Blast loads may result Irretrievable damages in structures due to their high amount of applied energy to them during a short period of time. Strengthening and rehabilitation of the structures subject to these sort of loads would be a proper approach to mitigate these damages. Among the available approaches, use of composites so-called Fiber Reinforced Polymers (FRPs), because of their desire properties such as ease in installation and high strength to weight ratio, has been considered the most common solution in recent years. These composites, however, possesses some disadvantages such as low resistance against fire, low glass transition temperature, difficulties in application at low temperatures, impossibility of application on wet surfaces and lack of vapor permeability which have led to use innovative composite materials as alternative. These are normally made of cementitious matrix reinforced by continuous fibers (FRCM). These composites with cement based matrices have good mechanical performances, excellent resistance to high temperature and fire, and also good vapor permeability. Moreover, they can be applied on wet surfaces and in cases of low temperature. Therefore, FRCM materials may constitute an alternative to FRP materials for the strengthening of RC structures. In this paper, performance of RC columns which are subject to blast loading and strengthened with FRP and FRCM composites is investigated using Pressure-Impulse (P-I) diagrams. The results obtained in this study demonstrate that strengthening of structures by FRCM is more efficient in comparison to that of FRP in most cases of damages and therefore could be implemented to protect structures better against blast loads.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2017

Revise Date: 25 February 2018

Accept Date: 25 May 2018

Keywords:

Pressure–Impulse Diagram

Damage Evaluation

Blast Loads

Novel Fiber Composites RC
Strengthened Columns

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.116964.1445

*Corresponding author: Mohammad Reza Moarefzadeh

Email address: moarefzadeh@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

ارزیابی رفتار سازه‌ها در برابر بارهای ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی مانند انفجار همواره مورد توجه پژوهشگران قرار دارد. در مقایسه با بارهای زلزله و باد، تخمین دقیق بارهای انفجاری وارد شده بر سازه‌ها که بر اثر منفجر شدن اتفاقی یا بمب‌گذاری اتفاق می‌افتد، به علت وجود عامل‌های فراوانی که در انفجار نقش دارند، بسیار مشکل است و به‌طور معمول از ضریب اطمینانی بزرگ برای تحلیل سازه‌ها در برابر این گونه از بارها استفاده می‌شود. این امر می‌تواند باعث طراحی نادرست سازه در برابر بارهای انفجاری و برآورد نادرست عملکرد سازه در یک الگوی انفجاری ویژه شود. از طرف دیگر، بارهای انفجاری مدت زمان خیلی کوتاهی دارند و از این رو، به منظور وارد کردن انرژی حاصل از انفجار به الگوی عددی سازه باید از المان‌های به شدت کوچکی استفاده کرد. در نتیجه، الگوی عددی سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری نیازمند تعداد المان‌های بسیار می‌باشند که منجر به بالا رفتن زمان تحلیل دقیق خواهد شد. نمودارهای فشار - ضربه^۱ راهکاری مناسب برای کاستی‌های پیش روی تحلیل سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری خواهد بود [۱]. این نمودارها در بخش سوم معرفی خواهند شد.

رخداد بارهای انفجاری در نزدیکی سازه می‌تواند موجب شکست المان‌های اصلی آن مانند ستون، دال و دیوار برشی شود و شکست کلی سازه و ایجاد خرابی پیش‌رونده در سازه را به‌وجود آورد [۲]. برای جلوگیری از چنین خرابی‌هایی در سازه‌ها، باید المان‌های اصلی را در برابر بارهای ناگهانی مانند انفجار مقاوم‌تر کرد. از بین روش‌های مختلف تقویت و بهسازی، سامانه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف را می‌توان یکی از مهم‌ترین سامانه‌ها در بهبود رفتار سازه‌ها در برابر بارهای وارد بر آن‌ها دانست. پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، FRP^۲، معمول‌ترین گونه از سامانه‌های کامپوزیتی هستند که برای تقویت و بهسازی کاربری‌های سازه‌ای استفاده می‌شوند. نتیجه‌های بسیاری از پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌تواند به مقاوم‌سازی این المان‌ها کمک کند [۳ - ۵]. پایه^۳ کامپوزیت‌های FRP، چسبی^۴ از جنس مواد آلی^۵، به‌طور ویژه اپوکسی^۶، است که به کمک الیافی از جنس شیشه، کربن، آرامید یا بازالت^۷ تقویت می‌شوند. وزن کم، سختی بالا، مقاومت در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری، سرعت بالا در نصب و تغییرهای هندسی اندک را می‌توان از برتری‌های مقاوم‌سازی به کمک سامانه‌های FRP دانست [۶ - ۸]. برخی از پژوهش‌ها به کمک Karagozian و Case [۹] به بررسی روش‌های طراحی تقویت ستون‌های بتن‌آرمه به کمک کامپوزیت‌های FRP در برابر بارهای انفجاری پرداخته‌اند. این روش‌ها میزان مورد نیاز تقویت ستون‌ها را برای دستیابی به سطح عملکردی دلخواه ارایه می‌کنند. ستون‌های بتنی می‌توانند به کمک پوشش‌هایی از کامپوزیت‌های FRP، نوارهایی از آن‌ها در امتداد طولی و یا به‌صورت دورپیچ پوشانده شوند. نوارهای طولی به افزایش ظرفیت خمشی و دورپیچ‌ها به افزایش ظرفیت برشی ستون‌ها کمک می‌کنند. روش‌های طراحی ضخامت مورد نیاز ورق‌های FRP در هر یک از حالت‌های تقویت را نیز ارایه می‌دهند.

با وجود برتری‌های کامپوزیت‌های FRP، کاستی‌های این سامانه‌ها شامل، مقاومت کم در برابر آتش و قابلیت انتقال گرمایی اندک به علت جنس پلیمری بخش پایه، ناتوانی در اعمال بر روی سطح‌های مرطوب و در دماهای پایین، خطر مسمویت سمی برای افراد اجرا کننده و توانایی اندک در نفوذپذیری بخارها، پژوهش‌گران را بر آن داشت تا به دنبال جایگزینی برای مواد مرکب FRP باشند. استفاده از مواد مرکب با پایه‌ای از جنس مواد معدنی به عنوان جایگزین مواد آلی در پایه‌ی پلیمری مواد مرکب FRP، راه‌حل پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بود. از این رو، مواد مرکب با پایه‌ی سیمانی و در نتیجه کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف (FRCM)^۸، معرفی

¹ Pressure - Impulse

² Fiber Reinforced polymers

³ Matrix

⁴ Resin

⁵ Organic

⁶ Epoxy

⁷ Basalt

⁸ Fiber reinforced cementitious matrix

شدند [۱۰ - ۱۳]. در کامپوزیت‌های FRCM، الیاف به‌طور معمول در هم تنیده هستند و از مواد معدنی (غیرآلی)^۹ به‌جای چسب اپوکسی به‌عنوان پایه استفاده می‌شود. مواد معدنی به علت ویژگی‌ها و توانایی‌های خود شامل استقامت حرارتی بالا، مقاومت در برابر اشعه‌های فرابنفش، ایجاد تشعشع‌های اندک هنگام تولید و نصب [۱۴]، داشتن تجربه‌های مناسبی در مورد استفاده درست از آن‌ها، می‌توانند به‌عنوان پایه‌ی سامانه‌های FRCM مورد استفاده قرار گیرند. بخش دوم به معرفی ویژگی‌ها و برتری‌های این کامپوزیت‌ها نسبت به کامپوزیت‌های سنتی FRP می‌پردازد.

در این مقاله با تمرکز بر سازه‌های بتن‌آرمه به‌عنوان یکی از پرکاربردترین سیستم‌های سازه‌ای و هم‌چنین ستون‌ها به‌عنوان یکی از رکن‌های اصلی سازه در برابر بارهای انفجاری، به بررسی رفتار ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با دو گونه کامپوزیت FRP و FRCM با الیاف فولادی پرداخته خواهد شد. چگونگی و میزان خسارت در این المان‌ها در اثر بارهای انفجاری در قالب منحنی‌های فشار - ضربه ارزیابی می‌شود و تفاوت رفتار کامپوزیت‌های سنتی FRP و کامپوزیت‌های نوین FRCM به‌عنوان جایگزینی برای آن‌ها مقایسه خواهند شد.

۲- کامپوزیت‌های پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف (FRCM)

کامپوزیت‌های FRCM گونه‌ای نوین از کامپوزیت‌ها هستند که جایگزینی مناسب و کارآمد برای FRP‌ها محسوب می‌شوند. در این کامپوزیت‌ها، الیاف به‌طور معمول در هم تنیده هستند و از مواد معدنی (غیرآلی) به‌جای چسب اپوکسی به‌عنوان پایه استفاده می‌شود. مواد معدنی به علت ویژگی‌ها و توانایی‌های خود شامل استقامت حرارتی بالا [۱۰]، مقاومت در برابر اشعه‌های فرابنفش، ایجاد تشعشع‌های اندک هنگام تولید و نصب [۱۴]، داشتن تجربه‌های مناسبی در مورد استفاده درست از آن‌ها، می‌توانند به‌عنوان پایه‌ی سامانه‌های FRCM مورد استفاده قرار گیرند. نام‌های گوناگونی در پژوهش‌های مختلف بر اساس پایه‌های به‌کار رفته یا کاربرد آن‌ها برای این نوع از کامپوزیت‌ها در نظر گرفته شده‌اند. معمول‌ترین این نام‌ها، ملات تقویت‌شده با بافت‌های پارچه‌ای، TRM [۱۵ و ۱۶]، بتن تقویت‌شده با بافت پارچه‌ای، TRC

[۱۷ - ۲۳]، کامپوزیت‌های برپایه‌ی مواد معدنی، MBC [۲۴]، یا سیمان تقویت‌شده با الیاف، FRC [۲۵]، هستند. مواد مشابهی که برای بهسازی سازه‌های بنایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند با نام‌هایی مانند سامانه‌ی شبکه‌ای پایه‌ی سیمانی، CMG [۲۶ و ۲۷]، سامانه‌ی شبکه‌ای پایه‌ی معدنی، IMG [۲۸]، پایه‌ی سیمانی تقویت‌شده با الیاف کربنی، CFCM [۲۹]، اشاره شده‌اند. FRCM مخففی است که در حالت کلی برای پایه‌های سیمانی تقویت‌شده با الیاف به آن اشاره شده است. الیافی که در کامپوزیت‌های FRCM به کار می‌روند شامل کربن، شیشه، فولاد و PBO^{۱۰} هستند. الگوهای این الیاف به‌هم تنیده می‌تواند در قالب بافت پارچه‌ای یک‌سوی^{۱۱} و دوسوی^{۱۲} دسته‌بندی می‌شوند تا کارایی و میزان پیوستگی بین پایه‌ی سیمانی و الیاف را افزایش دهند. کارایی گونه‌های متفاوت الیاف در پژوهش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. الیاف کربنی در پژوهش‌های D'Ambrisi و همکاران [۳۰]، Tetta و همکاران [۳۱]، D'Antino و همکاران [۳۲] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. الیاف PBO نیز در پژوهش‌های Ombres [۳۳]، Loreto و همکاران [۳۴]، Babaeidarabad و همکاران [۳۵]، Tzoura و همکاران [۳۶]، و D'Antino و همکاران [۳۲] مطالعه شده‌اند. Elsanadedy و همکارانش [۳۷] و Santandrea و همکاران [۳۸] الیاف بازالت را مورد ارزیابی قرار دادند و الیاف شیشه‌ای، در پژوهش Bruckner و همکاران [۱۹]، Koutas و همکاران [۳۹]، بررسی شده‌اند. Carloni و همکارانش الیاف فولادی را مورد ارزیابی قرار دادند [۴۰]. مقایسه‌ای بین سامانه‌های مختلف FRCM با الیاف گوناگون در گزارش پژوهش‌های Weiland و همکارانش [۴۱] و پژوهش Libreros و همکارانش [۴۲] و D'Antino و همکارانش [۳۲] انجام شده است. نتیجه‌ی همه‌ی بررسی‌ها، کارایی مناسب‌تر الیاف PBO و فولادی نسبت به الیاف دیگر را نشان می‌دهند.

