

مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح در برابر انفجار با پوشش بتن الیافی فوق توانمند UHPFRC

امیر زمانی^۱، محمدرضا ماهینی^۲، سمیه ملایی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار دانشگاه خلیج فارس، ۳- استادیار دانشگاه بناب
(تاریخ وصول: ۹۹/۰۳/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۴/۱۸)

چکیده

در این پژوهش، کاربرد بتن‌های فوق توانمند الیافی که دارای مقاومت کششی و ظرفیت اتلاف انرژی بالا هستند، در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، ستون‌های ساخته شده از UHPFRC به صورت عددی شبیه‌سازی شده و پس از انطباق قابل قبول پاسخ‌های محاسباتی و نتایج آزمایش انفجار موجود در مطالعات گذشته، تقویت ستون‌های بتنی معمولی با پوشش ساخته شده از این مصالح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که حداکثر جابه‌جایی مدل‌های مقاوم‌سازی شده با UHPFRC، به میزان قابل توجهی نسبت به نمونه عادی کاهش پیدا می‌کند به طوری که مثلاً به ازای ۵۰ میلی‌متر ضخامت لایه مقاوم‌ساز، حدود ۶۳ درصد جابه‌جایی حداکثر ستون کمتر می‌شود. با ترسیم نمودار فشار - ضربه جهت ارزیابی آسیب ستون، مشخص گردید که با استفاده از پوشش UHPFRC ظرفیت ستون در برابر انفجارهای حوزه‌ی نزدیک و دور، با افزایش چشمگیری همراه است.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی فوق توانمند UHPFRC، بار انفجار، ستون بتن مسلح، نمودار فشار - ضربه P-I.

Damage Assessment of RC Columns Strengthened by UHPFRC Jackets against Blast Loading

A. Zamani, M. R. Mahini, S. Mollaei*

University of Bonab

(Received: 06/13/2020, Accepted: 07/08/2020)

Abstract

Regarding the increase of terrorist threats and the possibility of blast events in the vicinity of industrial and residential buildings, the assessment of the resistance of all kinds of structures against the blast loads is very important. Concrete materials are more liable to threats than other kinds of structures because of low ductility. One of the solutions is to use some kinds of engineered cementitious composites and fiber reinforced concretes. In this study, usage and employment of ultra-high performance fiber reinforced concretes (UHPFRC's) that have high tensile strength and a considerable capacity of energy dissipation regarding the strengthening of the structures against the blast loading has been taken into consideration. In this regard, by choosing the material model based on the plasticity and damage for materials of ultra-high performance fiber reinforced concretes; first of all, the models of the columns made of UHPFRC during the field blast test done by other researchers' studies, is simulated in a numerical manner and after ensuring the acceptable accordance of computational responses with recorded data during the blast test, using the modern method of jacketing with cover of ultra-high performance fiber reinforced concrete, the strengthening of the normal RC columns by using those jackets made of UHPFRC has been studied numerically. The results of numerical analyses show that the maximum displacement of models strengthened by UHPFRC will decrease considerably in proportion to unstrengthened models. For example, for 50 mm thick UHPFRC jacket, maximum mid-span displacement decreases about 63% (from 153 mm to 55 mm). Also, after generating the pressure-impulse (P-I) diagram, in order to assess the damage to the strengthened columns, it was made clear that by using the UHPFRC cover, the bearing capacity of the column against the blast load in the near and far field area, will increase considerably.

Keywords: Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), Blast Load, RC Column, Pressure-Impulse (P-I) Diagram.

۱- مقدمه

برای طراحی سازه‌های مقاوم برابر انفجار استفاده از مصالحی که قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالایی را داشته باشد ضرورت دارد. از این رو برای مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار به مصالحی نیاز است که ضمن داشتن مقاومت بالا، از شکل‌پذیری قابل قبولی نیز برخوردار باشند. یکی از مصالح پرکاربرد و در دسترس برای ساخت و تقویت سازه‌ها، بتن است که البته در کشش عملکرد بسیار ضعیفی دارد. این ضعف با ظهور بتن‌های الیافی و بتن‌های الیافی توانمند، به طرز قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

محققین بسیاری اثرات انفجار و ضربه بر روی سازه‌ها و روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر اینگونه بارها را بررسی کرده‌اند. تحلیل اثرات ناشی از انفجار بر روی سازه‌ها از سال ۱۹۵۹ توسط ارتش آمریکا با انتشار نشریه‌ای به نام "سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجارهای تصادفی" آغاز و در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۸ مورد بازنگری قرار گرفت [۱].

اخیراً استفاده از FRP^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های مقاوم‌سازی به اثبات رسیده و محققین بسیاری اثربخشی آن را مورد مطالعه آزمایشگاهی و عددی قرار داده‌اند. مقاومت مکانیکی بالاتر، دوام بیشتر برابر خوردگی، عملکرد یکپارچه‌تر با هسته بتنی، سرعت اجرای عملیات مقاوم‌سازی و نیز سادگی نصب و استفاده از آن را می‌توان از جمله مزایای این روش در مقایسه با سایر روش‌های مقاوم‌سازی دانست. هزینه بالای تهیه و اجرای کامپوزیت FRP و استعداد اشتعال در هنگام وقوع حریق، که از پیامدهای معمول انفجار تلقی می‌گردد، از مهم‌ترین ایرادات این روش مقاوم‌سازی به شمار می‌رود [۲]. از جمله مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح در برابر انفجار، پژوهش موریل و کراوفورد [۳] است. در این تحقیق ستون‌های مقاوم‌سازی شده با FRP و ستون‌های بتن مسلح معمولی تحت آزمایش انفجارهای با شدت یکسان قرار گرفتند. در این پژوهش نتیجه گرفته شد که مقاوم‌سازی با CFRP می‌تواند روشی کارآمد برای بالا بردن ظرفیت تحمل اعضا در برابر بارهای شدید و ناگهانی تلقی شود [۳]. ایزدی‌فرد و متقی [۴]، مقاوم‌سازی دال‌های بتن مسلح با ورق‌های CFRP و GFRP را بررسی کرده‌اند. همچنین، ایزدی‌فرد و نظری‌نژاد [۵]، ایده استفاده از لایه‌های جذب در افزایش مقاومت انفجاری دال‌های بتن مسلح را آزمایش کرده‌اند.

در پاسخ به نیاز تقویت اعضای بتنی در برابر انفجار، تأثیر استفاده از نوارهای افقی و قائم پلیمرهای کربنی FRP بر عملکرد ستون بتنی در برابر بارهای انفجاری، موضوع و محل تحقیق و بررسی عده‌ای دیگر از پژوهشگران بوده است [۸-۶]. با ظهور کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی که از شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی بسیار بالاتری در مقایسه با بتن معمولی برخوردارند، نیاز به تحقیق بیشتر در رابطه با استفاده از

این مصالح در مقاوم‌سازی در برابر انفجار و ضربه احساس می‌شود. بتن‌های الیافی فوق توانمند UHPFRC در فشار به‌طور متوسط رفتاری شبیه بتن پر مقاومت از خود بروز داده و مقاومت فشاری بین ۳۰ تا ۱۶۰ مگاپاسکال و حتی بیشتر را دارند. مقاومت کششی این نوع مصالح نیز بر حسب نوع الیاف استفاده شده متغیر بوده و در حدود ۴ الی ۱۶ مگاپاسکال و گاهی بالاتر گزارش شده است [۹-۱۲].

