

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، هفتم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۵، (پیاپی ۲۶): صص ۸۴-۷۳

بررسی رفتار بتن پودری واکنش پذیر مسلح شده با

الیاف تحت بار انفجار

محمد رضا یاوری^۱، حبیب اکبرزاده بنگر^۲، امید یزدان پناه^۳

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۰۱

چکیده

در این مقاله، رفتار بتن پودری واکنش پذیر (RPC) تحت مواد منفجره متفاوت و در فواصل مختلف از نقطه انفجار بررسی شده است. علاوه بر این اثر تغییر ضخامت بر رفتار بتن RPC نیز دیده شده است. به جهت شبیه سازی تحلیلی دال RPC و نیز اطمینان از دقت و صحت نتایج با استفاده از نرم افزار ABAQUS، یک نمونه دال RPC بررسی شده در ادبیات فنی، اعتبارسنجی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که مدل شبیه سازی شده دال RPC با نتایج حاصل از ادبیات تطابق قابل قبولی دارد. به منظور مقایسه نتایج حاصل از تحلیل بتن RPC، نمونه نظیر بتن معمولی (NSC) نیز مدل سازی شده و سناریوهای متفاوت انفجار در قالب دو مثال عددی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که فرض شده است بتن دال معمولی مسلح به آرماتور باشد، در حالی که ۲٪ حجمی الیاف فولادی کوتاه برای نمونه RPC استفاده شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل نشان می دهند که دال RPC در مقایسه با نمونه نظیر NSC، از مقاومت انفجار بسیار بهتری برخوردار است و می تواند در ساخت و مقاوم سازی سازه ها استفاده شود.

کلیدواژه ها: بتن پودری واکنش پذیر (RPC)، بار انفجار، فاصله از نقطه انفجار، شبیه سازی تحلیلی

۱- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی و پرواز دانشگاه افسری امام علی (ع) - (mohammadrezayavari@yahoo.com)

۲- عضو هیئت علمی و استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه مازندران - بابلسر

۳- دانشجوی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) - قزوین

۱- مقدمه

بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC)^۱، ترکیبی می‌باشد که در سال‌های اخیر ساخته شده است. در این ترکیب، مقاومت فشاری بتن به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد. با افزودن مقداری الیاف فولادی، ویژگی‌های مکانیکی (نظیر مقاومت کششی و خمشی)، مقاومت در برابر ضربه و استحکام (سختی) بتن، افزایش خواهد یافت. این نوع بتن بیشتر در سازه‌هایی نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای و شیلترهای نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن پودری واکنش‌پذیر، ترکیب بی‌نظیری است که مقاومت فشاری خیلی زیادی (حدود ۲۰۰ مگاپاسکال) نسبت به بتن‌های معمولی و یا حتی بتن‌های مقاومت بالا (HPC)^۲ دارد. به علت مقاومت زیاد آن در مقابل بارهای انفجار، می‌توان از آن در ساخت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی در معرض حملات تروریستی استفاده کرد. مقدار بار انفجار (خرج) و فاصله از نقطه انفجار دو پارامتر بسیار مهم در کارهای تحقیقاتی تئوری و آزمایشگاهی به‌شمار می‌روند.

بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) نوعی بتن جدید با مقاومت بالا می‌باشد که در سال ۱۹۹۴ توسط یک شرکت فرانسوی به ثبت رسید. مقاومت فشاری این بتن در حدود ۲۰۰ مگاپاسکال یعنی دو یا چهار برابر بتن‌های با عملکرد بالا و از لحاظ مقاومت خمشی و شکل‌پذیری، به حدود ۲۵۰ برابر بتن معمولی رسیده‌اند. این بتن مزیت‌های دیگری نسبت به سایر بتن‌های معمولی دارد که از جمله، به دلیل استفاده از الیاف فولادی در این نوع بتن، شکل‌پذیری و مقاومت خمشی بالایی به‌دست آمده است. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری آن در مقایسه با سایر بتن‌ها بالاست. در این بتن، با حذف سنگدانه‌های درشت و با استفاده از سنگدانه‌های ریز، به یک بتن همگن با ساختار میکروسکوپی عالی رسیده‌اند که تخلخل پایین و دوام بسیار بالایی از خود نشان می‌دهد. بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) به عنوان نوعی بتن فوق‌توانمند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این نتیجه با مقاومت فشاری حداقل ۱۵۰ مگاپاسکال، دارای تراکم حجمی بالا، نفوذپذیری بسیار کم، دوام زیاد، مقاومت سایشی و خوردگی بسیار بالایی می‌باشد. الیاف فولادی ریز به‌کاررفته در این بتن، باعث افزایش مقاومت خمشی و شکل‌پذیری زیاد آن شده است [۱]. در سال‌های اخیر، انفجارهای متعددی به علت حوادث ناشی از فعالیت‌های تروریستی و نظامی وجود داشته است. برای محافظت سازه‌ها و نجات زندگی انسان‌ها در مقابل حوادث انفجار، درک صحیح از نحوه رفتار و اثر موج‌های انفجاری بر روی سازه‌ها،