برای بهسازی و ترمیم سازه‌ها به کمک این مواد مرکب، پس از آماده کردن سطحی از سازه که قرار است تقویت شود، ابتدا لایه‌ای از ملات ساخته‌شده از مواد معدنی، به‌ویژه ملات‌هایی با پایه‌ی سیمانی، با ضخامتی اندک (به‌طور معمول ۵ میلی‌متر) روی سطح مورد نظر

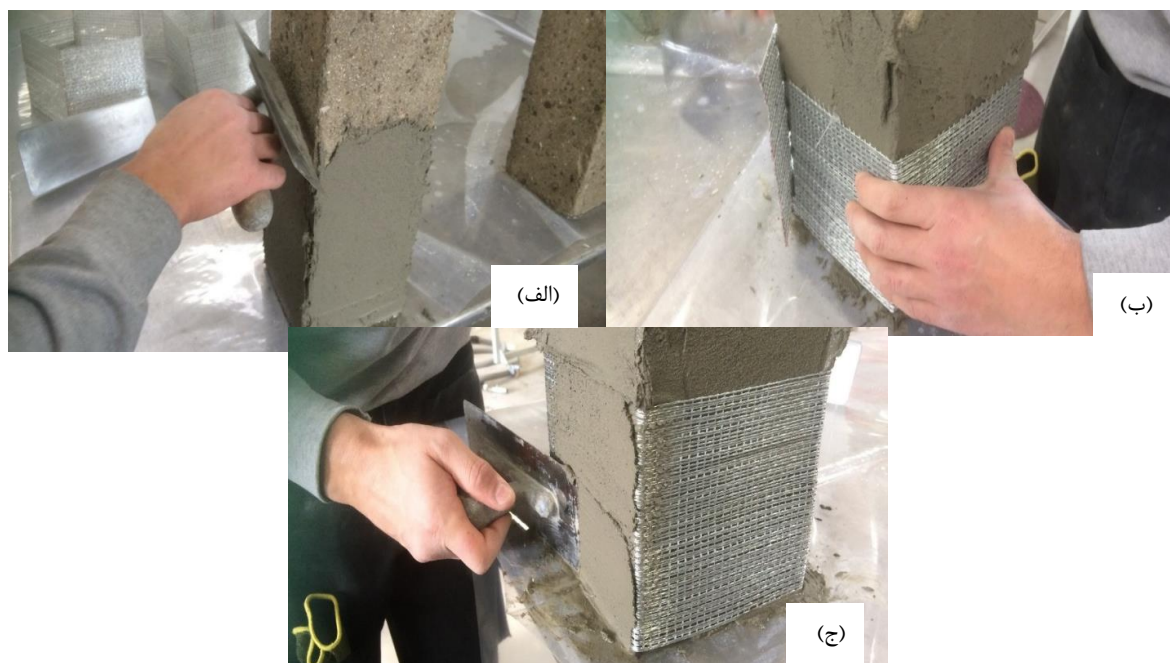
⁹ Inorganic Materials

¹⁰ Polyparaphenylene benzobisoxazole

¹¹ Unidirectional

¹² Bidirectional

اجرا می‌شود، سپس، با توجه به جنس سازه، مقدار آسیب‌دیدگی سطح، میزان اضافه‌مقاومت مورد نیاز و شرایط محیطی که سازه در آن قرار دارد، گونه‌ای از الیاف انتخاب می‌شوند و شبکه‌ای از آن‌ها روی سطح قرار می‌گیرند. در پایان نیز، لایه‌ی نهایی ملات، با ضخامتی برابر با لایه‌ی ملات زیرین، شبکه‌ی الیاف را می‌پوشاند. شکل ۱، مرحله‌های مختلف اجرای لایه‌ی درونی پایه، لایه‌ی الیاف و لایه‌ی بیرونی پایه در یکی از گونه‌های کامپوزیت‌های FRCM با الیاف فولادی بر روی زیرالمان بتنی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مرحله‌های مختلف اجرای لایه‌های مختلف کامپوزیت FRCM با الیاف فولادی بر زیرالمان بتنی: (الف) لایه‌ی درونی پایه؛ (ب) لایه‌ی الیاف؛ (ج) لایه‌ی بیرونی پایه

در FRCMها، بر خلاف آنچه در پایه با جنس مواد آلی سامانه‌های FRP رخ می‌دهد، پایه‌ی معدنی (ملات سیمانی) به‌طور کامل در داخل الیاف نفوذ نمی‌کند که در اصطلاح علمی به آن‌ها الیاف خشک گفته می‌شود. این امر باعث ایجاد تفاوتی شگرف بین رفتار و چگونگی عملکرد سامانه‌های FRCM و FRP می‌شود. در المان‌های بتنی تقویت‌شده به کمک سامانه‌ی FRP، رشد ترک به‌طور معمول در در زیرلایه‌ی بتنی^{۱۳} و نزدیک به کامپوزیت FRP اتفاق می‌افتد و در نتیجه، ویژگی‌های مکانیکی و شکست بتن و هم‌چنین، عمل‌آوری سطح آن نقش ویژه‌ای در کارایی بهسازی ایفا می‌کنند [۴۳]. از طرف دیگر، در صورت استفاده از سامانه‌ی FRCM برای تقویت المان بتنی، جداشدگی سطحی^{۱۴} در بیشتر موردها در خود کامپوزیت رخ می‌دهد و در نتیجه، زیرلایه‌ی بتنی عامل ویژه و با اهمیت در طراحی سامانه‌ی بهسازی نخواهد بود. این ویژگی منحصر به فرد FRCMها، بیان‌کننده‌ی تفاوت اصلی رفتار آن‌ها با سامانه‌های FRP می‌باشد [۳۲]. در FRCMها، رشته الیاف مرکزی سازه و کار انتقال تنش متفاوتی با سایر الیاف موجود در پایه‌ی سیمانی^{۱۵} دارند و از این رو، شناخت رفتار این کامپوزیت‌ها پیچیده خواهد بود. این پیچیدگی، زمینه‌ساز آغاز پژوهش‌های نوینی در زمینه شناخت رفتار FRCMها و بهبود روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی شده است که در این پژوهش نیز مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

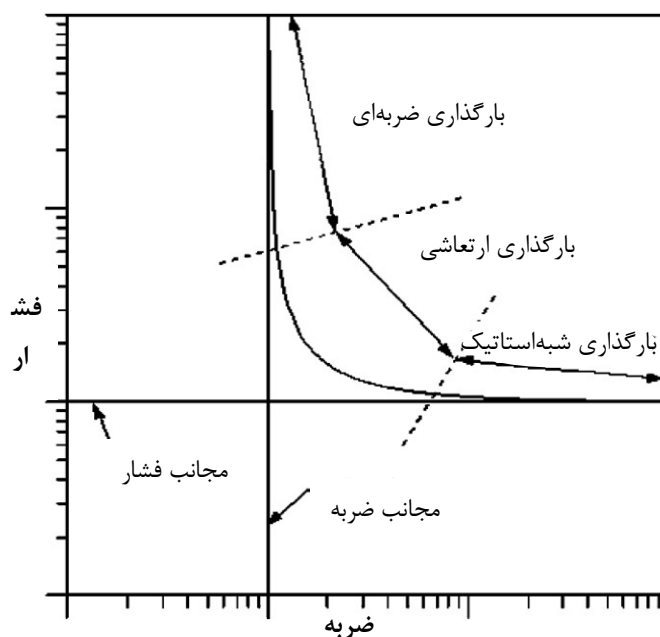
¹³ Substrate

¹⁴ Interfacial Debonding

¹⁵ Cementitious Matrix

۳- نمودارهای فشار - ضربه

نمودارهای فشار - ضربه (P - I) به طور معمول در طراحی نخستین و برآورد سازه‌های حفاظتی برای دستیابی به محدوده‌های امن پاسخ برای حالت‌های مختلف بارگذاری انفجاری استفاده می‌شوند. این نمودارها، منحنی‌های خسارت همسان (هر ترکیب فشار و ضربه خسارتی یکسان در المان سازه‌ای ایجاد می‌کند) برای المان سازه‌ای ویژه‌ای هستند که بارگذاری ویژه‌ای دارد. نمودارهای P - I نخستین بار برای مطالعه‌ی خانه‌هایی که به علت بمب‌گذاری در بریتانیا در جنگ جهانی دوم آسیب‌دیده بودند، گسترش پیدا کردند [۴۴] که به طور معمول از تحلیل الگوی یک درجه آزادی کشسان به دست می‌آمدند [۱]. از نمودارهای خسارت یکسان فشار - ضربه هم‌چنین در برآورد آسیب‌های سازه‌ای [۴۵] به ویژه در برابر بارهای انفجاری استفاده شده است [۴۶ و ۴۷]. شکل ۲ نمایی کلی از نمودار فشار - ضربه را نشان می‌دهد [۴۸].



شکل ۲: نمونه‌ای از نمودار فشار - ضربه [۴۸]

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هر یک از مجانب‌های فشار و ضربه، کران‌های این دو عامل را محدود می‌کنند. از این رو، بارها با دوره‌ی زمانی کوتاه (نسبت به دوره‌ی تناوب سازه) بارگذاری ضربه‌ای نام‌گذاری می‌شوند و پاسخ سازه در برابر آن‌ها به ضربه وابسته است و به فشار بیشینه بستگی پیدا نمی‌کند. این امر، خط قائمی را ایجاد می‌کند که کمینه ضربه‌ی مورد نیاز برای رسیدن به سطح مشخصی از خسارت را تعیین می‌کند که در فشارهای زیاد به صورت مجانب به منحنی فشار - ضربه مماس می‌شود. از طرف دیگر، مجانب افقی بیان‌گر کمینه فشار مورد نیاز برای رسیدن به سطح خسارتی ویژه است.

منحنی فشار - ضربه، سطح نمودار را به سه ناحیه‌ی بارگذاری ضربه‌ای، بارگذاری ارتعاشی و بارگذاری شبه‌استاتیک دسته‌بندی می‌کند. این نمودارها به طور معمول شامل چندین منحنی با سطح‌های مختلف خسارت می‌باشند. آن‌ها، فضای نمودار را به ناحیه‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌کنند و خود منحنی‌ها مرزهای بین سطح‌های مختلف خسارت مانند خسارت اندک، میانه و خسارت شدید، به حساب می‌آیند.

پیشرفت‌های فراوانی در گسترش منحنی‌های فشار - ضربه (P - I) برای المان‌های سازه‌ای در سال‌های اخیر به وجود آمده است. Meng و Li [۴۹] اثر شکل بارگذاری ضربه‌ای بر اساس معیار خسارت بیشینه تغییر شکل سازه به کمک الگوی یک درجه آزادی کشسان بر منحنی فشار - ضربه را مطالعه کردند. نتیجه‌ی ارزیابی آن‌ها نشان داد که منحنی فشار - ضربه به شدت به شکل بار ضربه‌ای وارد شده

وابسته است. Louca و Fallah [۵۰ و ۵۱] منحنی‌های فشار - ضربه را به کمک تحلیل سامانه‌های یک‌درجه آزادی با رفتار کشسان - مومسان در

سخت‌شدگی و نرم‌شدگی تحت اثر بارهای انفجاری به‌دست آوردند. در سال‌های اخیر نیز، برخی از پژوهش‌گران تلاش کردند تا از منحنی‌های فشار - ضربه برای تعیین سطح‌های مختلف آسیب در المان‌های سازه‌ای استفاده کنند [۵۲]. به علت برخی از موردها، منحنی‌های فشار - ضربه ممکن است برآورد درستی از میزان خسارت در المان‌های سازه‌ای ارائه ندهند. این موردها می‌تواند شامل حالت‌های زیر شود:

(۱) بیشتر پژوهش‌های گذشته بر اساس الگوهای یک‌درجه آزادی بنا شده‌اند. پاسخ‌های سازه‌ای در برابر بارهای انفجاری، به‌ویژه هنگامی که ضربه در مدت زمان به‌شدت کوتاهی اثر کند، در شکل‌مادهای محلی رخ می‌دهند [۵۳]. از این رو، استفاده از الگوهای یک‌درجه آزادی ممکن است برای برآورد آسیب در سازه‌های در برابر بارهای انفجاری مناسب نباشند. علاوه بر این، استفاده از الگوی یک‌درجه آزادی برای تخمین شکست‌های چندحالتی در المان‌ها مناسب نیست. به عنوان نمونه، شکست ستون در مرحله‌های نخست می‌تواند در حالت برشی و پس از آن در حالت خمشی رخ دهد و در این صورت الگوی به‌دست آمده از سامانه‌های یک‌درجه آزادی توانایی برآورد درست خسارت در آن را نخواهد داشت.

(۲) استفاده از معیار خسارت بر اساس تغییرشکل ممکن است برای برآورد خسارت‌های محلی المان‌های سازه‌ای در برابر بارهای انفجاری، به‌ویژه هنگامی که خسارت در حالت برشی رخ می‌دهد، مناسب نباشد.