از اندک پژوهش‌های در دسترس می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی و عددی کوسومانی‌گروم [۱۳] اشاره کرد که طی آن با استفاده از مصالح ECC، ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی را در مقابل بار انفجاری مقاوم‌سازی نموده‌اند. در این راستا پوششی از مصالح ECC با ضخامت معین دور تا دور ستون بتنی موجود اجرا شده و سپس نمونه مقاوم شده در معرض بار انفجار واقعی قرار داده شده است. نتایج تحقیق از بهبود قابل ملاحظه در عملکرد ستون از حیث کاهش حداکثر جابه‌جایی، کاهش جابه‌جایی پسماند و افزایش ظرفیت باربری ستون حکایت داشته است. نکته شایان توجه در این پژوهش آن است که حتی پس از انفجارهای شدید نیز انسجام بین هسته بتنی و پوشش تقویتی ECC همچنان برقرار بوده و پدیده جداشدگی بین پوشش ECC و هسته بتنی مشاهده نشده است [۱۳].

از آنجا که پدیده‌هایی همچون زلزله، انفجار و ضربه‌های شدید، انرژی زیادی را به سازه و اعضای ساختمانی وارد می‌کنند، محققین به‌کارگیری مصالحی با قدرت جذب انرژی بالا همچون UHPFRC را به‌عنوان راه‌حل برابر بارگذاری‌های شدید در دستور کار قرار داده‌اند. استفاده از UHPFRC جهت مقاوم‌سازی اجزای سازه‌ای، اعم از تیر و ستون، در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته و منجر به حصول نتایج مثبت و ارزشمندی شده است [۱۹-۱۴]. دو امتیاز اصلی که انگیزه لازم را جهت استفاده از این مصالح برای طراحی سازه‌های امن و تقویت سازه‌های موجود در برابر انفجار ایجاد کرده است، توانایی این مصالح در پیشگیری از گسیختگی‌های فاجعه‌بار نظیر خرابی پیش‌رونده و نیز قابلیت آن در کاهش ترک‌های ثانویه حاصل از انفجار یا برخورد موشک‌ها است [۲۰].

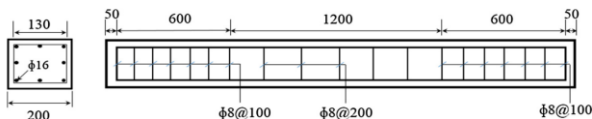
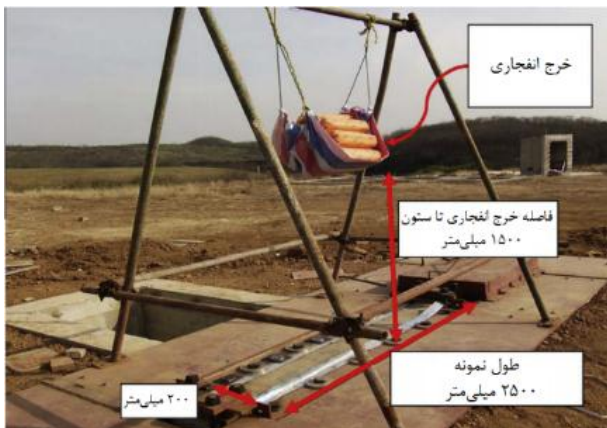
آستارلیوگلو و کروتامر [۲۱] در مطالعه‌ای عددی به بررسی پاسخ ستون‌های بتنی ساخته شده از بتن با مقاومت معمولی و ستون‌های ساخته شده از بتن‌های الیافی توانمند (UHPFRC) پرداختند و با ساده‌سازی مسئله به سامانه یک درجه آزاد SDOF، نتایج حاصله را با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط بورل [۲۲] و مدل المان محدود ایجاد شده در ABAQUS/EXPLICIT با استفاده از مدل CDP اعتبارسنجی نمودند [۲۱]. لی و همکاران [۲۳] ظرفیت باربری پسماند در ستون‌های بتن الیافی فوق توانمند UHPC^۲ که تحت اثر انفجار قرار گرفته بودند را مورد آزمایش قرار دادند که طی آن مشاهده شد که ستون‌های UHPC به دلیل خصوصیات مکانیکی ممتاز مقاومت

۲- مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

در آزمایش ژو و همکاران [۲۰]، ستون‌های ساخته شده از UHPFRC با ۲/۵ درصد الیاف فولادی تحت اثر بار ناشی از انفجار ۱ و ۱۷/۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۵۰۰ میلی‌متر از وسط ستون‌ها قرار گرفته‌اند. طول هر یک از ستون‌ها ۲۵۰۰ میلی‌متر بوده و با مقطع مربعی به بعد ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. نام‌گذاری نمونه‌ها بر حسب جدول (۱) انجام شده و مشخصات هندسی و شرایط بارگذاری ستون‌ها و انجام آزمایش در شکل (۱) تشریح شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۲۰].

مدل	بار محوری (kN)	فاصله تا خرج انفجاری (m)	فاصله مقیاس شده (m/kg ^{1/3})	وزن معادل TNT (kg)
U1-A	۰	۱/۵	۱/۵	۱
U2-A	۰	۱/۵	۰/۵۸	۱۷/۵
U1-B	۱۰۰۰	۱/۵	۱/۵	۱
U2-B	۱۰۰۰	۱/۵	۰/۵۸	۱۷/۵



شکل ۱- مدل‌های مورد نظر، بالا: شرایط کلی و نصب ستون آزمایش، پایین: مشخصات هندسی ستون‌های UHPFRC [۲۰].

در این پژوهش آزمایش فوق بر اساس شرایط مرزی و خواص مصالح توصیه شده توسط محققین مربوطه، در محیط نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی گردیده است. با هدف کاهش حجم محاسبات، از تقارن موجود در مسئله بهره برده شده و از طریق اختصاص شرایط تکیه‌گاهی مناسب، تنها یک چهارم ستون مدل‌سازی شده که در شکل (۲) نشان داده شده است.

بالایی از خود نشان داده و پس از انفجار بیش از ۵۰ درصد از ظرفیت باربری خود را حفظ کرده‌اند [۲۳].

ژو و همکاران [۲۰]، با انجام آزمایش‌های انفجار واقعی، رفتار ستون‌های ساخته شده از بتن الیافی فوق توانمند UHPFRC و ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت HSC^۱ را تحت اثر انفجار بررسی کردند. ستون‌های ساخته شده تحت اثر بار انفجار قرار داده شد و برای همه نمونه‌ها جابه‌جایی جانبی وسط ستون اندازه‌گیری شد. ایشان با ارزیابی بر اساس سطح خرابی، حداکثر جابه‌جایی و الگوهای ترک خوردگی به این نتیجه رسیدند که ستون‌های ساخته شده از UHPFRC تحت اثر انفجار عملکرد به مراتب بهتری را از خود به نمایش می‌گذارند. ژو و همکاران [۲۴]، همچنین مشخصات مکانیکی ستون‌های ساخته شده از UHPFRC را در ابعاد واقعی مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. در این مطالعه ستون‌های UHPFRC در دو حالت با و بدون حضور بار محوری تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفت و نمودارهای بار جابه‌جایی و لنگر - انحناء برای مقاطع به دست آورده شد. از طریق روابط لنگر - انحناء به دست آمده، مدل اجزای محدود یک بعدی برای این نمونه‌ها تدوین شد و پاسخ ستون‌ها در برابر بار انفجار مورد مطالعه قرار گرفت و میزان مطابقت نتایج با پاسخ‌های آزمایش بررسی گردید. نتایج نشان دهنده مطابقت خوب تحلیل اجزاء محدود یک بعدی با آزمایش بود.