ضروری و لازم می‌باشد. در یک انفجار، بار انفجار به‌صورت یک بار آنی و در بازه زمانی خیلی کوتاه به‌همراه فشار و حرارت زیاد بر سازه اعمال می‌شود. در حالت کلی می‌توان بیان کرد که بتن در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی دارای یک مقاومت انفجار نسبتاً بالاتری می‌باشد. با این وجود، بتن معمولی نیاز به مقاومت بالاتر دارد تا پایداری آن در مقابل بارهای ضربه و انفجار بهبود یابد. بنابراین، یک مصالح جدید با ظرفیت جذب انرژی و مقاومت بالا در برابر خرابی و آسیب می‌تواند یک ماده بهتری برای طراحی مقاوم در مقابل انفجار باشد. اخیراً بتن‌های مقاومت بالا (UHSC)^۲ و بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) به‌منظور بهبود مقاومت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. در عمل‌آوری این بتن، حرارت نقش مهمی دارد. نمونه‌های این نوع بتن می‌توانند تحت درجه حرارت‌های مختلف قرار گیرند؛ بنابراین، مقاومت فشاری آنها از ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند. تحقیقات نشان داده است با عمل‌آوری در حرارت بالا، بسیاری از خواص RPC بهبود می‌یابد. همچنین نمونه‌ها می‌توانند قبل از گیرش و در طول گیرش، تحت فشار قرار گیرند که این نیز در بهبود خواص آن مؤثر است. عمل‌آوری در دمای بین ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، بتنی با مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال می‌دهد. تولید بتن RPC با مقاومت بالای ۸۰۰ مگاپاسکال نیاز به اعمال فشار قبل از گیرش و عمل‌آوری در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد دارد. این نوع بتن (با مقاومت فشاری ۸۰۰ مگاپاسکال) تنها در عناصر پیش‌ساخته می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این ماده، مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر ضربه دارد و می‌تواند برای سازه‌ها و تجهیزات نظامی مورد استفاده قرار گیرد [۳]. بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC)، ترکیبی می‌باشد که در سال‌های اخیر ساخته شده است. در این ترکیب، مقاومت فشاری بتن بطور محسوسی افزایش می‌یابد. با افزودن مقداری الیاف فولادی، ویژگی‌های مکانیکی (نظیر مقاومت کششی و خمشی)، مقاومت در برابر ضربه و استحکام (سختی) بتن، افزایش خواهد یافت [۳]. این نوع بتن بیشتر در سازه‌هایی نظیر نیروگاه‌های هسته‌ای و شیلترهای نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن پودری واکنش‌پذیر، ترکیب بی‌نظیری است که مقاومت فشاری خیلی زیادی (حدود ۲۰۰ مگاپاسکال) نسبت به بتن‌های معمولی و یا حتی بتن‌های مقاومت بالا دارد. اصلی‌ترین شاخص‌های این نوع بتن، کاهش درصد آب به سیمان و کاهش میزان CaO-SiO_2 با استفاده از ترکیبات سیلیکا می‌باشد که می‌تواند مقاومت فشاری بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال و انرژی شکست بین ۱۲۰۰ تا $40000 \text{ (j/m}^2\text{)}$ را حاصل نماید [۴]. بتن پودری واکنشی نوع جدیدی از بتن‌های توانمند است که به‌دلیل ریزی مواد پودری و

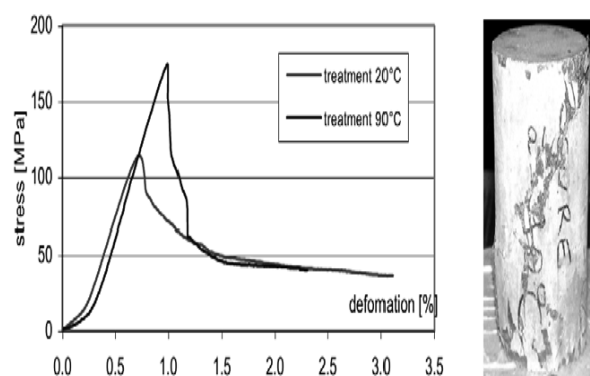
1- Reactive Powder Concrete
2-High Performance Concrete

بررسی شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، مقدار دوده سیلیسی که در هیدراتاسیون شرکت می‌کند به‌طور مستقیم با درجه دمای عمل‌آوری تناسب داشت [۹]. توزیع الیاف فولادی در بتن RPC به‌طور مؤثری روی رفتار مکانیکی آن تأثیر می‌گذارد. به‌علاوه، توزیع الیاف فولادی می‌تواند از طریق یک روش ریخته‌گری اصلاح‌شده به‌منظور تقویت عملکرد مکانیکی تنظیم شود [۱۰]. مقدار دوده سیلیسی روی چسبندگی و پیوستگی مصالح RPC و الیاف فولادی تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان می‌دهد که نتایج چسبندگی وقتی که مقدار دوده سیلیسی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد بهینه هستند [۱۱]. در سال ۲۰۱۱ یو و همکاران^۱، مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر با الیاف فولادی تحت دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را بررسی کردند. در این تحقیق، رابطه تنش- کرنش بتن پودری واکنش‌پذیر تحت دماهای بالا مطالعه شده است. علاوه‌براین فرمول‌های رگرسیون مربوط به تخمین مشخصات مکانیکی بتن RPC توسعه داده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته بتن RPC با افزایش دما کاهش می‌یابد. شیب ناحیه بالارونده منحنی تنش-کرنش با افزایش دما کاهش می‌یابد [۱۲]. در سال ۲۰۱۴ توسط زنگ و همکاران^۲، روبرو تنش-کرنش بتن پودری واکنش‌پذیر تحت دماهای بالا بررسی شده است. آزمایشات زیادی روی نمونه‌های مختلف تحت دماهای متفاوت (۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انبساط حرارتی بتن RPC با افزایش دما از ۲۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، اما این نرخ افزایش آن از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با بالا کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری با افزایش دما کاهش می‌یابد. علاوه‌براین ظرفیت جذب انرژی برای دمای زیر ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد اما برای دمای بالای آن کاهش می‌یابد. الیاف فولادی اضافی منجر به تغییر مود شکست و بهبود شکل‌پذیری می‌شود [۱۳].