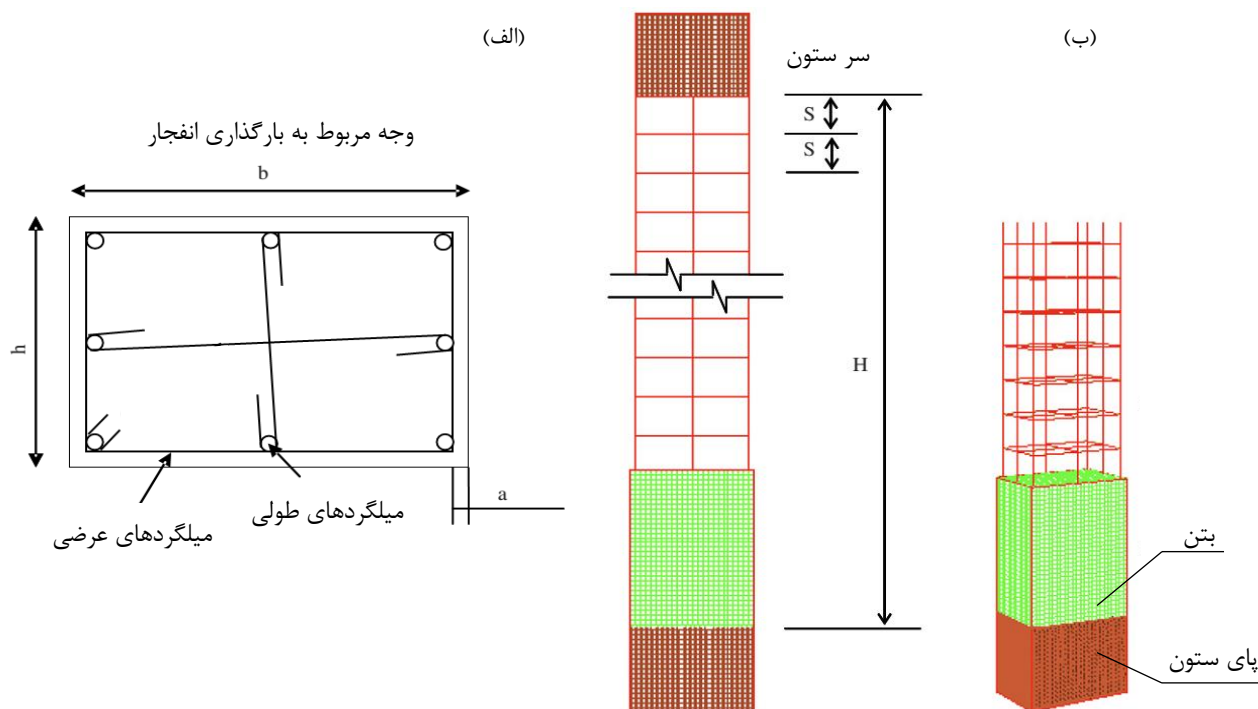
در این مقاله، به‌منظور برآوردی درست از خسارت‌های ایجادشده و استفاده‌ی مناسب از ویژگی‌های منحصر به فرد نمودارهای فشار - ضربه، از معیار خسارتی بر اساس کاهش ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌آرمه بهره‌جویی می‌شود. این عامل به ویژگی‌های کلی و کارایی ستون بتن‌آرمه وابستگی مستقیم دارد و به‌سادگی می‌تواند از نتیجه‌های آزمایشگاهی یا الگوهای عددی به‌دست آید. از این رو، الگوی عددی یک‌درجه آزادی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و معیار خسارت نیز بر اساس تغییرشکل بنا نهاده شده است و در نتیجه، کاستی‌های پژوهش‌های پیشین را نخواهد داشت.

۴- الگوی عددی

در این بخش، الگوی عددی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده به کمک کامپوزیت‌های FRCC ساخته می‌شود. به‌منظور اطمینان از الگوی عددی ساخته‌شده، ابتدا، نتیجه‌های الگوی عددی ستون بتنی بدون تقویت تحت بار انفجاری با نتیجه‌های به‌دست آمده در یکی از پژوهش‌های پیشین راستی‌آزمایی خواهد شد.

۴-۱- راستی‌آزمایی الگوی عددی

ستون بتن‌آرمه‌ی انتخاب‌شده برای راستی‌آزمایی الگوی عددی در این مقاله از پژوهش Shi و همکارانش [۴۸] گزینش شده است. آن‌ها تلاش کردند تا رابطه‌هایی برای منحنی‌های فشار - ضربه در ستون‌های بتن‌آرمه به‌دست آورند. ستون ارزیابی‌شده در پژوهش آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: ویژگی‌های هندسی ستون در پژوهش Shi و همکارانش [۴۸]

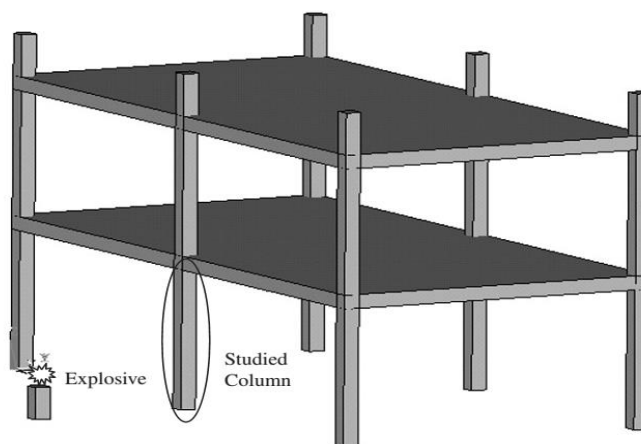
در شکل ۳ - الف، b عرض ستون است که در برابر بار انفجاری قرار می‌گیرد، h ارتفاع مقطع ستون و a میزان پوشش بتن می‌باشد. در شکل ۳ - ب، H طول خالص ستون بتن‌آرمه و s فاصله‌ی خاموت‌ها می‌باشند. در پژوهش Shi و همکارانش [۴۸]، برای مصالح بتنی از الگویی استفاده شده که همه‌ی عامل‌ها در آن به مقاومت فشاری بتن محصورنشده وابسته باشند. الگوی کشسان - مومسان نیز برای مصالح فولادی و با در نظر گرفتن نرخ کرنشی در نظر گرفته شد. ویژگی‌های مصالح در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های مصالح [۴۸]

ویژگی	بتن	فولاد
چگالی (kg/m^3)	۲۴۰۰	۷۸۰۰
مقاومت فشاری (MPa)	۴۰
نسبت پواسن	۰/۲	۰/۳
تنش شکست کششی (MPa)	۶/۰
ضریب کشسانی (GPa)	۲۰۰
تنش جاری شدن (MPa)	۵۵۰
کرنش گسیختگی	٪ ۰/۳۵	٪ ۱۸

رفتار انتقال تنش بین میلگردهای فولادی و بتن پیرامون آن‌ها در قالب پیوستگی و لغزش، نقش مهمی در پاسخ سازه‌های بتن-آرمه، به ویژه در برابر بارهای دینامیکی، ایفا می‌کند. در پژوهش Shi و همکارانش تنش پیوستگی برابر 18 MPa در نظر گرفته شده است [۴۸]. ستون میانی طبقه‌ی پایین سازه‌ای مطابق شکل ۴ به عنوان ستون مورد بررسی انتخاب شده است. در الگوی عددی، بار انفجاری مثلی به‌طور یکنواخت بر وجه جلوی ستون اعمال می‌شود. باید اشاره شود که توزیع واقعی بار انفجاری در ارتفاع ستون متفاوت می‌باشد و شکل مثلی ندارد. با این حال، این ساده‌سازی بار انفجاری با پیشنهاد آیین‌نامه طراحی سازگار است [۵۴]. منبع بار انفجاری از $7/10 \text{ kg}$ منفجره‌ی مواد

C-4 در فاصله $1/0.7m$ از وجه ستون در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های هندسی ستون مورد بررسی و محیط انفجار به ترتیب در در جدول ۲ و جدول ۳ ارایه شده‌اند.



شکل ۴: الگوی عددی راستی آزمایشی و طرح میدان آزمایش برای راستی آزمایشی الگوی عددی [۴۸]

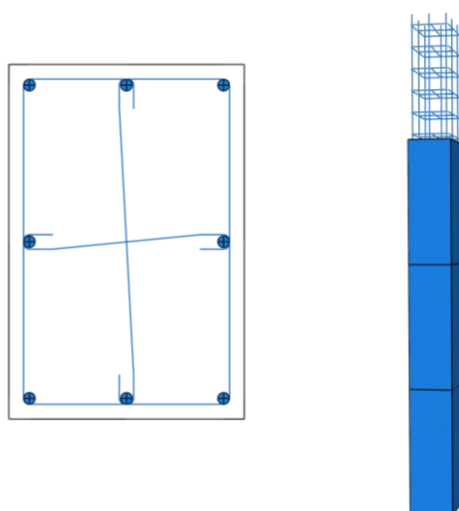
جدول ۲: ویژگی‌های هندسی ستون انتخاب شده [۴۸]

عرض مقطع ستون (mm)	ارتفاع مقطع ستون (mm)	ارتفاع کل ستون (mm)	آرماچورهای عرضی	تقویت‌های طولی	پوشش بتن (mm)
۴۰۰	۶۰۰	۴۶۰۰	$\Phi 10 @ 200$	$8 \Phi 20$	۲۵

جدول ۳: پیکره‌بندی بار انفجاری [۴۸]

وزن مواد منفجره C-4 (gr)	وزن معادل TNT (gr)	فاصله انفجار (mm)	ارتفاع انفجار (mm)	تنش محوری نخستین (MPa)
۷۱۰۰	۸۰۰۰	۱۰۷۰	۲۲۹	۲/۱

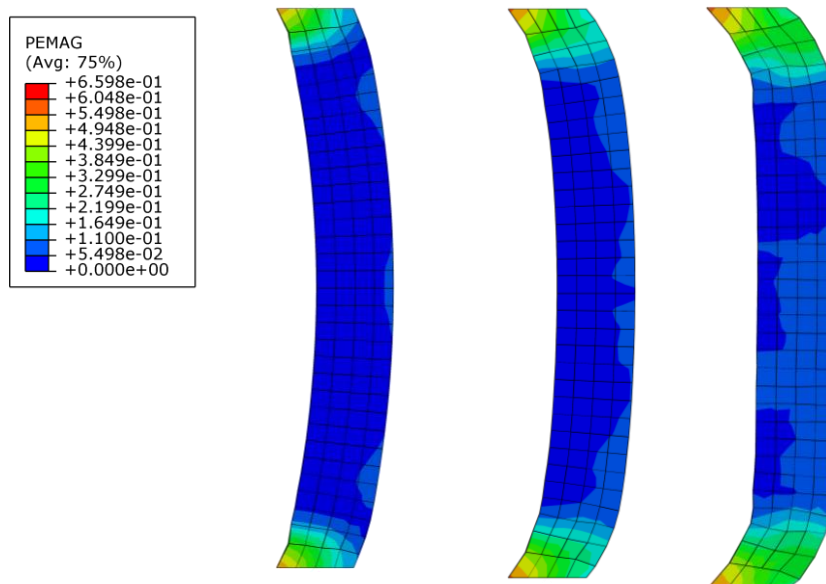
در این مقاله نیز، به منظور راستی آزمایشی نمونه‌ی عددی، ستون مورد بررسی در پژوهش Shi و همکارانش [۴۸] با همان ویژگی‌ها در نرم‌افزار ABAQUS الگوسازی شده است. شکل ۵ الگوی عددی مورد ارزیابی در این مقاله را نشان می‌دهد.