مطالعه آزمایشگاهی در برابر انفجار و ضربه با وجود نتایج ارزشمندی که در اختیار محققین قرار می‌دهد، دربردارنده مخاطرات و مشکلات فراوانی است. از بین رفتن حسگرهایی که برای ثبت کردن پارامترهایی نظیر جابه‌جایی و سرعت و شتاب و ... تعبیه شده‌اند و نیز هزینه بالای انجام آزمایش‌های انفجار از دیگر مشکلات انجام چنین آزمون‌هایی به شمار می‌رود. از این رو مطالعات عددی و شبیه‌سازی رایانه‌ای برای بررسی پدیده انفجار و ضربه و تأثیر آن بر روی سازه از مناسب‌ترین ابزار تلقی گردیده و مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از مدل‌های رفتاری قابل اطمینان و تخصیص مناسب پارامترهای مصالح در اینگونه شبیه‌سازی‌ها اهمیت قابل ملاحظه داشته و پاسخ‌های سازه‌ای و نتیجه‌گیری‌ها را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در این پژوهش ابتدا با شبیه‌سازی عددی آزمایش ژو و همکاران [۲۰] و نیز با در نظر گرفتن نتایج تحقیقات مرتبط که از نتایج این آزمایش‌ها استفاده کرده‌اند [۲۳، ۲۵، ۲۶]، توانمندی مدل CDP در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit [۲۷]، در زمینه پیش‌بینی رفتار ستون‌های ساخته شده از بتن‌های فوق توانمند الیافی (UHPFRC) در مقابل انفجار به بوته آزمایش گذاشته شده و در گام بعد میزان اثر بخشی مقاوم‌سازی ستون ساخته شده با بتن معمولی، از طریق اجرای لایه پوششی از مصالح UHPFRC بر روی ستون، مورد مطالعه قرار گرفته است.

نشریه UFC-3-340-2 استخراج شده است و جهت تخمین بهتر مقدار ضربه از روی نمودار واقعی فشار به دست آمده است. جهت ساده سازی محاسبات از الگوی بار مثلثی استفاده شده که منطبق بر مدل سازی عددی ژو است [۲۴].

جدول ۳- مؤلفه های الگوی بارگذاری.

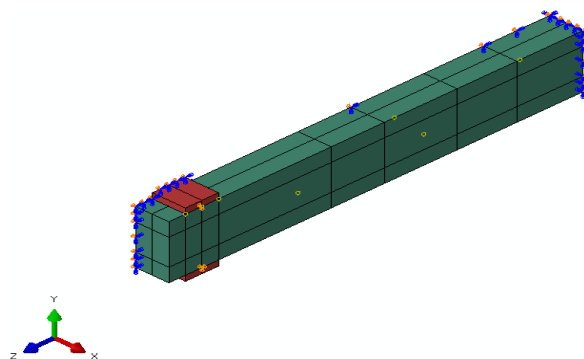
ضربه (MPa-ms)	فشار حداکثر (MPa)	بار انفجار (کیلوگرم TNT)
۱/۲	۱/۵	۱

۳-۲- مشخصات المان ها و مش بندی

در این پژوهش از مش بندی با اندازه ۱۵ میلی متر استفاده شد. از حیث مقادیر مجهول، بدون حضور بار محوری شامل ۸۷۷۳ گره و ۷۰۲۲ المان (مشتمل بر ۶۴۸۲ المان C3D8R، ۴۲۰ المان B31 و ۱۲۰ المان T3D2) است. مدل با حضور محوری ۸۷۹۷ گره و ۷۰۲۸ المان (مشتمل بر ۶۴۸۸ المان C3D8R، ۴۲۰ المان B31 و ۱۲۰ المان T3D2) را شامل می شود.

۴-۲- راستی آزمایی مدل اجزاء محدود

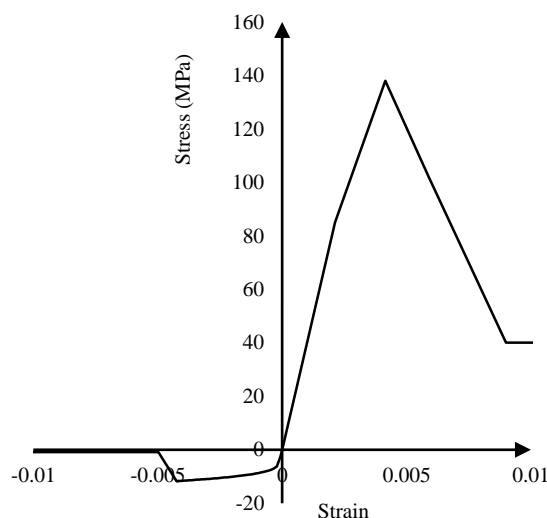
آزمون تشریح شده در بخش قبل، در نرم افزار ABAQUS/Explicit شبیه سازی و به روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، تحت اثر فشار ناشی از انفجارهای ۱ و ۱۷/۵ کیلوگرم TNT با و بدون حضور بار محوری تحلیل گردیده و پاسخ جابه جایی و نیز الگوی تشکیل و انتشار ترک خوردگی نمونه ها به عنوان خروجی تحلیل ثبت شده است. شایان ذکر است که پاسخ های نمونه تحت انفجار ۱ کیلوگرم TNT در غیاب بار محوری، تا زمان ۱۵۰ میلی ثانیه ثبت گردیده اند تا از این طریق، صحت انتخاب برخی پارامترهای ماده مرتبط با رفتار ارتجاعی با دقت بهتری بررسی گردد. در شکل (۴) پاسخ جابه جایی ستون U1-A و U1-B که به ترتیب تحت اثر انفجارهای ۱ و ۱۷/۵ کیلوگرم TNT تحلیل گردیده اند، در کنار نتایج آزمایشگاهی و عددی گزارش شده توسط لی و همکاران [۲۵] نمایش داده شده است. چنانکه نتایج تحلیل نشان می دهد، به سبب شدت کم انفجار در این آزمایش (شکل ۴-الف)، مصالح به ندرت وارد حوزه رفتار پلاستیک شده و نتایج حاصله عمدتاً متأثر از پارامترهای رفتار الاستیک سازه هستند. بر اساس تاریخچه زمانی پاسخ ستون به این انفجار، مشاهده می شود که دوره طبیعی ارتعاشات و روند میرایی به دست آمده مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمایش داشته و از این حیث پارامترهای الاستیک و شرایط مدل سازی در شبیه سازی عددی انجام شده در این تحقیق از دقت مطلوبی برخوردار هستند. همچنین مقایسه حداکثر جابه جایی حاصل از تحلیل و میزان انحراف نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی مندرج در جدول (۴) نیز نشان از دقت قابل قبول مدل ارائه شده در این پژوهش دارد.