۲- نتایج مربوط به اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی شده با نمونه آزمایشگاهی

در این بخش به‌منظور شبیه‌سازی تحلیلی رفتار بتن RPC در مقابل بار انفجار و نیز دقت و صحت نتایج به‌دست‌آمده، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS یک دال RPC مطالعه‌شده در ادبیات مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابعاد دال مورد بررسی 1000 mm × 1000 mm × 150 mm می‌باشد که به‌صورت گیردار به تکیه‌گاه (زمین) متصل شده است. مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نمونه دال RPC آزمایشگاهی به‌ترتیب ۲۰۲ مگاپاسکال، ۲۱/۴ مگاپاسکال و ۵۰/۷ گیگاپاسکال و شامل ۲٪

پوزولانی مورد استفاده در آن و نیز مقدار زیاد موادی که به صورت هیدرولیکی فعال‌اند، به آن بتن پودری واکنشی می‌گویند. بتن پودری واکنش‌پذیر، نوعی بتن با مقاومت بسیار بالا، مقاومت سایشی زیاد، شکل‌پذیری بالا، تخلخل پایین، نفوذپذیری کم و دوام زیاد می‌باشد [۵]. مواد تشکیل‌دهنده RPC عبارت‌اند از: سیمان، ماسه کوارتزی ریز، کوارتز شکسته، میکرو سیلیس، الیاف فولادی و فوق‌روان‌کننده. برخلاف بتن معمولی، RPC به دلیل وجود الیاف فولادی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالایی از خود نشان می‌دهد. همچنین RPC به لحاظ کاهش دادن وزن سازه و مقاومت بالا در مقابل انفجار یا بارگذاری ضربه‌ای مورد توجه است [۶]. رفتار بتن RPC در فشار توسط مرحله ثابت اولیه، رابطه بار- تغییر مکان خطی، یک فاز غیر خطی کوچک و سپس شکست مشخص می‌شود که با یک کاهش در تنش همراه است. سپس تنش در یک مقدار باقی‌مانده تثبیت می‌شود (شکل-۱). حرارت بالا اثر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت فشاری دارد. با عمل‌آوری در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری از ۱۲۰ مگاپاسکال تا ۱۸۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. الگوی شکست مطابق شکل توسط یک ترک قطری مشخص می‌شود [۷].



شکل ۱- منحنی تنش-کرنش بتن RPC و الگوی شکست [۷]

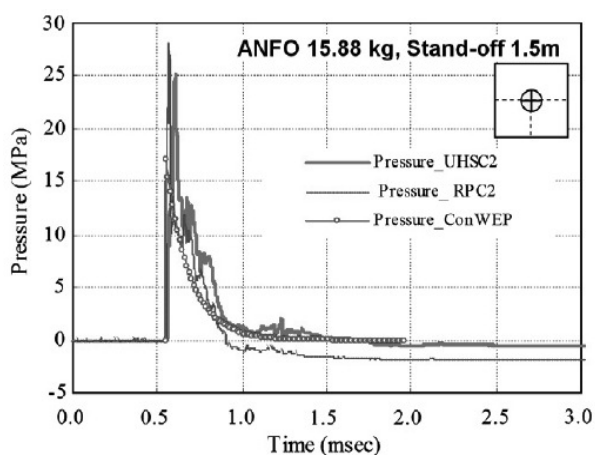
بر اساس مواد کامپوزیت توسعه‌یافته، بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC) با یکنواختی مصالح خود مشخص می‌شود که این ویژگی با حذف درشت‌دانه با استفاده از ماسه سیلیسی با ماکزیمم اندازه ۴۰۰ میکرومتر افزایش می‌یابد. به‌علاوه، چگالی بتن با انتخاب بهینه سازه‌های تشکیل‌دهنده افزایش می‌یابد [۸].