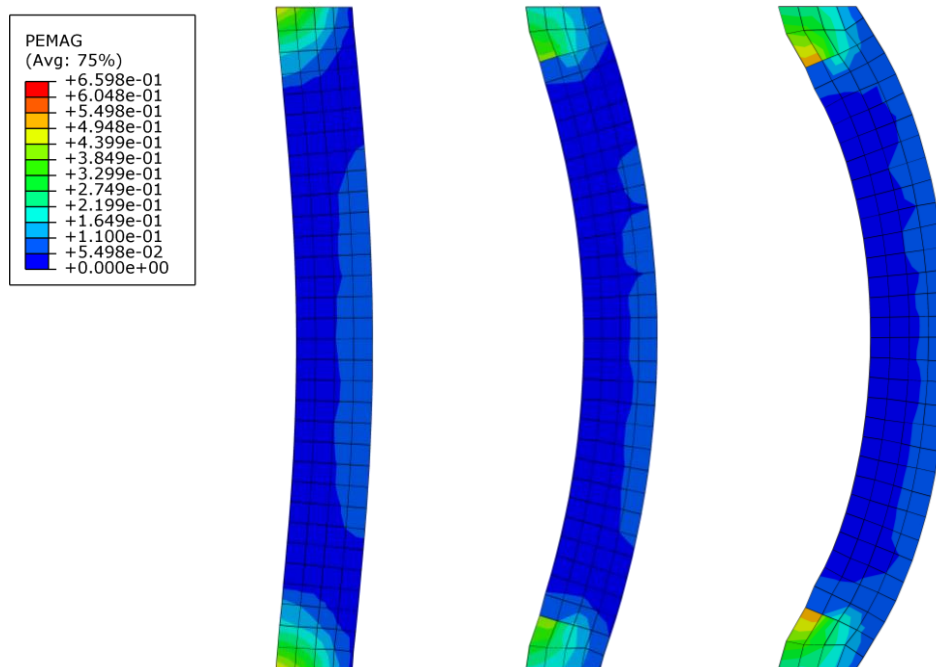
شکل ۵: الگوی عددی ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS برای انجام راستی آزمایشی

مطابق با پژوهش Shi و همکارانش [۴۸]، بار انفجاری با بیشینه فشار و ضربه‌ای به ترتیب برابر 6100 kPa و 1010 kPa.ms به ستون اعمال شد. بررسی‌های الگوی عددی نشان دادند که در حالت کلی، برای ستون بتن‌آرمه در برابر بار انفجاری دو حالت خسارت برشی

و خمشی وجود دارد. در برخی از حالت‌ها ترکیب خسارت‌های برشی و خمشی نیز مشاهده می‌شود. نمونه‌هایی از چگونگی رشد این حالت‌های خسارت در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است [۴۸].



شکل ۶: چگونگی رشد خسارت‌های برشی ستون بتن آرمه‌ی بدون تقویت در اثر بار انفجاری



شکل ۷: چگونگی رشد خسارت‌های خمشی ستون بتن آرمه‌ی بدون تقویت در اثر بار انفجاری

نتیجه‌ها نشان می‌دهند که در ناحیه‌ی بارگذاری ضربه‌ای، حالت خسارت برشی و در ناحیه‌ی بارگذاری شبه‌استاتیکی، حالت خسارت خمشی رخ می‌دهند. در ناحیه‌ی بارگذاری ضربه‌ای، بار دارای فشار زیاد در مدت زمان کوتاه است. در این زمان کوتاه، احتمال رخ

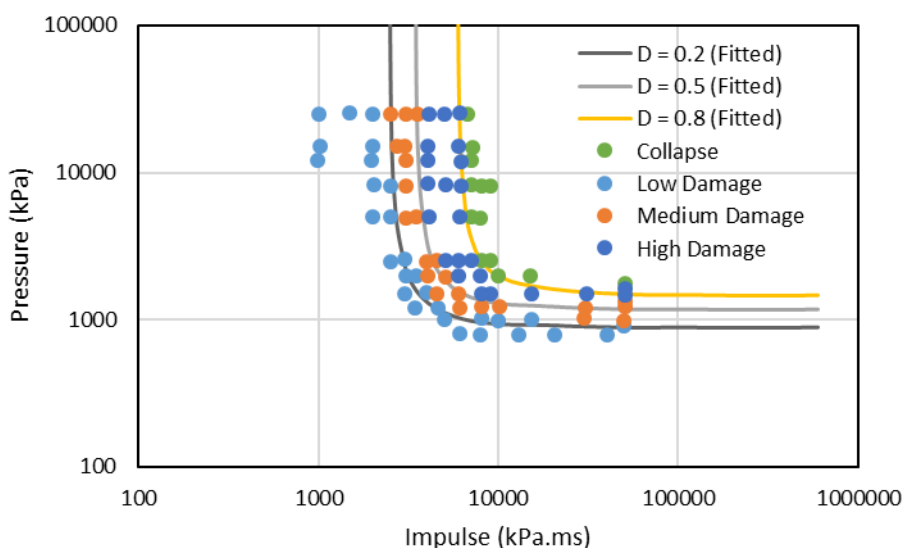
دادن تنش‌های برشی از تنش‌های خمشی بیشتر است. زیرا تنش‌های خمشی زمان بیشتری برای گسترش نیاز دارند. از طرف دیگر، در ناحیه‌ی بارگذاری شبه‌استاتیکی، بار انفجاری دارای فشار اندک در مدت زمان طولانی‌تر است. از این رو، حالت‌های خسارت خمشی بیشتر رخ می‌دهند. شناسایی خسارت در سازه‌ها نیازمند معیار و شاخصی برای سنجش هستند. با در نظر گرفتن این‌که همه‌ی ستون‌ها بر این اساس طراحی شده‌اند که بارهای محوری وارد شده را تحمل کنند، کاهش ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌آرمه برای برآورد خسارت در پژوهش Shi و همکارانش پیشنهاد می‌شود. کاهش ظرفیت باربری محوری برای برآورد خسارت‌های برشی و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه و همچنین خسارت‌های محلی در آن‌ها مناسب است. از طرف دیگر، این عامل به ویژگی‌های کلی و کارایی ستون بتن‌آرمه وابستگی مستقیم دارد و به‌سادگی می‌تواند از نتیجه‌های آزمایشگاهی یا الگوهای عددی به‌دست آید. ظرفیت باربری ستون بتن‌آرمه‌ی آسیب‌نندیده به میلگرهای تقویتی طولی و بتن وابسته است. بر اساس آیین‌نامه‌ی ACI، ظرفیت باربری ستون بتن‌آرمه آسیب‌نندیده را می‌توان از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد [۴۸]:

$$P_N = 0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، f'_c مقاومت فشاری بتن، f_y مقاومت جاری‌شدن فولادهای طولی، A_g سطح مقطع کلی ستون بتنی و A_s سطح مقطع میلگرهای تقویتی طولی می‌باشد. شاخص خسارت D به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۴۸]:

$$D = 1 - \frac{P'_{N-residual}}{P'_{N-design}} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، $P'_{N-residual}$ مقدار ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون بتن‌آرمه‌ی آسیب‌نندیده است و $P'_{N-design}$ ظرفیت باربری طراحی ستون بتن‌آرمه بدون آسیب می‌باشد که می‌تواند از رابطه‌ی (۱) محاسبه شود. درجه‌های خسارت در نظر گرفته‌شده به‌صورت خسارت اندک ($D = 0 - 0.2$)، خسارت میانه ($D = 0.2 - 0.5$)، خسارت زیاد ($D = 0.5 - 0.8$) و شکست و فروپاشی ($D = 0.8 - 1$) دسته‌بندی شده‌اند. برای دستیابی به نمودارهای فشار - ضربه در ستون‌های بتن‌آرمه، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های عددی با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف خسارت انجام می‌شوند. بارهای انفجاری با بیشینه فشار و ضربه‌ی متناظر با هر حالت خسارت به‌صورت هم‌زمان در فضای فشار - ضربه رسم می‌شوند (شکل ۸). در پایان، نمودارهای فشار - ضربه که خط‌های مرزی بین سطح‌های مختلف خسارت هستند به کمک روش‌های برازش منحنی به‌دست می‌آیند.



شکل ۸: نمودار فشار - ضربه برای ستون بتن‌آرمه‌ی بدون تقویت بر اساس نتیجه‌های الگوی عددی و منحنی‌های برازش شده [۴۸]

شکل ۸ نمودار فشار - ضربه ستون مورد ارزیابی را به کمک روش‌های برازش منحنی را نشان می‌دهد. از آنجا که دست‌یابی به مقدارهای دقیق درجه‌های خسارت امکان‌پذیر نیست، نتیجه‌های عددی به‌دست‌آمده در محدوده‌ای از سطح‌های مختلف خسارت قرار می‌گیرند. بررسی دقیق منحنی‌های برازش‌شده‌ی فشار - ضربه نشان می‌دهد که این منحنی‌ها را می‌توان به‌صورت عددی با رابطه‌ی (۳) نوشت [۴۸]:

$$(P - P_0)(I - I_0) = A(P_0 / 2 + I_0 / 2)^\beta \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، P_0 مجانب فشار برای درجه خسارت D است. میزان خسارت D برابر 0.2 ، 0.5 و 0.8 در نظر گرفته شده است. I_0 مجانب ضربه برای درجه خسارت D می‌باشد. A و β ثابت‌هایی هستند که به ویژگی‌های ستون و سطح خسارت وابسته می‌باشند. مقدار این عامل‌ها برای ستون بتن‌آرمه در سه نمودار فشار - ضربه در جدول ۴ آورده شده‌اند.

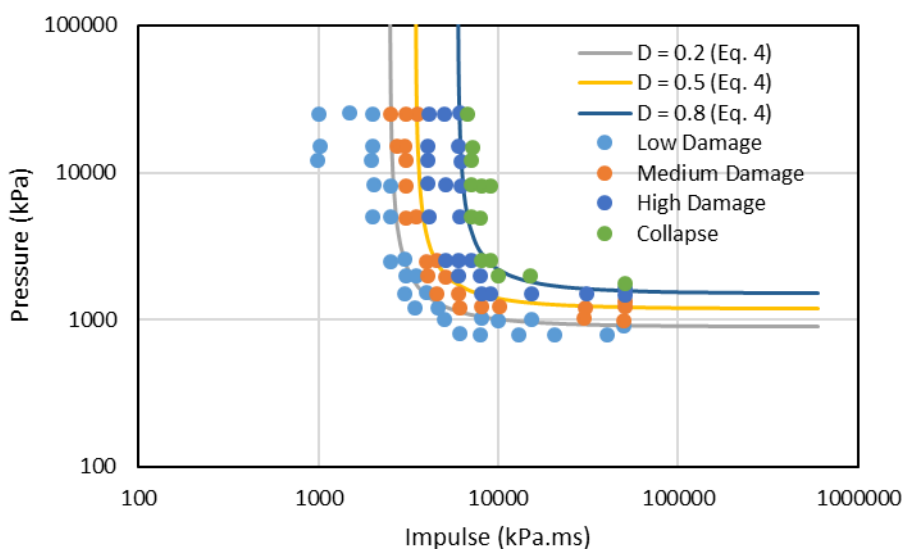
جدول ۴: مقدار عامل‌ها در رابطه‌ی (۳) [۴۸]

D	P_0 (kPa)	I_0 (kPams)	A	β
0.2	900	2500	11/50	1/45
0.5	1200	3500	12/00	1/49
0.8	1500	6000	12/50	1/54

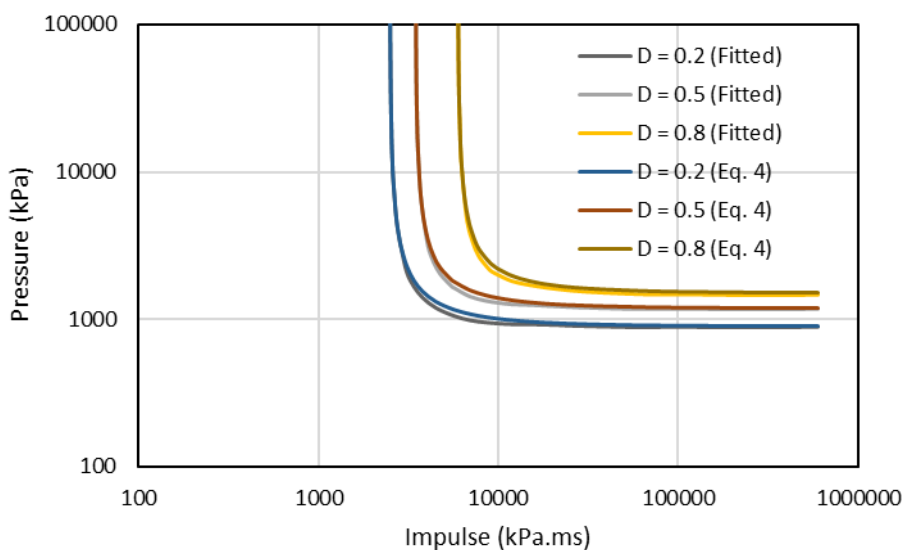
در جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که عامل‌های A و β برای سطح‌های خسارت مختلف دارای مقدارهای ثابت ۱۲ و ۱/۵ هستند. از این رو، می‌توان این عامل‌ها را مستقل از میزان خسارت ستون دانست و رابطه‌ی (۳) را به‌صورت زیر بیان کرد [۴۸]:

$$(P - P_0)(I - I_0) = 12(P_0 / 2 + I_0 / 2)^{1.5} \quad (4)$$

شکل ۹ منحنی‌های فشار - ضربه به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۴) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، منحنی‌های حاصل از رابطه‌ی (۴) با نتیجه‌های تحلیل عددی سازگار هستند. شکل ۱۰ منحنی‌های برازش‌شده‌ی شکل ۸ را با منحنی‌های به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۴) در شکل ۹ مقایسه کرده است. همان‌طور که دیده می‌شود، رابطه‌ی (۴) توانایی مناسبی در شناسایی رفتار نمونه داشته است.