شکل ۲- مدل اجزای محدود ستون UHPFRC و شرایط تکیه گاهی.

۱-۲- مدل بتن و فولاد

در این تحقیق از مدل رفتاری CDP برای مصالح بتنی استفاده شده است و رفتار تنش کرنش UHPFRC مطابق با شکل (۳) خواهد بود.



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش استفاده شده برای UHPFRC.

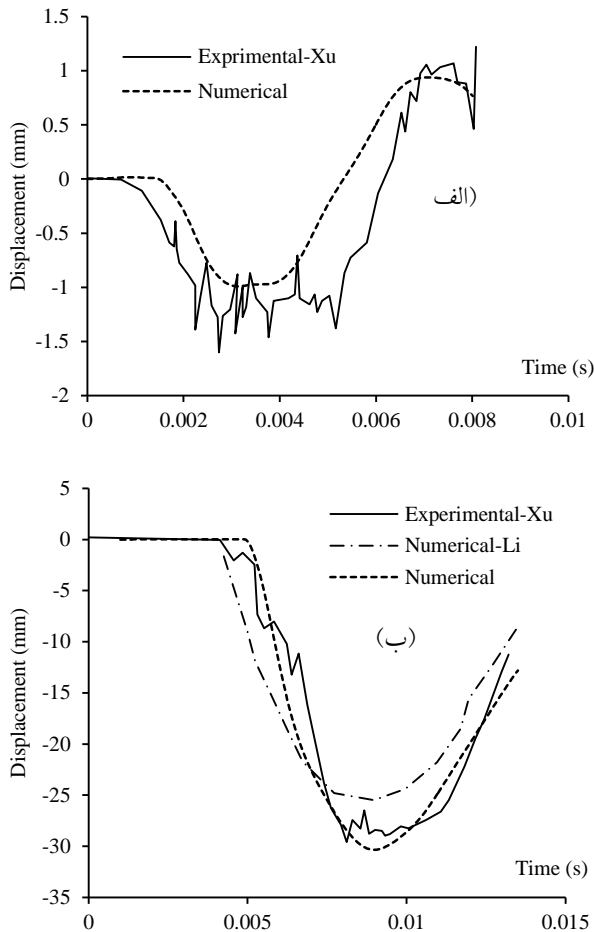
همچنین برای مصالح فولادی از مدل مبتنی بر معیار شکست فون-میسز استفاده شده و خواص فولاد و انتخاب پارامترهای مدل سازی مصالح فولادی با فرض میرایی ۲ درصد مطابق با جدول (۲) صورت گرفته است.

جدول ۲- خصوصیات مصالح فولاد.

خواص	میلگرد طولی	میلگرد عرضی
تنش تسلیم، MPa	۱۳۵۰	۳۰۰
تنش نهایی، MPa	۱۶۰۰	۴۰۰

۲-۲- بارگذاری انفجار

الگوی فشار وارده برای انفجارهای ۱ و ۱۷/۵ کیلوگرم TNT مطابق جدول (۳) فرض شده است. برای محاسبه بار وارده، فشار حداکثر از



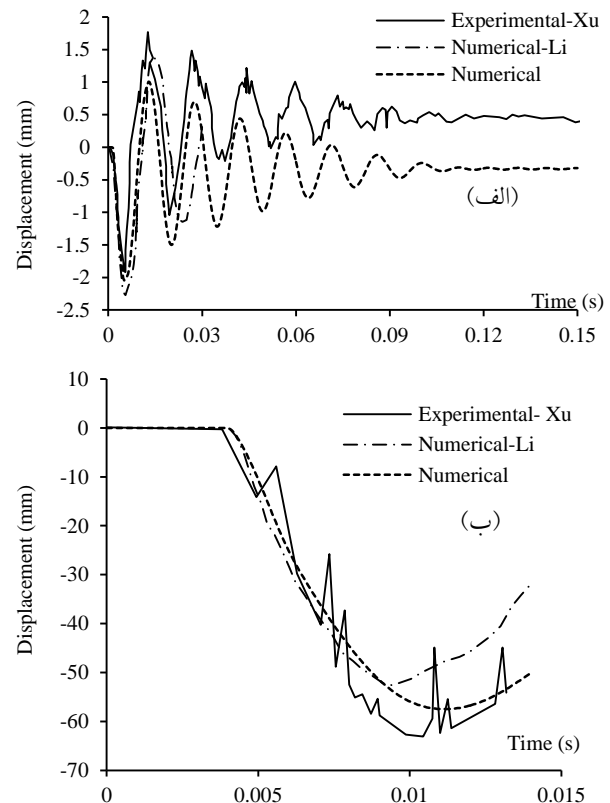
شکل ۵- جابه‌جایی جانبی وسط ستون‌ها، الف: نمونه U1-B و ب: نمونه U2-B.

در این حالات تحلیل نیز مدل عددی پیشنهادی با دقت قابل قبولی رفتار نمونه‌ها را در مقابل بار انفجار پیش‌بینی نموده و میزان انحراف نتایج حاصله و مقایسه با مدل عددی ساخته شده توسط لی و همکاران در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- جابه‌جایی نمونه‌ها تحت انفجارهای ۱ و ۱۷/۵ کیلوگرم TNT در تحقیق حاضر و مقایسه با لی و همکاران [۲۵ و ۲۶].

نمونه	TNT (کیلوگرم)	آزمایش	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	
			ABAQUS خطا (درصد)	LS-DYNA خطا (درصد)
U1-A	۱	۲	۲/۰۴	۲/۲۷
U2-A	۱۷/۵	۶۳	۵۷/۵	۵۲/۶۵
U1-B	۱	۱/۲	۱۶/۶۷	گزارش نشده
U2-B	۱۷/۵	۲۹/۳	۳۰/۳۳	۲۵/۵

پاسخ ستون ساخته شده از UHPFRC به انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT در شکل (۴-ب) و در کنار نتایج عددی و آزمایشگاهی گزارش شده توسط لی و همکاران نمایش داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مدل تهیه شده، حداکثر جابه‌جایی ستون برابر ۵۷/۵ میلی‌متر به دست می‌آید که در مقایسه با ۶۳ میلی‌متر جابه‌جایی حداکثر ثبت شده در آزمایش، از اختلافی در حدود ۸ درصد حکایت دارد که قابل قبول است.



شکل ۴- جابه‌جایی جانبی وسط ستون‌ها، الف: نمونه U1-A و ب: نمونه U2-B.

برای نمونه U1-B تحت انفجار ۱ کیلوگرم TNT و نمونه U2-B تحت انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT، ابتدا بار محوری ۱۰۰۰ کیلو نیوتن (۲۰ درصد ظرفیت محوری ستون) به ستون ساخته شده از UHPFRC وارد و سپس بار انفجار به ستون اثر داده شده است. تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی وسط دهانه برای اینگونه ستون‌ها تحت اثر انفجارهای ۱ و ۱۷/۵ کیلوگرم TNT به ترتیب در شکل (۵-الف و ب) نشان داده شده است. نتایج حاصله برای ستون‌ها در این بخش با کاهش قابل ملاحظه جابه‌جایی جانبی همراه بوده است. این مهم را می‌توان به دور شدن شرایط تکیه گاهی از مفصل در حالت اعمال بار محوری و همچنین پدید آمدن تنش فشاری در بتن به سبب وجود بار محوری و به تعویق افتادن تشکیل و انتشار تنش‌ها و متعاقب آن، ترک‌های کششی ربط داد.