با مطالعه ریزساخت‌های بتن RPC مکانیزم کارایی و پایایی آن مشخص شده است. بر اساس استفاده از تکنولوژی تشدید مغناطیسی هسته‌ای، هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی داخل یک نمونه، وقتی که به دماهای ۲۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد رسید،

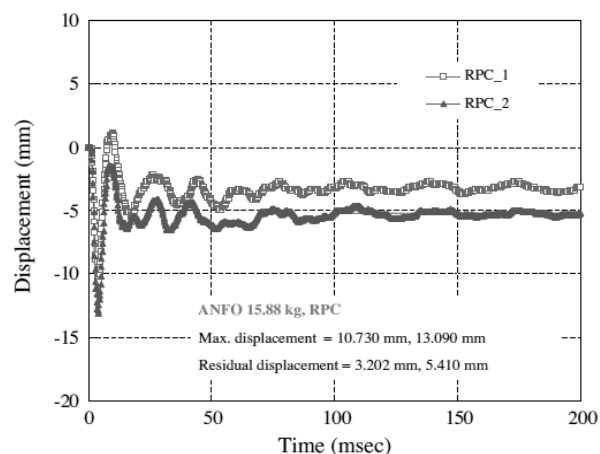
1- Yuh et al.

2- Wenzhong Zheng et al.

بیشترین میزان فشار در نمونه RPC برابر ۲۸ مگاپاسکال است. همچنین شکل (۴) و جدول (۱) نشان می‌دهند که بیشترین میزان تغییر شکل اندازه‌گیری شده برابر ۱۳/۰۹ میلی‌متر و تغییرمکان باقی‌مانده برابر ۳/۲ میلی‌متر است.

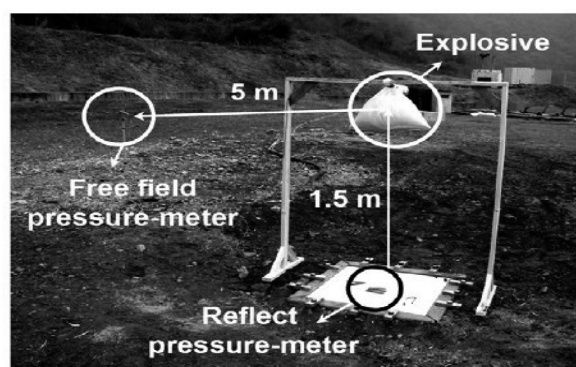


شکل ۳- نمودار فشار منعکس شده در مقابل زمان اندازه‌گیری برای ۱۵/۸۸ کیلوگرم ماده منفجره ANFO در فاصله ۱/۵ متری بالای مرکز دال RPC [۱۴]

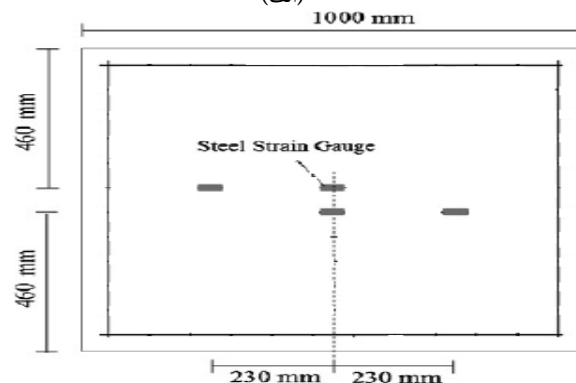


شکل ۴- جابجایی قائم مرکز دال RPC نسبت به زمان اندازه‌گیری تحت مواد منفجره: (الف) TNT (قرمز)، (ب) ANFO (سبز) [۱۴]

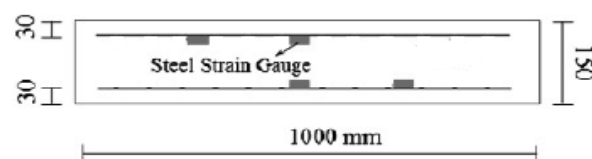
حجمی الیاف فولادی می‌باشد. این دال تحت ۱۵/۸۸ کیلوگرم ماده منفجره ANFO مورد آزمایش قرار گرفت. نقطه شروع انفجار در یک فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز دال تعبیه شده بود [۱۴]. در شکل (۲) نمونه آزمایش شده قابل مشاهده است. نمودار فشار در برابر زمان اندازه‌گیری شده در مرکز دال در اثر انفجار، در شکل (۳) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود،



(الف)



(ب)



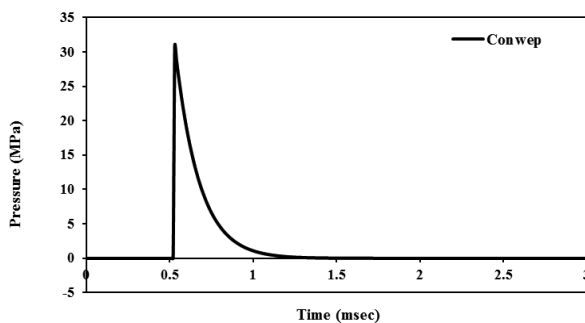
(ج)

شکل ۲- موقعیت سنسورهای اندازه‌گیری: (الف) موقعیت نصب دستگاه اندازه‌گیری فشار، (ب) ابعاد دال RPC، (ج) مقطع دال RPC [۱۴]