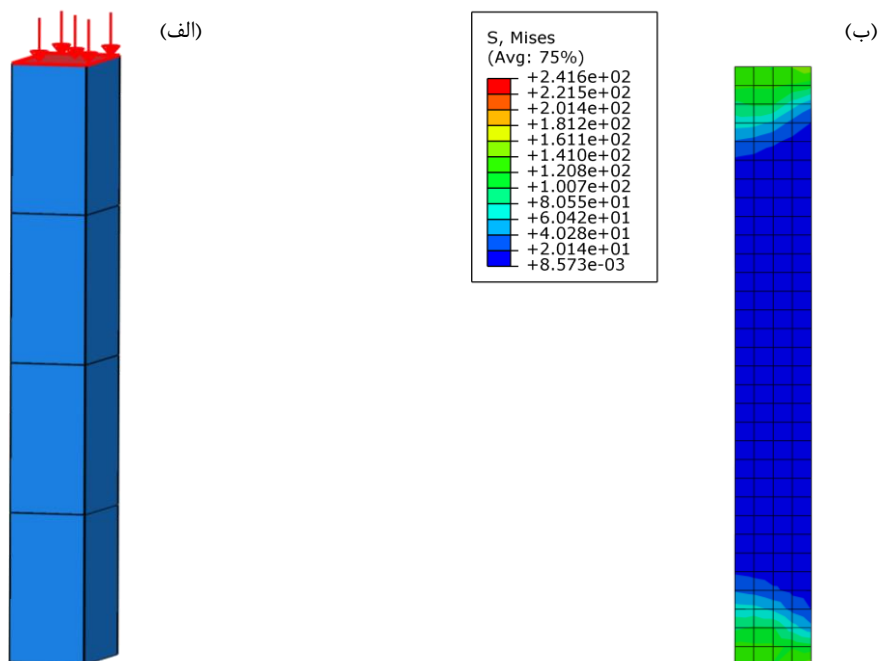
شکل ۹: نمودار فشار - ضربه برای ستون بتن‌آرمه‌ی بدون تقویت بر اساس نتیجه‌های الگوی عددی و منحنی‌های به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۴) [۴۸]



شکل ۱۰: مقایسه‌ی نمودارهای فشار - ضربه برای ستون بتن‌آرمه‌ی بدون تقویت بر اساس منحنی‌های برازش‌شده و منحنی‌های به‌دست آمده از رابطه‌ی (۴) [۴۸]

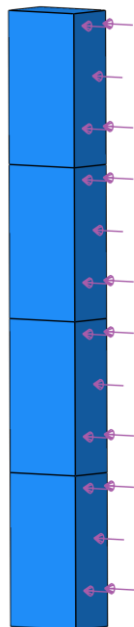
درجه‌های خسارت ستون بتن‌آرمه در برابر بار انفجاری مشخص می‌تواند به روش زیر به‌دست آید:

(۱) مرحله‌ی نخست: در این مرحله نیرویی محوری پیش از اعمال بار انفجاری برای شبیه‌سازی تنش‌های موجود محوری ستون در اثر بارهای ثقلی به آن وارد می‌شود. در این پژوهش، مقدار بار محوری نخستین ۲۰ درصد ظرفیت باربری محوری طراحی در نظر گرفته شده است. شکل ۱۱ چگونگی این بارگذاری و تنش‌های حاصل از آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: (الف) چگونگی اعمال بار محوری نخستین، (ب) تنش‌های وان میسز به‌دست آمده از بار محوری نخستین

۲) مرحله دوم: بارهای انفجاری، مطابق شکل ۱۲، به وجه جلویی ستون اعمال می‌شوند. تحلیل دینامیکی در این مرحله برای دستیابی به پاسخ کامل نمونه مدت زیادی طول می‌کشد و هنگامی تحلیل پایان می‌پذیرد که سرعت در همه‌ی گره‌ها به مقدار قابل توجهی ناچیز باشند.

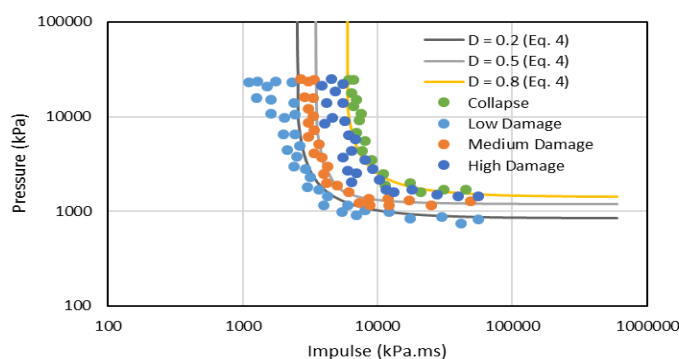


شکل ۱۲: چگونگی اعمال بار انفجاری به الگوی عددی ستون

۳) در آغاز این مرحله، سرعت در همه‌ی گره‌های نمونه به صفر بازگردانده می‌شود. سپس، بار محوری دوباره به ستون اعمال می‌شود تا منحنی بار - تغییرشکل و ظرفیت باربری باقی‌مانده ستون به دست آید. این امر با افزایش تدریجی جابجایی قائم در بالای ستون انجام می‌شود.

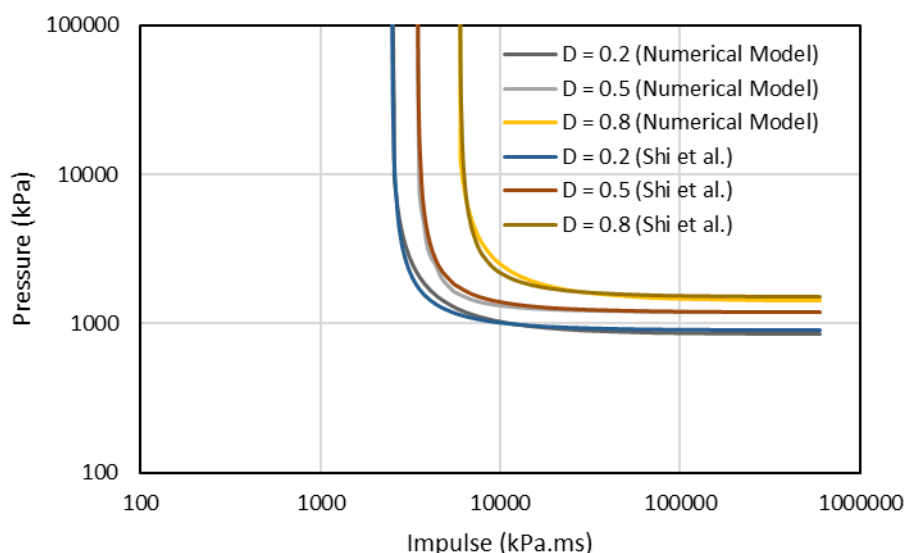
۴) برآورد شاخص خسارت بر اساس نتیجه‌های آزمایشگاهی

به منظور اطمینان از الگوی عددی ساخته شده در این مقاله، مجموعه‌ای از بارهای انفجاری با شدت‌های مختلف فشار و ضربه بر نمونه وارد شدند و با محاسبه‌ی جانب‌های فشار P_0 و ضربه I_0 برای آن، بر اساس رابطه‌ی (۴)، مطابق با شکل ۱۳ منحنی‌های فشار - ضربه برای الگوی عددی به دست آمد.



شکل ۱۳: نمودارهای فشار - ضربه برای الگوی عددی ساخته شده بر اساس منحنی‌های به دست آمده از رابطه‌ی (۴)

مطابق با شکل ۱۴، منحنی‌های فشار - ضربه‌ی به‌دست آمده از رابطه‌ی (۴) برای الگوی عددی ساخته شده در این مقاله با منحنی‌های متناظر آن در پژوهش Shi و همکاران [۴۸] مقایسه شدند. علاوه بر آن، مقدار مجانب‌های فشار P_0 و ضربه I_0 متناظر با این منحنی‌ها برای درجه‌های خسارت D برابر ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ محاسبه شدند که نتیجه‌های آن در جدول ۵ آمده‌اند.



شکل ۱۴: مقایسه‌ی نمودارهای فشار - ضربه برای ستون مورد ارزیابی در پژوهش Shi و همکاران [۴۸] و الگوی عددی ساخته شده در این مقاله

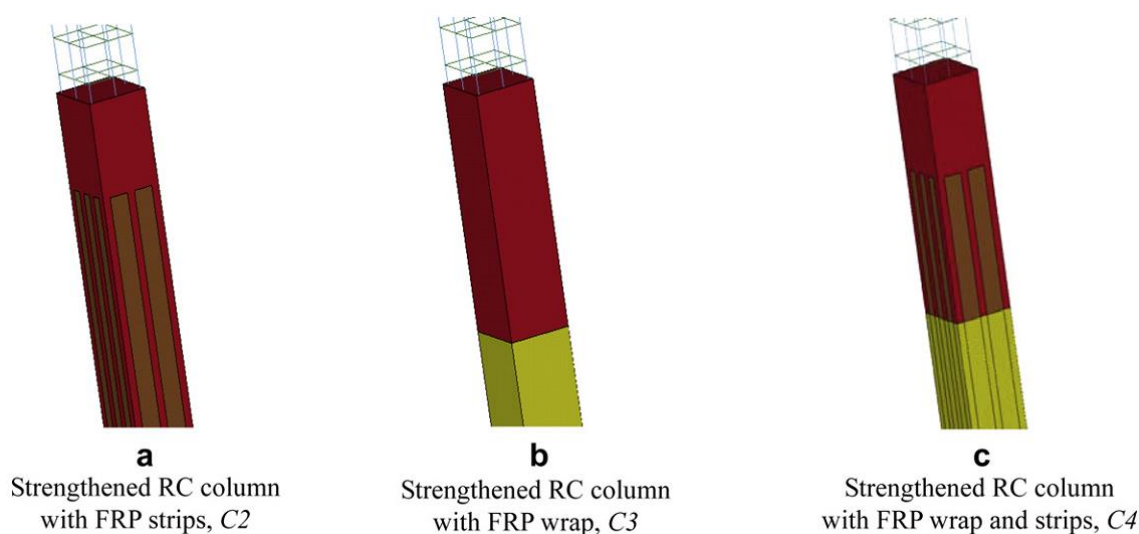
جدول ۵: مقایسه‌ی مجانب‌های فشار و ضربه در پژوهش Shi و همکاران [۴۸] و در الگوی عددی این مقاله

D	P_0 (kPa)		I_0 (kPams)	
	Shi و همکاران	الگوی عددی	Shi و همکاران	الگوی عددی
۰/۲	۹۰۰	۸۵۰	۲۵۰۰	۲۴۲۰
۰/۵	۱۲۰۰	۱۲۲۰	۳۵۰۰	۳۷۶۰
۰/۸	۱۵۰۰	۱۴۱۰	۶۰۰۰	۵۶۰۰

همان‌طور که در شکل ۱۴ و جدول ۵ مشاهده می‌شود، منحنی‌های فشار - ضربه و مجانب‌های فشار و ضربه‌ی به‌دست آمده از الگوی عددی این پژوهش، با منحنی‌ها و مجانب‌های متناظر آن در پژوهش Shi و همکاران [۴۸] هم‌خوانی مناسبی دارد و از این رو می‌توان از الگوی عددی ساخته شده با اطمینان در بخش‌های پسین و برای ساخت الگوی عددی ستون بتنی تقویت شده بهره جست.

۴-۲- اثر انفجار بر ستون‌های بتن آرمه‌ی تقویت شده

در این بخش، رفتار ستون‌های بتن آرمه‌ی تقویت شده با کامپوزیت‌های نوین FRCM تحت اثر بار انفجاری با رفتار ستون‌های متناظر بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های سنتی FRP مقایسه می‌شود. برای این منظور، از ستون بتنی بدون تقویت در بخش ۴-۱ به عنوان نمونه‌ی بدون تقویت و همچنین، از نتیجه‌های پژوهش جامع، Mutalib و Hao [۵۵] که برای دستیابی به نمودارهای $P-I$ همان ستون بتن آرمه تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP با نسبت‌های مختلف تقویت به‌صورت عددی تلاش کرده‌اند بهره جسته شده است. حالت‌های مختلف تقویت ستون به کمک کامپوزیت‌های FRP در شکل ۱۵ نشان داده شده است [۵۵].