صحت سنجی و گزارش گردیده است، به ستون مورد نظر تخصیص داده شده و سپس، پوششی از UHPFRC به ضخامت‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر با مشخصات ماده اعتبارسنجی شده در بخش حاضر در اطراف ستون تعبیه گردیده و میزان اثر بخشی آن در بالا بردن ظرفیت تحمل انفجار ستون معمولی بررسی شده است.

۳-۱- ارزیابی تأثیر پوشش UHPFRC بر مقاومت ستون بتن مسلح تحت انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT

به منظور درک رفتار واقعی تر ستون‌ها در پاسخ به بار انفجار، در این پژوهش اثر ضخامت پوشش بتن الیافی فوق توانمند و اثر وجود و نحوه اعمال بار محوری بر عملکرد ستون‌های مقاوم شده با UHPFRC، مطالعات پارامتریک برای خرج انفجاری ۱۷/۵ کیلوگرم صورت پذیرفته است. این انتخاب بدان سبب بوده است که به ازای شدت انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT، مصالح به میزان قابل توجهی رفتار خمیری را تجربه خواهد نمود. تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی نقطه میانی ستون تحت انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT با و بدون حضور بار محوری در شکل (۷) نشان داده شده و حداکثر جابه‌جایی حاصل از هر تحلیل در جدول (۵) آمده است.

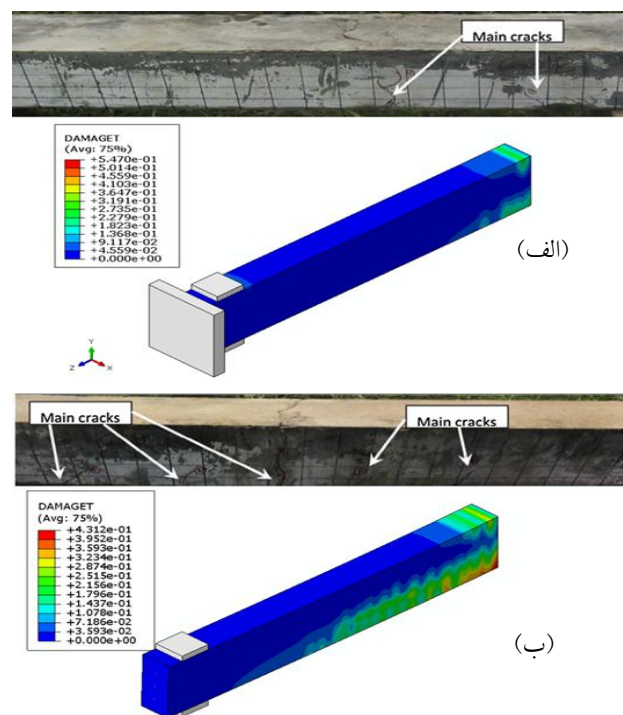
مطابق با شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود که بیشترین جابه‌جایی مطابق انتظار در مدل مقاوم نشده به میزان ۱۵۳/۲ میلی‌متر رخ داده است. در صورت مقاوم‌سازی با پوششی ۲۵ میلی‌متری از UHPFRC، جابه‌جایی میانی ستون با کاهش ۴۴ درصدی به ۸۵/۷ میلی‌متر خواهد رسید. این کاهش جابه‌جایی حسب انتظار در صورت استفاده از پوشش‌های ۵۰ و ۷۵ میلی‌متری مشهودتر است.

شکل (۷-ب) گویای آنست که بیشترین جابه‌جایی میانه دهانه ستون مقاوم نشده (۱۰۸/۳ میلی‌متر)، در پی استفاده از پوشش‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متری از UHPFRC، به ترتیب به ۴۴/۳، ۲۷ و ۱۹/۷ میلی‌متر تقلیل خواهد یافت که بیانگر کاهش در حدود ۵۹، ۷۵ و ۸۲ درصد است. چنانکه دیده می‌شود، مصالح UHPFRC با داشتن مقاومت فشاری بالاتر تاب بیشتری در برابر خردشدگی در وجه فشاری خواهند داشت. قابلیت شکل‌پذیری بالاتر این مصالح به کمک آن‌ها در تحمل تغییر شکل‌های بیشتر خواهد شتافت و در نهایت مقاومت کششی بالاتر نیز وقوع ترک و گسترش آن را کنترل خواهد نمود که مجموعه این توانایی‌ها، کاهش جابه‌جایی در صورت استفاده از این مصالح را به ارمغان آورده است.

مقادیر حداکثر جابه‌جایی میانی ستون به دست آمده از تحلیل عددی در مدل‌های مذکور در جدول (۵) به صورت خلاصه آمده است.

کاهش جابه‌جایی جانبی میانه دهانه ستون‌ها در حالات وجود بار محوری را می‌توان از یک سو به پیش‌تیدگی ناشی از اعمال بار محوری و متعاقباً تأخیر در بروز تنش و ترک‌های کششی و از سوی دیگر به دور شدن شرایط تکیه‌گاهی از حالت مفصل، به واسطه نحوه اتصال جک اعمال‌کننده بار محوری مرتبط دانست. (جدول ۶)

یکی دیگر از شواهد صحت مدل‌سازی عددی در تحقیق حاضر، الگو و نحوه تشکیل ترک‌ها در نمونه‌ها است. با توجه به اینکه در نمونه تحت اثر بار ناشی از انفجار ۱ کیلوگرم TNT مصالح به حوزه رفتار غیر خطی خود وارد نمی‌گردد، بنابراین اثری از ترک خوردگی‌های برجسته نیز نخواهد بود ولی این پدیده در خصوص نمونه‌های تحت اثر انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT موضوعیت خواهد یافت. در شکل‌های (۶-الف و ۶-ب) ترک خوردگی تحت بار انفجاری ۱۷/۵ کیلوگرم TNT در حضور و عدم حضور بار محوری به نمایش درآمده است. چنانکه دیده می‌شود، مدل عددی پیشنهادی پاسخ دینامیکی ستون را از حیث بیشترین جابه‌جایی، دوره تناوب ارتعاشات و میرایی به خوبی پیش‌بینی نموده است.



شکل ۶- مقایسه الگوی ترک خوردگی ستون، الف: نمونه U2-B، ب: نمونه U2-A.

نتایج حاصل از مقایسه میزان جابه‌جایی حداکثر وسط دهانه ستون و الگوی ترک‌های تشکیل شده در حضور یا غیاب نیروی محوری، همگی بر دقت قابل‌قبول مدل پیشنهادی گواهی داده و مدل عددی پیشنهادی را به عنوان ابزاری قابل اعتماد جهت انجام بررسی‌های عددی بیشتر معرفی می‌نمایند.

۳- نتایج و بحث

از آنجا که موضوع اصلی این پژوهش مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح معمولی با استفاده از پوشش‌های بتن الیافی فوق توانمند در برابر بار انفجاری است، لذا ضمن حفظ هندسه مدل سازه‌ای تشریح شده، ابتدا مشخصات فولاد و بتن معمولی که پیش از این توسط ملائی [۲۸]

جدول ۵- حداکثر جابه‌جایی نمونه‌ها تحت انفجار ۱۷/۵ با و بدون حضور بار محوری.