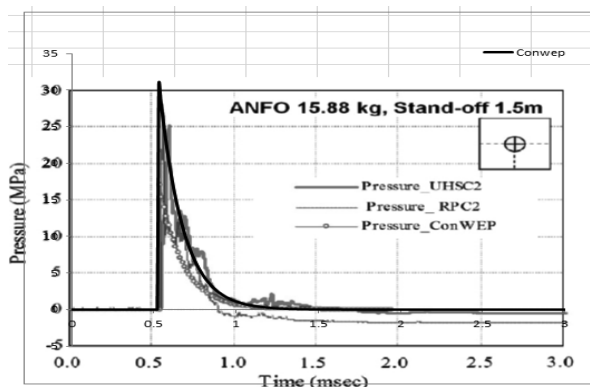
جدول ۱- ماکزیمم جابجایی قائم و جابجایی باقیمانده تحت بارگذاری انفجار [۱۴]

نمونه		نتایج آزمایش (میلی‌متر)	
		Max. displacement	Residual displacement
RPC	Case 1	۱۰/۷۳	۳/۲۰
	Case 2	۱۳/۰۹	۵/۴۱

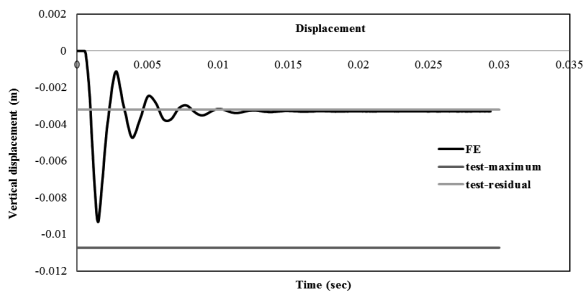
سپس برای رسیدن به مقاومت فشاری مورد نظر در آزمایش، مقادیر تنش به میزان لازم افزایش داده شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی مدل انجام گرفته و نمودار فشار- زمان مدل و نیز نمودار خیز- زمان در مرکز دال در شکل‌های (۸ تا ۱۰) ترسیم شده است. تغییر مکان حداکثر نمونه، ۹ میلی‌متر و تغییر مکان ماندگار آن ۳/۲۲ میلی‌متر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان خطای خیز حداکثر حدوداً برابر ۱۵٪ و میزان خطای تغییر مکان ماندگار کمتر از ۱٪ است.



شکل ۸- نمودار فشار- زمان دال RPC شبیه‌سازی شده



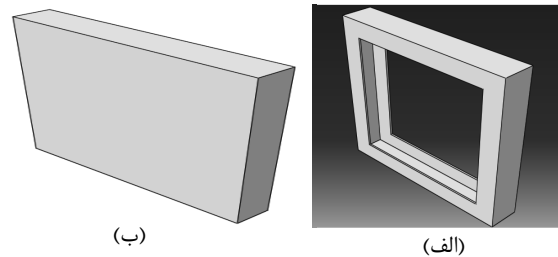
شکل ۹- مقایسه نمودارهای فشار- زمان دال‌های RPC آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده (نمودار مشکی)



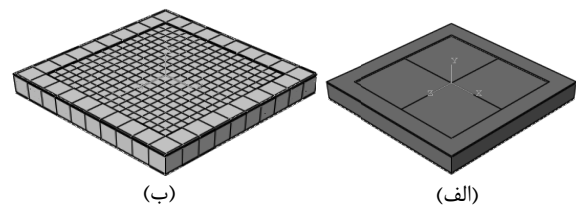
شکل ۱۰- نمودار جابجایی- زمان دال RPC شبیه‌سازی شده

۱-۲ شبیه‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS

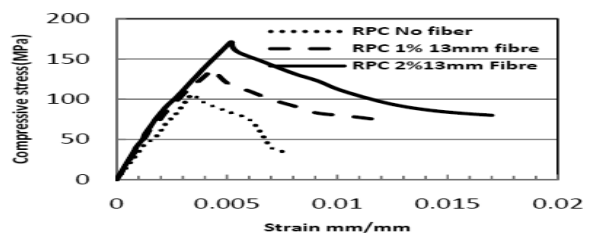
به منظور حصول اطمینان از دقت و صحت نتایج، برای انجام صحت‌سنجی از نرم‌افزار ABAQUS نسخه (۱-۱۲-۶) استفاده شده است. مدل شامل دو عضو، یکی دال بتنی و دیگری تکیه‌گاه فلزی بوده که در شکل‌های (۵ و ۶) قابل مشاهده است. قاب فلزی تکیه-گاهی به صورت الاستیک تعریف شده است. برای شبیه‌سازی رفتار بتن از مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده^۱ استفاده شده است. تنش فشاری حداکثر برابر ۲۰۲ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته برابر ۵۰/۷ گیگاپاسکال و تنش کششی حداکثر برابر ۲۱/۴ مگاپاسکال قرار داده شده است [۱۴]. برای شبیه‌سازی انفجار، از فرمولاسیون کانوپ استفاده شده است. مدل سازه و مش بندی آن در اشکال زیر قابل مشاهده است. برای شبیه‌سازی شرایط تکیه‌گاهی ۴ گوشه قاب فولادی گیردار شده است. نقطه شروع انفجار در فاصله ۱/۵ متر در بالای مرکز دال قرار گرفته و وزن ماده منفجره معادل ۱۵/۸۸ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده است. برای منحنی تنش کرنش بتن RPC با اثر الیاف فولادی، از منحنی داده شده در ادبیات استفاده شده است (شکل ۷) [۱۵].