شکل ۱۵: پیکره بندی ستون بتن آرمه ی تقویت شده به کمک کامپوزیت های FRP [۵۵]

مطابق شکل ۱۵، ستون C2 با کامپوزیت های FRP به شکل نوار طولی^{۱۶}، ستون C3 با کامپوزیت های FRP به شکل نوارهای عرضی^{۱۷} و ستون C4 با کامپوزیت های FRP به صورت ترکیبی از هر دو گونه تقویت شده اند. نوارهای کامپوزیت FRP دارای ضخامتی برابر ۱mm شامل دولایه ی پوششی از چسب اپوکسی هر کدام به ضخامت ۰/۴mm و پوشش کامل آن ها از سه لایه FRP مشابه دارای ضخامتی برابر با ۳mm اجرا شدند. در حالت تقویت نواری، سه نوار با عرض ۱۰۰mm بر وجه های روبرو و پشت ستون و دو نوار با عرض ۱۲۵mm در وجه های کناری ستون اعمال شدند. ویژگی های کامپوزیت های FRP نیز در جدول ۶ ارائه شده اند [۵۵].

جدول ۶: ویژگی های کامپوزیت های FRP [۵۵]

مقدار	نماینه	ویژگی مکانیکی چگالی (kg/m^3)
۲۵۴۰	ρ	چگالی (kg/m^3)
۷۲	E_1	ضریب کشسانی طولی (GPa)
۹/۶۵	E_2	ضریب کشسانی عرضی (GPa)
۵/۲۴	G_{21}	ضریب برشی در صفحه
۲/۲۴	G_{23}	ضریب برشی خارج از صفحه
۰/۰۲۱	ν_{21}	نسبت پواسن کمینه
۰/۰۲۱	ν_{31}	نسبت پواسن در راستای ضخامت
۲۲۸۰	X_T	مقاومت کششی طولی (MPa)
۱۴۴۰	X_C	مقاومت فشاری طولی (MPa)
۵۷	Y_T	مقاومت کششی عرضی (MPa)
۲۲۸	Y_C	مقاومت فشاری عرضی (MPa)
۷۱	S	مقاومت برشی در صفحه (MPa)
۱/۳۸	ϵ_t	بیشینه کرنش برای الیاف کششی (%)
۱/۱۷۵	ϵ_c	بیشینه کرنش برای الیاف فشاری (%)

ویژگی های چسب اپوکسی به کار رفته در کامپوزیت های FRP بر اساس گزارش سازنده، در جدول ۷ آمده اند [۵۶].

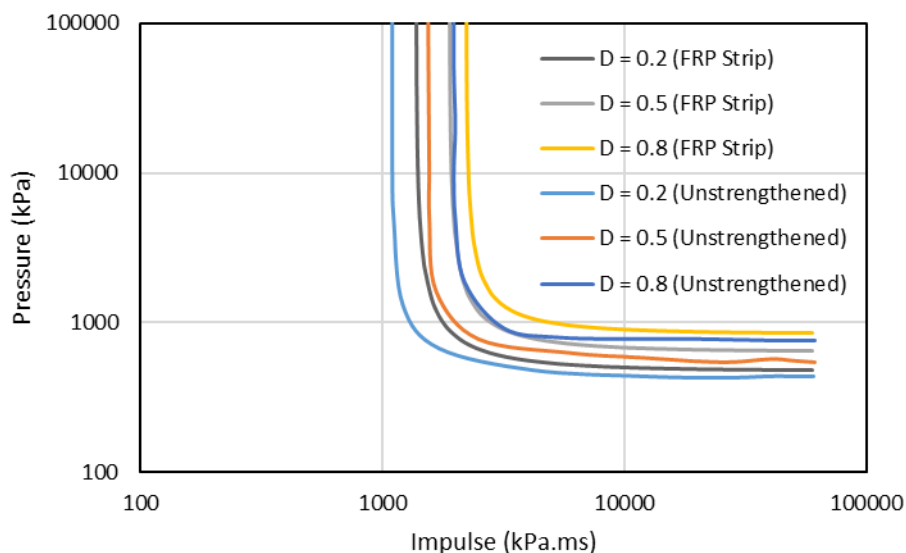
¹⁶ Strips

¹⁷ Wrap

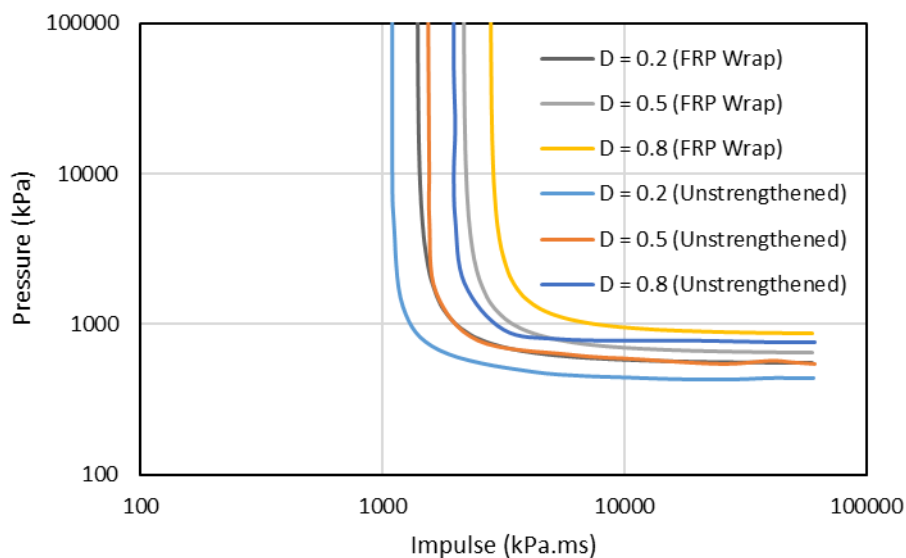
جدول ۷: ویژگی‌های چسب اپوکسی گزارش شده در پژوهش Sayed-Ahmed [۵۶]

نسبت پواسن	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	ضریب کشسانی کششی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
۰/۲	۶۰	۲۹/۴	۱۱/۷	۳۲

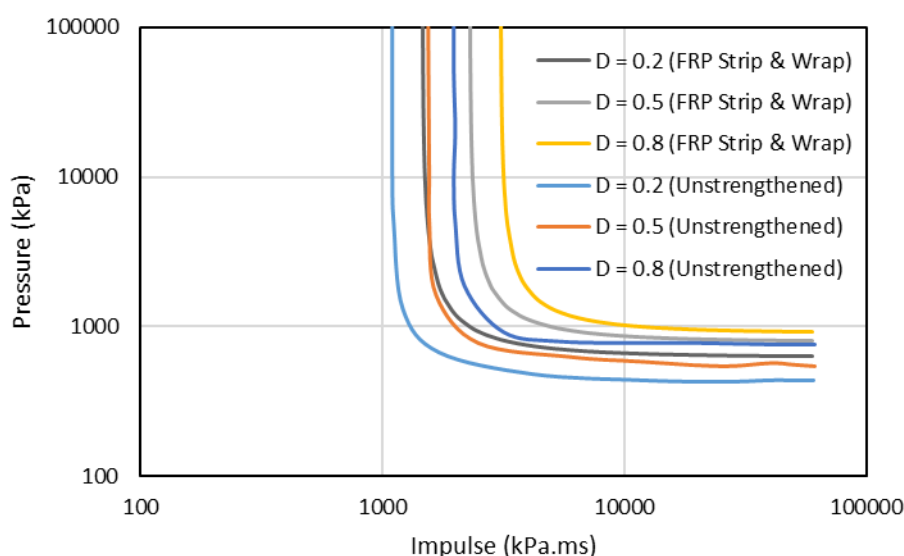
شکل ۱۶، شکل ۱۷ و شکل ۱۸ به ترتیب نمودارهای فشار - ضربه را برای ستون‌های تقویت شده C2، C3 و C4 را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، نمودارهای فشار - ضربه مربوط به ستون بدون تقویت نیز برای مقایسه آورده شده‌اند [۵۵].



شکل ۱۶: منحنی‌های P-I برای ستون‌های بتن آرمه تقویت شده با نوارهای کامپوزیت FRP (ستون C2) [۵۵]



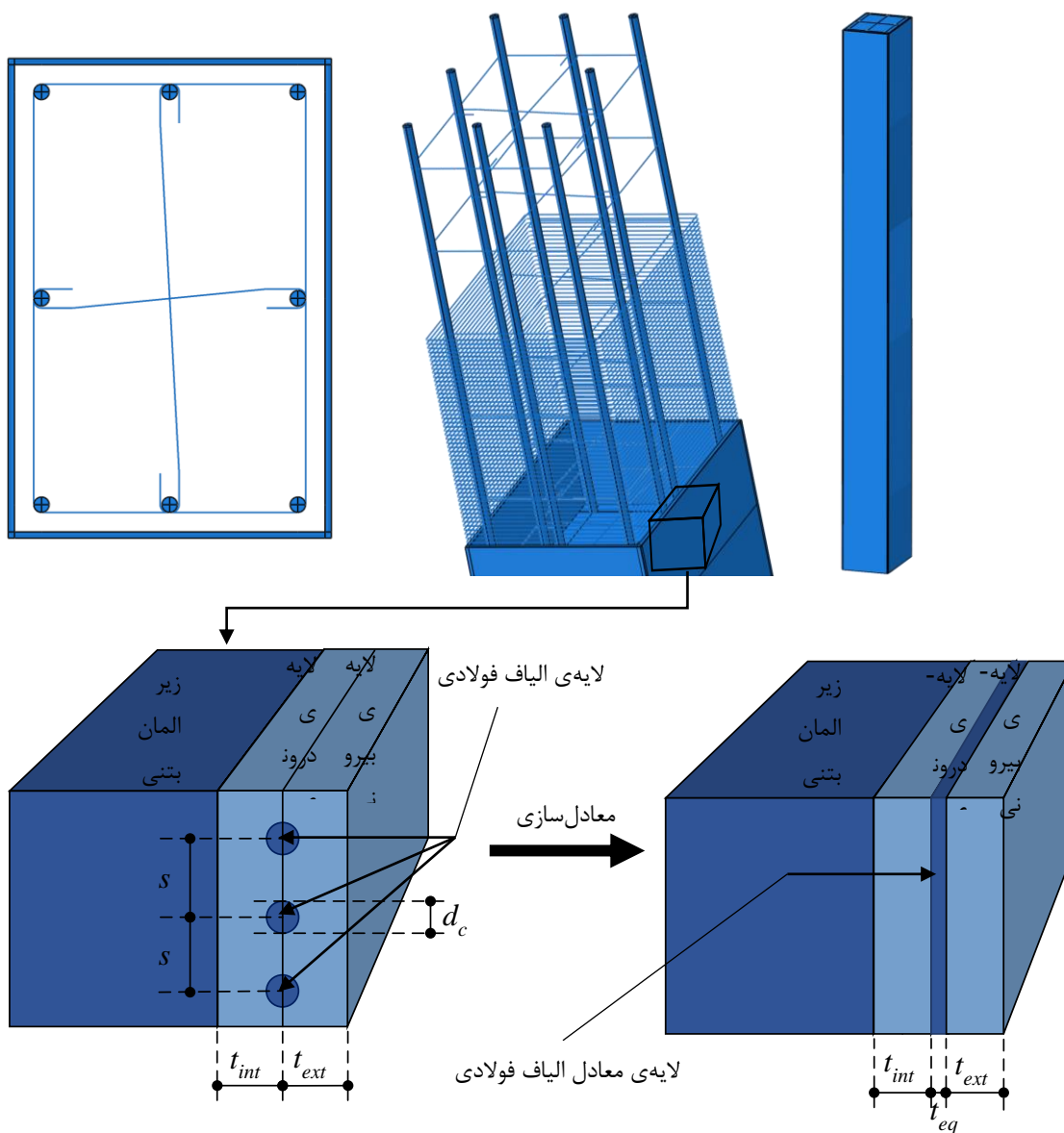
شکل ۱۷: منحنی‌های P-I برای ستون‌های بتن آرمه تقویت شده با پوشش کامپوزیت FRP (ستون C3) [۵۵]



شکل ۱۸: منحنی‌های P-I برای ستون‌های بتن‌آرمه تقویت‌شده با ترکیب نوار و پوشش کامپوزیت FRP (ستون C4) [۵۵]