نام مدل	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	بهبود (درصد)
NS-A	۱۵۳/۲	-
S-25U-A	۸۵/۷	۴۴
S-50U-A	۵۵/۵	۶۳
S-75U-A	۳۸/۷	۷۴
NS-B-P	۱۰۸/۳	-
S-25U-B-P	۴۴/۳	۵۹
S-50U-B-P	۲۷	۷۵
S-75U-B-P	۱۹/۷	۸۲

جدول ۶- اثر بار محوری بر کاهش پاسخ جابه‌جایی ستون.

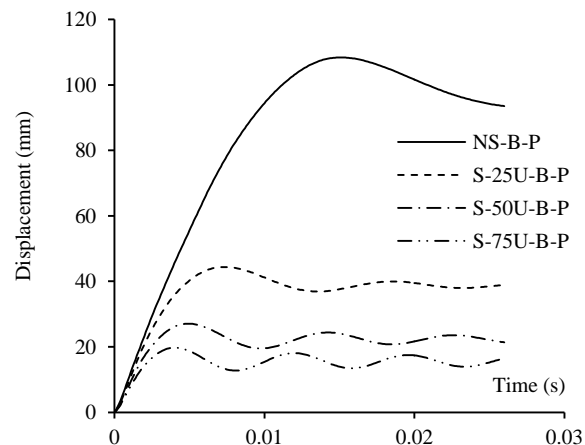
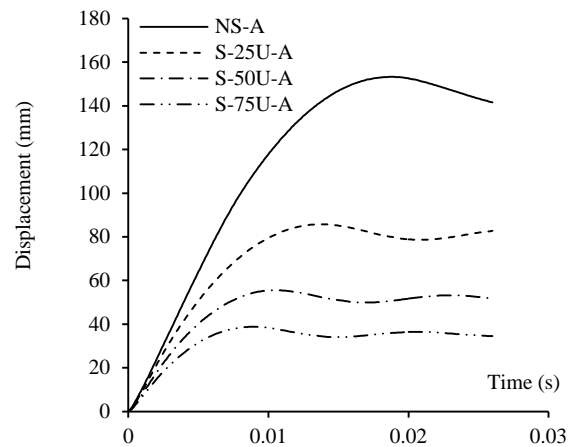
مدل	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	تأثیر (درصد)
NS-A	۱۵۳/۲	۲۹
NS-B-P	۱۰۸/۳	
S-25U-A	۸۵/۷	۴۸
S-25U-B-P	۴۴/۳	
S-50U-A	۵۵/۵	۵۱
S-50U-B-P	۲۷	
S-75U-A	۳۸/۷	۴۹
S-75U-B-P	۱۹/۷	

هر نمودار P-I شامل دو مجانب افقی و قائم است که به ترتیب مجانب فشاری و مجانب ضربه‌ای نام‌گذاری شده‌اند. مجانب ضربه‌ای مربوط به بارگذاری‌هایی است که زمان رشد و تداوم آن‌ها نسبت به فرکانس طبیعی سامانه بسیار کوچک‌تر است و بیانگر حداقل ضربه لازم برای آسیب رساندن به سامانه است. از طرف دیگر مجانب فشاری مرتبط با بارهایی است که زمان رشد و تداوم آن‌ها بیشتر از فرکانس طبیعی سامانه است، در نتیجه سامانه در رژیم بارگذاری شبه استاتیکی عمل می‌نماید. در ناحیه شبه استاتیکی نمودار فشار-ضربه، پاسخ سامانه حساسیت چندانی به ضربه وارده نداشته و عمدتاً متأثر از حداکثر فشار وارده از بارگذاری خواهد بود و از این رو مجانب افقی حداقل فشار لازم برای ایجاد خسارت مشخص را بیان می‌کند [۳۲]. اینگونه نمودارها بر اساس یک معیار پذیرش منتخب تدوین و ترسیم می‌شوند که در این تحقیق از دوران مفصل، θ ، که برای المان‌های تیر/ستون با استفاده از حداکثر جابه‌جایی جانبی میانه دهانه، X_m ، و کمترین فاصله نقطه نظیر جابه‌جایی حداکثر و تکیه‌گاه، L_{min} ، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌گردد استفاده شده است:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_m}{L_{min}} \right) \quad (1)$$

۳-۲- ارزیابی مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با UHPFRC با استفاده از نمودارهای P-I

اغلب سازه‌های مقاوم در برابر انفجار از مصالحی با چگالی جرمی بالا و قابلیت جذب انرژی قابل توجه ساخته می‌شوند تا در برابر بارهای ضربه‌ای شدید ناشی از انفجار یا برخورد اجسام با سرعت بالا، عملکرد مناسبی از خود بروز دهند. میزان حصول رفتار ایمن در اجزای سازه‌ای ساخته شده با چنین مصالحی را می‌توان از طریق انجام تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی تحقیق نمود. به منظور ایجاد سهولت در استفاده از نتایج چنین تحلیل‌هایی استفاده از نمودارهایی موسوم به نمودارهای فشار-ضربه^۱ (P-I) مرسوم است که این مفهوم ابتدا در بریتانیا برای تعیین ضوابط آسیب‌پذیری خانه‌های مسکونی، اداری و صنعتی آجری پیشنهاد و استفاده گردیده است، هر چند استفاده از این مفهوم به برآورد پاسخ اعضای بدن انسان به بارهای ضربه‌ای و انفجاری و آسیب‌پذیری اعضای خاص بدن انسان (همچون پرده گوش، شش‌ها و گیره) در قبال شوک ناشی از انفجار نیز توسعه داده شده است [۳۲-۲۹].



شکل ۷- تاریخچه زمانی جابه‌جایی نمونه‌ها تحت اثر انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT؛ بالا: بدون حضور بار محوری، پایین: با حضور بار محوری.

لازم به توضیح است که نقاط منحنی P-I برای هر سطح از آسیب به صورت سعی و خطا در مدل‌های عددی به دست آمده است. روند تغییرات مقادیر فشار و ضربه به گونه‌ای انتخاب شده که بر اساس تجربه‌های قبلی، پاسخ مورد نظر حاصل شود.

بر اساس نتایج نمایش داده شده در شکل (۸)، مطابق انتظار نمونه مقاوم شده با UHPFRC تاب بیشتری در برابر انفجار در حوزه‌های ضربه‌ای، دینامیکی و شبه استاتیکی از خود نشان داده است. از دو منظر دلایل افزایش مقاومت مدل‌های مقاوم شده را نسبت به نمونه مقاوم نشده می‌توان توضیح داد. از یک سو به دلیل مقاومت فشاری و کششی بالاتر مصالح UHPFRC نسبت به بتن معمولی، ظرفیت کششی و خمشی طی مقاومت‌سازی افزایش پیدا کرده است و از طرفی با حضور لایه مقاومت‌سازی، سطح مقطع ستون افزایش می‌یابد و در نتیجه ظرفیت برشی و خمشی مقطع بالاتر خواهد رفت. هر چند که در حوزه رفتار دینامیکی ستون، افزایش جرم ستون را نیز می‌توان از دلایل کاهش جابه‌جایی جانبی برشمرد. لازم به ذکر است به دلیل ضعف مفرط ستون ساخته شده از بتن معمولی در حوزه ضربه‌ای در حالت بدون حضور بار محوری از ارائه مجانب ضربه‌ای برای آنکه معرف تحمل برابر انفجار شدید در حوزه مجاور است صرف نظر شده است. خلاصه نتایج تحلیل‌های عددی برای رخداد آسیب ۱ و ۲ درجه در جدول (۷) آورده شده است. نکته مهم دیگر که با ملاحظه شکل (۸) رخ می‌نماید، آن است که آسیب ناشی از انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT از سطوح آسیب یک درجه برای همه ضخامت‌های مقاومت‌سازی فراتر رفته است.