شکل ۵- مدل شبیه‌سازی شده در: Abaqus (الف) تکیه‌گاه قاب فلزی (ب) دال RPC

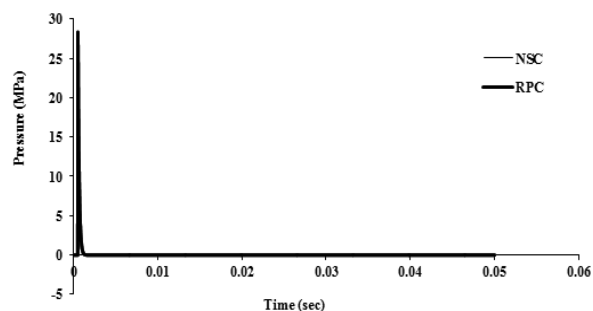


شکل ۶- مدل شبیه‌سازی شده در: Abaqus (الف) مدل دال RPC (ب) مش بندی دال RPC

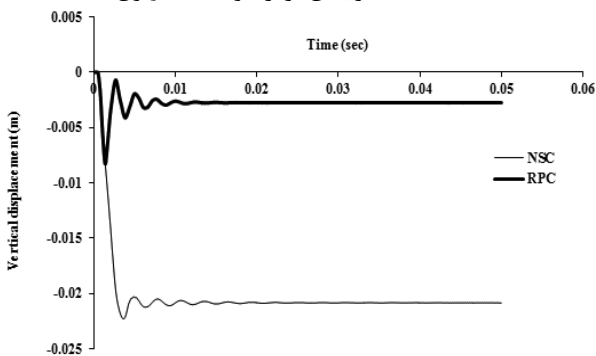


شکل ۷- نمودار تنش-کرنش فشاری بتن RPC با الیاف فولادی به طول ۱۳ میلی‌متر [۱۵]

مرکز نمونه‌ها تعبیه شده است. نمودارهای شناسایی مدل‌های تحلیلی RPC و NSC برای سناریوهای [۱-۲] جدول (۳) در شکل‌های (۱۴-۱۱) نشان داده شده‌اند. شکل‌ها شامل مقایسه نمودارهای فشار-زمان و جابجایی قائم-زمان برای نمونه‌های RPC و NSC می‌باشند.



شکل ۱۱- نمودارهای شناسایی فشار-زمان برای دال‌های NSC و RPC در یک فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز نمونه‌ها (سناریوی ۱)



شکل ۱۲- نمودار شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC در یک فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز نمونه‌ها (سناریوی ۱)

۳- مثال‌های عددی

به منظور ارزیابی کارآمدی دال RPC مسلح شده با الیاف تحت انفجار در مقابل نمونه بتن مسلح معمولی (NSC)، دو مثال شامل ۴ سناریوی انفجار (همانطور که در جداول (۵-۲) مشاهده می‌شود)، انتخاب شده است. مشخصات تحلیلی نمونه‌های شبیه‌سازی شده، در جدول (۳) ذکر شده است. دو پارامتر مهم انفجار شامل مقدار ماده منفجره و فاصله ماده منفجره از دال مورد بررسی قرار گرفته است. در مثال اول، دال‌های NSC و RPC تحت یک ماده منفجره معادل ۲۰ کیلوگرم از TNT در فواصل داده شده در جدول (۲) مورد تحلیل قرار گرفتند. در مثال دوم، به منظور بررسی اثر بمب‌های واقعی، دال‌ها برای بمب Mark84 که وزن آن معادل ۹۲۵ کیلوگرم می‌باشد نیز بررسی شدند. به علاوه در این مثال، اثر تغییر ضخامت دال‌ها تحت مواد منفجره متفاوت و در فواصل مختلف بررسی شده است. برای این منظور، ضخامت دال از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر افزایش داده شده است. در ادامه، به ترتیب مثال‌های ذکر شده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- مثال اول: نتایج حاصل از شبیه‌سازی دال‌های

NSC و RPC تحت ۲۰ کیلوگرم TNT

یک نمونه دال NSC و RPC با تکیه‌گاه‌های گیردار و به ابعاد $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ همان‌طور که در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده است، به‌عنوان مثال اول انتخاب شده است. مشخصات مدل تحلیلی نمونه‌های NSC و RPC در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است، برای ارزیابی دال RPC، دو سناریوی متفاوت انفجار در نظر گرفته شده است. نقطه شروع انفجار مطابق جدول (۳) در فواصل مختلف بالای

جدول ۲- مشخصات مدل‌های تحلیلی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته)

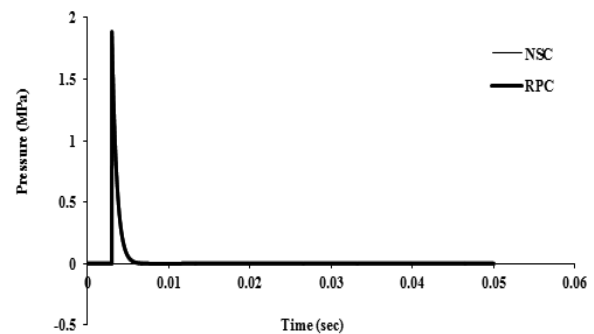
مقاومت کششی	مقاومت فشاری	مدول الاستیسیته	نمونه‌ها
(MPa)	(MPa)	(GPa)	
۲/۴۰	۳۰	۲۵/۷۴	NSC
۲۱/۴	۲۰۲	۵۰/۷	RPC