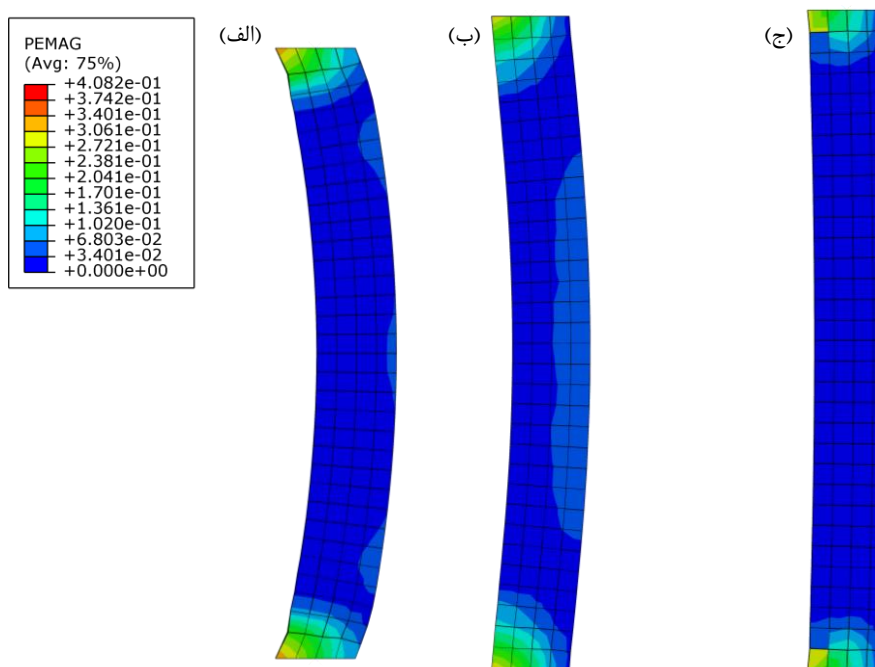
همان‌طور که در شکل ۱۶، شکل ۱۷ و شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، ستون C4 که ترکیب تقویت با نوارها و پوشش کامپوزیت‌ها را دارد، دارای بیشترین ظرفیت مقاوم می‌باشد. ستون C2 که فقط با نوارهای کامپوزیت FRP تقویت‌شده است فقط مقداری اندک به افزایش ظرفیت ستون بدون تقویت کمک کرده است [۵۵].

در ادامه، ستون مورد ارزیابی در پژوهش پیشین Shi و همکاران [۴۸]، به کمک کامپوزیت‌های نوین FRCM تقویت می‌شوند و رفتار آن در برابر بار انفجاری با نتیجه‌های پژوهش Mutalib و Hao [۵۵] مقایسه خواهند شد. شکل ۱۹ الگوی عددی ستون بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت FRCM در نرم افزار ABAQUS را نشان می‌دهد. الیاف به‌کار رفته در کامپوزیت‌های این پژوهش، مطابق با پژوهش Santadrea و همکارانش [۳۸]، از رشته الیاف فولادی با مقطع دایره‌ای به قطر $d_c = 2\text{mm}$ و با ضریب کششسانی E_s برابر 210GPa در نظر گرفته شده‌اند. لایه‌های ملات مورد استفاده در کامپوزیت‌های FRCM نیز بر اساس پژوهش Carloni و همکارانش [۴۰]، دارای مقاومت فشاری 55MPa ، مقاومت کششی 10MPa و ضریب کششسانی 25GPa می‌باشد. به‌منظور پوشش کامل الیاف، ضخامت لایه‌ی درونی پایه به-عنوان پوشش‌دهنده‌ی زیر المان بتنی، t_{int} و لایه بیرونی پایه به‌عنوان پوشش‌دهنده‌ی نهایی لایه‌ی الیاف فولادی، t_{ext} برابر با هم و به‌اندازه-ی 4mm در نظر گرفته شدند. فاصله‌ی بین هرکدام از رشته‌های الیاف فولادی، s به گونه‌ای انتخاب شدند که سختی محوری در شبکه‌ی الیاف فولادی، $E_s \cdot t_{eq}$ که در آن t_{eq} ضخامت معادل برای لایه‌ی الیاف فولادی می‌باشد، با سختی محوری معادل آن در راستای طولی کامپوزیت‌های FRP (جدول ۶)، $E_1 \cdot t_{FRP}$ ، که در آن t_{FRP} معادل با حالت پوشش کامل ستون در پژوهش Mutalib و Hao [۵۵] است، یکسان باشند. این برابری، امکان مقایسه‌ی کارایی کامپوزیت‌های FRCM پیشنهادی در این مقاله با کامپوزیت‌های FRP به‌کار رفته در پژوهش Mutalib و Hao [۵۵] را فراهم می‌کند. بر این اساس، ضخامت معادل لایه‌ی الیاف فولادی، t_{eq} ، برابر 0.21mm به‌دست می‌آید. از این رو، برای طول واحد در شبکه‌ی الیاف، فاصله‌ی بین هرکدام از رشته‌های الیاف فولادی، s برابر $14/96\text{mm}$ محاسبه می‌شود که برای هماهنگی با محدودیت‌های اجرایی در این مقاله برابر 15mm در نظر گرفته شده است.



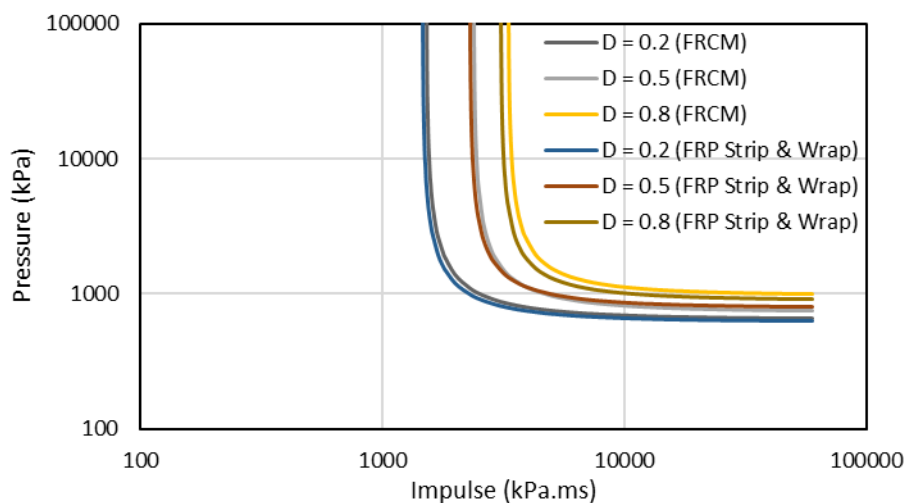
شکل ۱۹: پیکره بندی ستون بتن آرمه ی تقویت شده به کمک کامپوزیت های نوین FRM

پس از انجام الگوسازی عددی در نرم افزار، مطابق با پژوهش Shi و همکارانش [۴۸]، بار انفجاری با بیشینه فشار و ضربه ای به ترتیب برابر 610 kPa و 1010 kPa.ms به ستون بتنی تقویت شده با کامپوزیت های FRM نیز اعمال شد و نتیجه ی خسارت های وارد بر آن با ستون بدون تقویت مقایسه شدند که در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۲۰: بیشینه خسارت‌های برشی (الف) و خمشی (ب) در ستون بتن آرمه‌ی بدون تقویت و خسارت ستون تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM (ج)

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، میزان خسارت‌های ایجادشده در ستون تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM در برابر بیشینه خسارت‌های برشی و خمشی ایجادشده در ستون بدون تقویت ناچیز است. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر رفتار ستون‌های بتن آرمه‌ی تقویت‌شده با این کامپوزیت‌ها در برابر بارهای انفجاری، نتیجه‌های به‌دست آمده از پژوهش Mutalib و Hao [۵۵] برای ستون بتن آرمه تقویت‌شده با ترکیب نوار و پوشش کامپوزیت FRP (ستون C4)، با نتیجه‌های به‌دست آمده در این مقاله مقایسه می‌شوند. خلاصه‌ی نتیجه‌های این مقایسه در شکل ۲۱ و در جدول ۸ گزارش شده‌اند.



شکل ۲۱: منحنی‌های فشار - ضربه ستون‌های بتن آرمه تقویت‌شده با ترکیب نوار و پوشش کامپوزیت FRP [۵۵] و ستون متناظر تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM

جدول ۸: مجانب‌های فشار و ضربه در ستون‌های تقویت‌شده با ترکیب نوار و پوشش کامپوزیت FRP [۵۵] و ستون متناظر تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM

D	P_0 (kPa)		I_0 (kPams)	
	FRP Wrap & Strip	FRCM	FRP Wrap & Strip	FRCM
۰/۲	۶۳۲	۶۵۸	۱۴۶۴	۱۵۲۶
۰/۵	۷۸۶	۷۴۲	۲۳۱۵	۲۳۸۹
۰/۸	۹۰۹	۹۸۲	۳۰۹۵	۳۳۳۳

ارزیابی نتیجه‌های گزارش‌شده در شکل ۲۱ و در جدول ۸ نشان می‌دهند که در هر سطح خسارت اندک و زیاد، به ترتیب D برابر ۰/۲ و ۰/۸، ستون تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRCM نسبت به ستون تقویت‌شده با کامپوزیت‌های سنتی FRP مقاومت و کارایی مناسب‌تری داشته است. در سطح خسارت میانه، D برابر ۰/۵، منحنی فشار - ضربه و مجانب‌های متناظر آن‌ها در دو سامانه‌ی کامپوزیتی به‌طور تقریبی یکسان است. علت این امر را می‌توان لغزش الیاف درون لایه‌های کامپوزیت FRCM و استهلاک انرژی انفجار به‌صورت نیروی اصطکاکی دانست. در سرعت‌های بارگذاری میانه، ناحیه‌ی میانی نمودار فشار - ضربه، این امکان به‌وجود می‌آید که الیاف درون ملات لغزش داشته باشند و با شکل‌پذیری بیشتر نسبت به دو ناحیه‌ی دیگر نمودار، رفتار نرم‌تری از خود نشان دهند. در حالی که، در خسارت اندک و زیاد، به ترتیب D برابر ۰/۲ و ۰/۸، انرژی انفجار به‌صورت تنش محوری در الیاف مستهلک می‌شود و این امر با افزایش محصورشدگی در ستون، میزان خسارت را کاهش داده و کارایی ستون تقویت‌شده را بالاتر می‌برد.

علاوه بر مقایسه‌ی ویژگی‌های رفتاری، بر اساس پی‌گیری نویسندگان این مقاله از یکی از شرکت‌های فعال اروپایی [۵۷] در زمینه‌ی تولید و اجرای کامپوزیت‌های سنتی و نوین، قیمت نهایی مصالح و اجرای هر کدام از کامپوزیت‌ها با الیاف و ویژگی‌های مشابه در این مقاله برای هر مترمربع از کامپوزیت‌های FRP دارای ۳۰۰ gr الیاف برابر ۲۵۰€ (یورو) و برای هر مترمربع از کامپوزیت‌های نوین FRCM دارای ۱۷۰ gr الیاف برابر ۱۲۰€ (یورو) می‌باشد. در این مقاله، برای سطحی به مساحت $۹/۲\text{m}^2$ (سطح جانبی ستون انتخاب‌شده)، وزن الیاف در ستون C4، که دارای سه‌لایه پوشش کامل از کامپوزیت FRP، سه نوار با عرض ۱۰۰ mm بر وجه‌های روبرو و پشت و دو نوار با عرض ۱۲۵ mm در وجه‌های کناری می‌باشد، برابر ۱۶/۵۹ kg و وزن الیاف در ستون تقویت‌شده با پوشش کامل از کامپوزیت‌های FRCM، برابر ۱۵/۱۷ kg می‌باشد. از این رو، هزینه‌ی تمام‌شده برای تقویت هر متر مربع از ستون به کمک کامپوزیت‌های FRP دارای ۱/۸۱ kg الیاف برابر ۱،۵۰۸€ (یورو) و به کمک کامپوزیت‌های FRCM دارای ۱/۶۴ kg الیاف برابر ۱،۱۵۷€ (یورو) محاسبه می‌شود که در مقایسه با کامپوزیت‌های FRP، ۲۳/۳٪ ارزان‌تر هستند. علت کاهش هزینه‌های تمام‌شده در کامپوزیت‌های FRCM نسبت به کامپوزیت‌های FRP را می‌توان در استفاده از مواد معدنی پایه به‌عنوان جایگزین مواد آلی در چسب‌های اپوکسی و اجرای آسان‌تر آن‌ها دانست. البته باید اشاره کرد که رفتار این دو گونه کامپوزیت در برابر بارهای واردشده به علت وجود لغزش، اصطحکاک و رفتار نرم‌تر در کامپوزیت‌های FRCM، متفاوت است و برتری‌های رفتاری این کامپوزیت‌ها نسبت به هزینه‌های تمام‌شده‌ی پایین‌تر در آن‌ها در اولویت نخست قرار می‌گیرند.