جدول ۷- اثر مقاومت‌سازی بر روی مجانب‌های فشاری و ضربه‌ای مدل‌های بدون بار محوری با توجه به نمودار P-I.

مدل	D=1 degree		D=2 degree	
	P (kPa)	I (kPa-msec)	P (kPa)	I (kPa-msec)
NS-B-P	۶۳۰	۲۰۰۰	۶۴۰	۳۲۳۰
S-50U-B-P	(۱۲۲٪) ۱۴۰۰	۵۷۰۰ (۱۸۵٪)	(۱۱۷٪) ۱۳۹۰	(۱۳۵٪) ۷۶۰۰

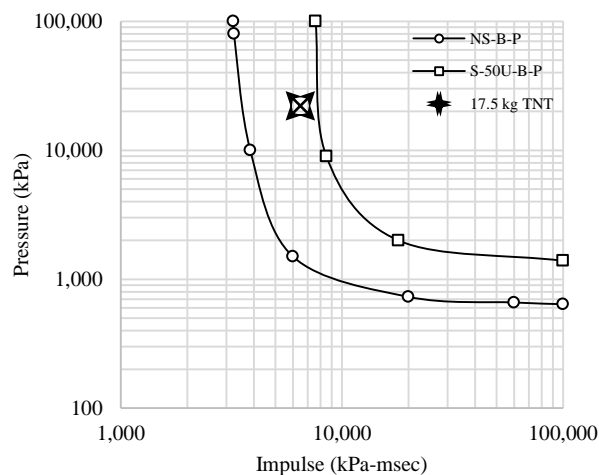
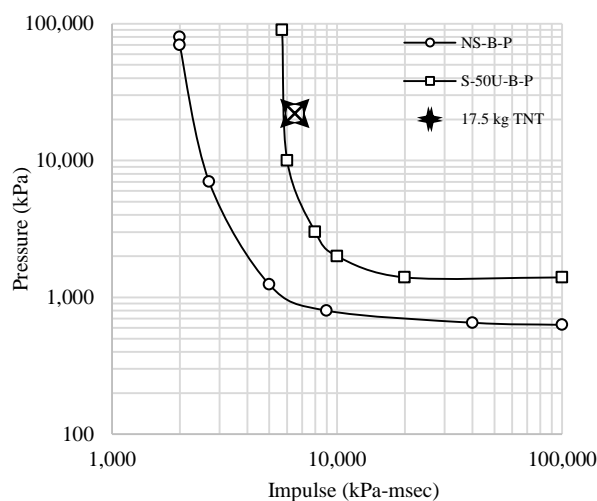
مطابق با جدول (۷)، برای مدل NS-B-P، که بدون مقاومت‌سازی است، مجانب قائم (رژیم ضربه‌ای) در سطح آسیب ۱ و ۲ درجه به ترتیب ضربه‌ای برابر با ۲۰۰۰ و ۳۲۳۰ kPa-msec را نشان می‌دهد. این مقادیر برای مدل S-50U-B-P، که مقاومت‌سازی با به ضخامت ۵۰ میلی‌متر دارد، به ترتیب برابر با ۵۷۰۰ و ۷۶۰۰ kPa-msec است که به ترتیب افزایش ۱۸۵ و ۱۳۵ درصدی را نشان می‌دهد. درصدهای بهبود مجانب‌های افقی این دو مدل نیز در جدول (۷) آورده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش، تلاشی در جهت درک پاسخ ستون‌های بتنی تحت اثر انفجار است که طی آن با ارائه طرحی نوآورانه برای مقاومت‌سازی ستون‌های بتنی در برابر انفجار، کارایی استفاده از پوشش UHPFRC بر روی ستون بتن

نشریه طراحی ساختمان مقاوم برابر انفجار در تأسیسات پتروشیمی برای ستون‌های بتنی مسلح، سطح آسیب را بر مبنای تکیه‌گاه بر حسب درجه دسته‌بندی و بیان نموده است که بر آن اساس در تحلیل‌های پیش رو، ۱ و ۲ درجه دوران تکیه‌گاه به ترتیب به‌عنوان معیار خسارت جزئی و قابل توجه ستون انتخاب شده است [۳۰].

بر اساس تحلیل‌های متعدد عددی، نمودار P-I برای آسیب ۱ و ۲ درجه در حالت با حضور بار محوری برای ستون‌های بتن مسلح معمولی و ستون مقاوم شده با لایه‌ای از UHPFRC به ضخامت ۵۰ محاسبه شده و نتایج حاصله در شکل (۸) به نمایش در آمده است. به‌منظور مقایسه بهتر، نتیجه حاصل از رفتار انفجاری ستون تماماً ساخته شده از UHPFRC تحت اثر انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT نیز در نمودارها مشخص شده است. همچنین لازم به ذکر است که به‌منظور شبیه‌سازی واقعی‌تر بهسازی در مقابل انفجار برای ستون‌های ساختمان در حال سرویس، بار محوری از طریق ایجاد تنش اولیه در هسته ستون در مدل‌سازی وارد شده است تا در زمان وقوع انفجار، پوشش بتنی مقاوم کننده ستون، عاری از هر گونه تنش اولیه باشد.



شکل ۸- نمودار P-I، الف) آسیب ۱ درجه و ب) آسیب ۲ درجه.

[۵] ایزدی فرد رضاعلی، نظری نژاد احمد، "کاربرد لایه‌های جاذب انرژی برای کاهش اثر بار انفجار بر دال‌های بتن مسلح"؛ نشریه علمی پژوهشی مواد پرانرژی، ۱۳۹۵، ۱۱، ۴، ۴۷-۵۸.