جدول ۳- مطالعه پارامتری بر اساس نقطه انفجار تحت ماده منفجره معادل ۲۰ kg TNT

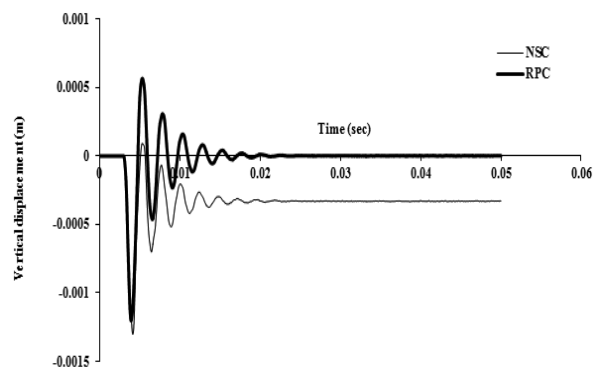
سناریوی انفجار	میزان ماده منفجره (خرج) (TNT, kg)	فاصله نقطه انفجار از بالای مرکز نمونه‌ها (m)
۱	۲۰	۱/۵
۲	۲۰	۴

خیلی کمتر می باشد. ماکزیمم جابجایی مرکز نمونه ها برای دال های NSC و RPC به ترتیب $-0/022$ و $-0/083$ متر می باشد. همچنین این تغییر مکان ها به ترتیب در زمان های $0/0366$ ثانیه و $0/143$ ثانیه پس از شروع انفجار در مرکز نمونه ها ایجاد می شود. به علاوه، تغییر مکان باقی مانده در نمونه های NSC و RPC به ترتیب برابر $-0/0208$ و $-0/0274$ متر می باشند. همچنین تغییر مکان های بیشینه و باقیمانده، در جدول (۴) به طور خلاصه مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود، عملکرد بتن RPC بسیار بهتر از نمونه نظیر NSC می باشد. شکل (۱۳) نمودار فشار انفجار تحت 20 کیلوگرم TNT را نسبت به زمان اندازه گیری بر حسب (مگاپاسکال-ثانیه) نشان می دهند. همان طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، دال های RPC و NSC فشار انفجار یکسانی را تحت ماده منفجره تجربه می کنند که در فاصله 4 متر بالای مرکز نمونه ها تعبیه شده بود. مطابق شکل بیشینه فشار انفجار برابر $1/88$ مگاپاسکال و در $0/03$ ثانیه بعد از شروع انفجار اتفاق می افتد.

در شکل (۱۴) جابجایی قائم مرکز دال های NSC و RPC نسبت به زمان اندازه گیری تحت 20 کیلوگرم TNT در فاصله 4 متر بالای مرکز نمونه ها مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند که جابجایی مرکز نمونه دال RPC نسبت به دال NSC تحت 20 کیلوگرم TNT تقریباً برابر می باشد. به عبارتی می توان نتیجه گرفت که بتن RPC در فواصل نزدیک، به علت افزایش فشار انفجار دارای عکس العمل بهتری نسبت به بتن معمولی است و در فواصل دورتر به علت کاهش اثر فشار ناشی از انفجار روی نمونه ها، هر دو بتن (NSC, RPC) تقریباً تغییر مکان یکسانی را از خود نشان می دهند. به عبارتی، می توان گفت که هرچه فاصله نقطه انفجار کمتر باشد عملکرد بتن RPC نیز بهتر می باشد. ماکزیمم جابجایی مرکز نمونه ها برای دال های NSC و RPC به ترتیب $-0/013$ و $-0/012$ متر می باشد. همچنین این تغییر مکان ها به ترتیب در زمان های $0/0414$ و $0/0396$ ثانیه پس از شروع انفجار در مرکز نمونه ها ایجاد می شود. به علاوه، تغییر مکان باقی مانده در نمونه های NSC و RPC به ترتیب برابر $-0/00333$ و $-1/33 \times 10^{-6}$ متر می باشند.



شکل ۱۳- نمودارهای شناسایی فشار-زمان برای دال های NSC و RPC در یک فاصله 4 متر بالای مرکز نمونه ها (سناریوی ۲)



شکل ۱۴- نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال های NSC و RPC در یک فاصله 4 متری بالای مرکز نمونه ها (سناریوی ۲)