در حالت کلی، با افزایش ضخامت ورق‌ها و یا افزایش تعداد نوارها و پوشش‌ها در کامپوزیت‌های سنتی FRP، در مقایسه با کامپوزیت‌های نوین FRCM با یک لایه از الیاف فولادی، می‌توان خسارت‌های ستون‌های بتن‌آرمه در برابر بارهای انفجاری را به میزان بیشتری کاهش داد. این امر، علاوه بر افزایش هزینه‌ها و مشکل‌های اجرایی، سبب برجسته‌شدن کاستی‌های کامپوزیت‌های FRP مانند مقاومت کم در برابر آتش، ناتوانی در عملکرد مناسب در دماهای پایین و سطح‌های مرطوب، وابسته بودن کارایی به ویژگی‌های مکانیکی سطح اعمالی و مهم‌تر از آن‌ها، شکست ترد المان‌های تقویت‌شده به کمک این کامپوزیت‌ها در برابر بارهای ناگهانی مانند بارهای انفجاری در رفتار سازه خواهد شد. از این رو، با توجه به هزینه‌های پایین‌تر اجرای کامپوزیت‌های نوین FRCM و هم‌چنین برتری‌های آن‌ها مانند سازگاری بیشتر با محیط‌های مختلف، استقامت حرارتی بالا، آسان بودن نصب، وابسته نبودن عملکرد به ویژگی‌های سازه و سطح اعمالی و مهم‌تر از همه، دارا بودن رفتاری شکل‌پذیر در برابر بارهای واردشده به علت لغزش الیاف، می‌توان آن‌ها را جایگزینی مناسب برای تقویت ستون‌های بتنی در برابر بارهای انفجاری دانست. اشاره به این نکته ضروری است که، در کامپوزیت‌های نوین FRCM نیز می‌توان برای دستیابی به خسارت‌های کم‌تر، تعداد لایه‌های الیاف و سطح مقطع هر کدام از آن‌ها را نیز افزایش داد و به کارایی مورد نظر دست یافت.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ستون‌های بتن‌آرمه به کمک کامپوزیت‌های سنتی FRP و کامپوزیت‌های نوین FRCM تقویت شدند و در برابر بارهای انفجاری قرار گرفتند. در ستون‌های تقویت‌شده به کمک کامپوزیت‌های FRP، از سه الگوی تقویت نواری، تقویت با پوشش کامل ستون و ترکیبی از هر دو گونه بهره‌جویی شد. کامپوزیت‌های FRCM، دور تا دور ستون را به کمک دولایه ملات پایه‌سیمانی که الیافی از جنس فولاد را در میانه‌ی خود داشتند، می‌پوشاندند. رفتار ستون‌های تقویت‌شده به کمک دو سامانه در برابر بارهای انفجاری بر اساس نمودارهای

فشار - ضربه و در سه سطح خسارت اندک، میانه و زیاد انجام ارزیابی شدند. نتیجه‌ها نشان دادند که در خسارت‌های اندک و زیاد، کارایی ستون‌های تقویت‌شده به کمک کامپوزیت‌های FRCM نسبت به کامپوزیت‌های سنتی FRP مناسب‌تر است. در سطح خسارت میانه، به علت لغزش الیاف درون دو لایه ملات و رفتار نرم‌تر نسبت به حالت‌های خسارت اندک و زیاد در کامپوزیت‌های FRCM، کارایی این دو سامانه یکسان ارزیابی شد. در پایان، به علت کارایی مناسب و آسان‌تر بودن روش اجرا، می‌توان کامپوزیت‌های FRCM را جایگزینی مناسب برای سامانه‌های سنتی تقویت ستون‌های بتن‌آرمه در برابر بارهای انفجاری دانست.

مراجع

- [1] Krauthammer T (1970) Blast mitigation technologies: developments and numerical considerations for behavior assessment and design. *WIT Trans Built Environ* 35.
- [2] Gilmour JR, Viridi KS (1998) Numerical modelling of the progressive collapse of framed structures as a result of impact or explosion. In: *2nd Int. Ph. D. Symposium in Civil Engineering*, Budapest, Hungary
- [3] Buchan PA, Chen JF (2007) Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures--A state-of-the-art review. *Compos Part B Eng* 38:509–522
- [4] Chen JF, Teng JG (2003) Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Constr Build Mater* 17:27–41
- [5] Carloni C, Subramaniam K V (2010) Direct determination of cohesive stress transfer during debonding of FRP from concrete. *Compos Struct* 93:184–192
- [6] Buyukozturk O, Hearing B (1998) Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP. *J Compos Constr* 2:138–144
- [7] Subramaniam K V, Carloni C, Nobile L (2011) An understanding of the width effect in FRP--concrete debonding. *Strain* 47:127–137
- [8] Carloni C, Subramaniam K V (2012) FRP-masonry debonding: numerical and experimental study of the role of mortar joints. *J Compos Constr* 16:581–589
- [9] Crawford JE, Malvar LJ, Morrill KB (2001) Reinforced concrete column retrofit methods for seismic and blast protection. In: *Proceeding of the SAME National Symposium on Comprehensive Force Protection*, Charleston, SC
- [10] Foden A, Balaguru P, Lyon R, Davidovits J (1996) High temperature inorganic resin for use in fiber reinforced composites. In: *First International Conference on Composites in Infrastructure*
- [11] D'Antino T, Sneed L, Carloni C, Pellegrino C (2013) Bond behavior of the FRCM-concrete interface
- [12] Loreto G, Babaeidarabad S, Leardini L, Nanni A (2015) RC beams shear-strengthened with fabric-reinforced-cementitious-matrix (FRCM) composite. *Int J Adv Struct Eng* 7:341–352
- [13] Donnini J, Corinaldesi V (2017) Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement. *Constr Build Mater* 145: . doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.051
- [14] y Basalo FJ, Nanni A, James JP (2009) Qualitative and quantitative environmental impact analysis of BFRC vs GFRP: green building construction rehabilitation systems. In: *Engineering sustainability conference*. Pittsburgh (PA)

- [15] Bisby LA, Roy EC, Ward M, Stratford TJ (2009) Fibre reinforced cementitious matrix systems for fire-safe flexural strengthening of concrete: pilot testing at ambient temperature. *Proc Adv Compos Constr Edinburgh, UK*
- [16] Triantafillou T (2011) Innovative textile-based composites for strengthening and seismic retrofitting of concrete and masonry structures. In: *Advances in FRP Composites in Civil Engineering*. Springer, pp 3–12
- [17] Wiberg A (2003) Strengthening of concrete beams using cementitious carbon fibre composites. *Bygghvetenskap*
- [18] Banholzer B, Brockmann T, Brameshuber W (2006) Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements. *Mater Struct* 39:749–763
- [19] Brückner A, Ortlepp R, Curbach M (2006) Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. *Mater Struct Constr* 39:741–748 . doi: 10.1617/s11527-005-9027-2
- [20] Hegger J, Will N, Bruckermann O, Voss S (2006) Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. *Mater Struct* 39:765–776
- [21] Hartig J, Häußler-Combe U, Schick Tanz K (2008) Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. *Cem Concr Compos* 30:898–906
- [22] Peled A, Zaguri E, Marom G (2008) Bonding characteristics of multifilament polymer yarns and cement matrices. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 39:930–939
- [23] Zastra B, Lepenies I, Richter M (2008) On the multi scale modeling of textile reinforced concrete. *Tech Mech* 28:53–63
- [24] Täljsten B, Blanksvärd T (2007) Mineral-based bonding of carbon FRP to strengthen concrete structures. *J Compos Constr* 11:120–128
- [25] Wu HC, Sun P (2005) Fiber reinforced cement based composite sheets for structural retrofit. In: *Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures (BBFS 2005)*. pp 343–348
- [26] Prota A, Marcari G, Fabbrocino G, et al (2006) Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix--grid composites. *J Compos Constr* 10:223–233
- [27] Lignola GP, Prota A, Manfredi G (2009) Nonlinear analyses of tuff masonry walls strengthened with cementitious matrix-grid composites. *J Compos Constr* 13:243–251
- [28] Parisi F, Lignola GP, Augenti N, et al (2011) Nonlinear behavior of a masonry subassembly before and after strengthening with inorganic matrix-grid composites. *J Compos Constr* 15:821–832
- [29] Kolsch H (1998) Carbon fiber cement matrix (CFCM) overlay system for masonry strengthening. *J Compos Constr* 2:105–109
- [30] D'Ambrisi A, Focacci F, Luciano R, et al (2015) Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges. *Compos Part B Eng* 75:355–366
- [31] Tetta ZC, Koutas LN, Bournas DA (2016) Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors. *Compos Part B Eng* 95:225–239
- [32] D'Antino T, Papanicolaou C (2017) Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites. *Compos Part B Eng*
- [33] Ombres L (2011) Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material. *Compos Struct* 94:143–155
- [34] Loreto G, Leardini L, Arboleda D, Nanni A (2013) Performance of RC Slab-Type Elements Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious-Matrix Composites. *Am Soc Civ Eng* 1–9 . doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000415.
- [35] Babaeidarabad S, Loreto G, Nanni A (2014) Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. *J Compos Constr* 1–12 . doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000473.
- [36] Tzoura E, Triantafillou TC (2016) Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets. *Mater Struct* 49:17–28
- [37] Elsanadedy HM, Almusallam TH, Alsayed SH, Al-Salloum YA (2013) Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar--Experimental and numerical study. *Compos Struct* 97:40–55

- [38] Santandrea M, Quartarone G, Carloni C, Gu XL (2017) Confinement of Masonry Columns with Steel and Basalt FRCM Composites. In: *Key Engineering Materials*. pp 342–349
- [39] Koutas LN, Bournas DA (2016) Flexural strengthening of two-way RC slabs with textile-reinforced mortar: experimental investigation and design equations. *J Compos Constr* 4016065
- [40] Carloni C, Verre S, Sneed LH, Ombres L (2017) Loading rate effect on the debonding phenomenon in fiber reinforced cementitious matrix-concrete joints. *Compos Part B Eng* 108:301–314 . doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.087
- [41] Weiland S, Ortlepp R, Curbach M (2006) Strengthening of predeformed slabs with textile reinforced concrete. In: *Proceedings of the second International fib-Congress CEB-FIP*
- [42] Gonzalez-Libreros JH, Sabau C, Sneed LH, et al (2017) State of research on shear strengthening of RC beams with FRCM composites. *Constr Build Mater* 149:444–458
- [43] Focacci F, Carloni C (2015) Periodic variation of the transferable load at the FRP-masonry interface. *Compos Struct* 129: . doi: 10.1016/j.compstruct.2015.03.008
- [44] Mays G (1995) Blast effects on buildings: Design of buildings to optimize resistance to blast loading. *Thomas Telford*
- [45] Smith PD, Hetherington JG (1994) Blast and ballistic loading of structures. *Digital Press*
- [46] Merrifield R (1993) Simplified calculations of blast induced injuries and damage. *Health and Safety Executive, Technology and Health Sciences Division*
- [47] Baker WE, Cox PA, Kulesz JJ, et al (2012) Explosion hazards and evaluation. *Elsevier*
- [48] Shi Y, Hao H, Li Z-X (2008) Numerical derivation of pressure--impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads. *Int J Impact Eng* 35:1213–1227
- [49] Li QM, Meng H (2002) Pressure-impulse diagram for blast loads based on dimensional analysis and single-degree-of-freedom model. *J Eng Mech* 128:87–92
- [50] Li QM, Meng H (2002) Pulse loading shape effects on pressure--impulse diagram of an elastic--plastic, single-degree-of-freedom structural model. *Int J Mech Sci* 44:1985–1998
- [51] Fallah AS, Louca LA (2007) Pressure--impulse diagrams for elastic-plastic-hardening and softening single-degree-of-freedom models subjected to blast loading. *Int J Impact Eng* 34:823–842
- [52] Ma GW, Shi HJ, Shu DW (2007) P--I diagram method for combined failure modes of rigid-plastic beams. *Int J Impact Eng* 34:1081–1094
- [53] Karthaus W, Leussink JW (1983) Dynamic loading: more than just a dynamic load factor
- [54] Army US (1990) Navy and Air Force. Structures to resist the effect of accidental explosions. *TM5-1300*
- [55] Mutalib AA, Hao H (2011) Development of P-I diagrams for FRP strengthened RC columns. *Int J Impact Eng* 38:290–304 . doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.029
- [56] Sayed-Ahmed EY (2006) Numerical investigation into strengthening steel I-section beams using CFRP strips. In: *Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety*. pp 1–8
- [57] Kerakoll S.p.A. – web site: <www.kerakoll.com> [accessed May 2017].