- [6] Muszynski, R.; Purcell, L. C.; Sierakowski, M. R. "Strengthening Concrete Structures by Using Externally Applied Composite Reinforcing Material"; Proc. 7th Int. Symp. on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, 1995, 291-298.
- [7] Wu, C.; Oehlers, D. J.; Rebenrost, M.; Leach, J.; Whittaker, A. S. "Blast Testing of Ultra-High Performance Fibre and FRP-Retrofitted Concrete Slabs"; Eng. Struct. 2009, 31, 2060-2069.
- [8] Muszynski, L. C.; Purcell, M. R. "Composite Reinforcement to Strengthen Existing Concrete Structures against Air Blast"; J. Compos. Constr. 2003, 7, 93-97.
- [9] Li, V. C. "Engineered Cementitious Composites (Ecc) – Tailored Composites through Micromechanical Modeling"; Can. Soc. Civ. Eng. 1997.
- [10] Zhang, J.; Maalej, M.; Quek, S. T. "Performance of Hybrid-Fiber ECC Blast/Shelter Panels Subjected to Drop Weight Impact"; J. Mater. Civ. Eng. 2007, 19, 855-863.
- [11] Maalej, M.; Quek, S. T.; Zhang, J. "Behavior of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composites Subjected to Dynamic Tensile Loading and Projectile Impact"; J. Mater. Civ. Eng. 5005 17, 143-152.
- [12] Wang, S.; Li, V. C. "Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances"; Int. RILEM Work. High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos. Struct. Appl. 2005, 65-73.
- [13] Kusumaningrum, P. "Numerical Modeling of RC and ECC Encased RC Columns Subjected to Close-In Explosion"; Ph.D. Thesis, National University of Singapore, 2010.
- [14] Martinola, Z.; Meda, G.; Plizzari, A.; Rinaldi, G. A. "An Application of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites for RC Beams Strengthening"; 6th Int. Conf. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Catania, 2007, 22-30.
- [15] Lampropoulos, A. P.; Paschalis, S. A.; Tsioulou, O. T.; Dritsos, S. E. "Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)"; Eng. Struct. 2016, 106, 370-384.
- [16] Al-Osta, M. A.; Isa, M. N.; Baluch, M. H.; Rahman, M. K. "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete"; Constr. Build. Mater. 2017, 134, 279-296.
- [17] aschalis, S. A. "Strengthening of Existing Reinforced Concrete Structures Using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete"; Ph.D. Thesis, University of Brighton, 2017.
- [18] Beschi, C.; Meda, A.; Riva, P. "Column and Joint Retrofitting with High Performance Fiber Reinforced Concrete Jacketing"; J. Earthq. Eng. 2011, 15, 989-1014.
- [19] Koo, I. Y.; Hong, S. G. "Strengthening RC Columns with Ultra High Performance Concrete"; Structures Congress, Korea, 2016.
- [20] Xu, J.; Wu, C.; Su, Y.; Fang, Q.; Hao, H.; Li, J. "Behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete Columns Subjected to Blast Loading"; Eng. Struct. 2016, 118, 97-107.
- [21] Astarlioglu, S.; Krauthammer, T. "Response of Normal-Strength and Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Columns to Idealized Blast Loads"; Eng. Struct. 2014, 61, 1-12.
- [22] Burrell, R. "Performance of Steel Fibre Reinforced Concrete Columns under Shock Tube Induced Shock Wave Loading"; Ph.D. Thesis, University of Ottawa, 2012.

مسلح ارزیابی شده است. برای نیل به این هدف با استفاده از تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزاء محدود صریح Abaqe/Explicit، شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی و پس از راستی‌آزمایی مدل، با انتخاب ضخامت‌های اجرایی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر از مصالح UHPFRC، ستون مقاومت‌سازی شده تحت اثر انفجارهایی با شدت‌های مختلف قرار گرفت. تاریخچه زمانی جابه‌جایی ستون‌های مقاوم نشده و مقاوم شده تحت اثر انفجار ۱۷/۵ کیلوگرم TNT و در دو حالت بدون بار محوری و با حضور بار محوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی نشان داد که در حضور و عدم حضور بار محوری، مقاومت‌سازی با UHPC، حداکثر جابه‌جایی ستون را نسبت به نمونه مقاوم نشده به مراتب کاهش می‌دهد. به طوری که، کاهش در محدوده ۴۴ تا ۸۲ درصد در حداکثر جابه‌جایی ستون مشاهده شد. با ارزیابی مقاومت ستون‌های بدون بار محوری از طریق نمودار P-I، ملاحظه شد مقاومت‌سازی با پوشش UHPFRC، مقاومت ستون را در برابر انفجار به میزان قابل توجهی افزایش داده است. به طوری که، مجانب‌های نمودار P-I در محدوده ۱۱۷ تا ۱۸۵ درصد بهبود داشته است. با ارزیابی نمودارهای P-I در حالی که اثرات نیروی محوری به اندازه بار بهره‌برداری در ستون دیده شود، مقاومت ستون مقاومت‌سازی شده نسبت به مدل مقاوم نشده به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود پیدا کرده است. بر پایه نتایج تحلیل‌های ارائه شده در این پژوهش می‌توان پیش‌بینی کرد مقاومت‌سازی ستون‌های بتنی با استفاده از بتن‌های الیافی فوق توانمند با الیاف فولادی، تأثیر چشمگیری بر بهبود عملکرد آن‌ها برابر انفجار خواهد داشت.

۵- تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت و پشتیبانی شرکت گاز استان بوشهر انجام پذیرفته است و نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خویش را از شرکت گاز استان بوشهر ابراز نمایند.

مراجع

- [1] US Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineer Support Agency "Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects"; TM5-855-1/NAVFAC, P-1080/AFJAM32-1055/DSWA, DAHSCWEMAN-97, UFC 3-340-02, US Army Corps of Engineers and Defense Special Weapons Agency, Washington, DC, 2008.
- [2] Buchan, P. A.; Chen, J. F. "Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonry Structures - A State-of-the-Art Review"; Compos. Part. B-Eng. J. 2007, 38, 5-6, 509-522.
- [3] Crawford, J. E.; Malvar, L. J.; Morrill, K. B.; Ferritto, J. M. "Composite Retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings"; 10th Int. Symp. Interact. Eff. Munitions with Struct. 2001.

[۴] ایزدی فرد، رضاعلی، متقی لیدا. "مقاومسازی دال‌های بتن مسلح زیر بار انفجار با ترکیب GFRP-PU و CFRP-PU"؛ نشریه علمی پژوهشی مواد پرانرژی، ۱۳۹۷، ۱۳، ۴، ۲۳۵-۲۴۴.

[۲۸] ملائی، سمیه "تحلیل ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری انفجاری با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش"؛ رساله دکتری، دانشگاه کردستان، ۲۰۱۷.

[29] Bangash, M. Y. H.; Bangash, T. "Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies"; Springer: Germany, 2006.

[30] Society of Civil Engineers. Committee on Blast Resistant Design "Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities"; American Society of Civil Engineers, 2005.

[31] Cormie, D.; Mays, G.; Smith, P. "Blast Effects on Buildings"; 2nd Ed. Thomas Telford: London, 2009.

[32] Shi, Y.; Hao, H.; Li, Z. X. "Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Prediction of RC Column Damage to Blast Loads"; Int. J. Impact Eng. 2008, 35, 1213-1227.

[23] Li, J.; Wu, C.; Hao, H.; Liu, Z. "Post-blast Capacity of Ultra-High Performance Concrete Columns"; Eng. Struct. 2017, 134, 289-302.

[24] Xu, J.; Wu, C.; Li, J. "Simplified Finite Element Method Analysis of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Columns under Blast Loads"; Adv. Struct. Eng. 2017, 20, 139-151.

[25] Li, J.; Wu, C.; Hao, G. "Residual Loading Capacity of Ultra-High Performance Concrete Columns After Blast Loads"; Int. J. Prot. Struct. 2015, 6, 649-669.

[26] Li, J.; Wu, C.; Hao, H.; Su, Y. "Investigation of Ultra-High Performance Concrete under Static and Blast Loads"; Int. J. Prot. Struct. 2015, 6, 217-235.

[27] Dassault Systèmes, "ABAQUS 6.14 Documentation"; 2014.