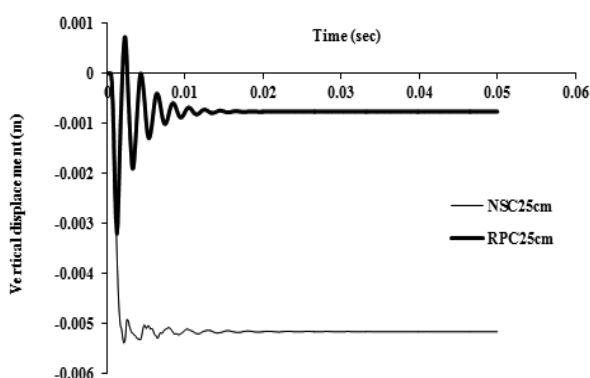
شکل (۱۱) نمودار فشار انفجار تحت 20 کیلوگرم TNT را نسبت به زمان اندازه گیری بر حسب (مگاپاسکال-ثانیه) ($\text{MPa}\cdot\text{sec}$) نشان می دهد. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، دال های NSC و RPC فشار انفجار یکسانی را تحت ماده منفجره تجربه می کنند که در فاصله $1/5$ متر بالای مرکز نمونه ها تعبیه شده بود. مطابق شکل، بیشینه فشار انفجار برابر $28/147$ مگاپاسکال و در $0/005$ ثانیه بعد از شروع انفجار اتفاق می افتد.

در شکل (۱۲) جابجایی قائم مرکز دال های NSC و RPC نسبت به زمان اندازه گیری 20 کیلوگرم TNT در فاصله $1/5$ متر بالای مرکز نمونه ها مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که جابجایی مرکز نمونه دال RPC نسبت به دال NSC تحت 20 کیلوگرم TNT

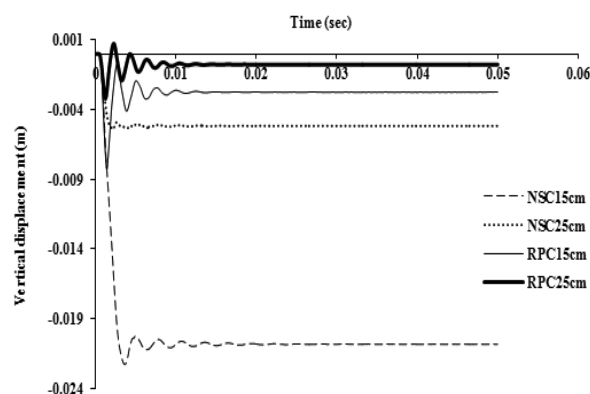
جدول ۴- مقایسه نتایج نمونه های NSC و RPC تحت 20 کیلوگرم TNT در فاصله $1/5$ متر

نمونه ها	دال بتن معمولی (NSC)	دال RPC	درصد کاهش جابجایی دال RPC نسبت به نمونه نظیر NSC
جابجایی بیشینه (m)	$-0/022$	$-0/083$	$62/27 \%$
جابجایی باقیمانده (m)	$-0/0208$	$-0/0274$	$86/82 \%$

می‌دهند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، دال‌های RPC و NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، فشار انفجار یکسانی را تحت ماده منفجره تجربه می‌کنند که در فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز نمونه‌ها تعبیه شده بود. مطابق شکل، بیشینه فشار انفجار برابر ۲۸/۱۴۲ مگاپاسکال و در ۰/۰۰۰۵ ثانیه بعد از شروع انفجار اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که فشار بیشینه در نمونه‌های با ضخامت ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر با هم یکسان است.



شکل ۱۶- نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در یک فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز نمونه‌ها



شکل ۱۷- نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر در یک فاصله ۱/۵ متری بالای مرکز نمونه‌ها

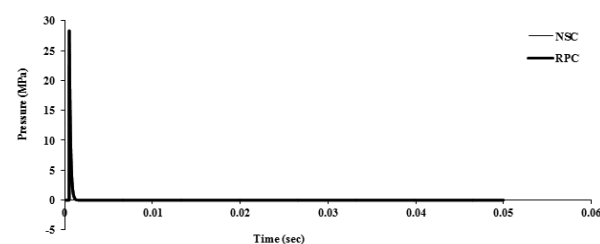
همچنین تغییر مکان‌های بیشینه و باقیمانده در جدول (۵) به‌طور خلاصه مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد بتن RPC بهتر از نمونه نظیر NSC می‌باشد.

۳-۲- مثال دوم: نتایج حاصل از شبیه‌سازی دال‌های NSC و RPC تحت سناریوهای مختلف با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر

در این مثال، به‌منظور در نظر گرفتن اثر تغییر ضخامت، همانند مثال اول، یک نمونه دال RPC و NSC با تکیه‌گاه‌های گیردار و به ابعاد $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ همان‌طور که در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است، انتخاب می‌شود. مشخصات مدل تحلیلی نمونه‌های NSC و RPC در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، برای ارزیابی دال RPC، دو سناریوی متفاوت انفجار در نظر گرفته شده است. نقطه شروع انفجار مطابق جدول (۶) در فواصل مختلف بالای مرکز نمونه‌ها تعبیه شده است.

نمودارهای شناسایی مدل‌های تحلیلی NSC و RPC برای سناریوهای (۱-۲) جدول (۶) در شکل‌های (۱۵-۲۰) نشان داده شده‌اند. شکل‌ها شامل مقایسه نمودارهای فشار-زمان و جابجایی قائم-زمان برای نمونه‌های NSC و RPC می‌باشند.

شکل (۱۵) نمودار فشار انفجار تحت ۲۰ کیلوگرم TNT را نسبت به زمان اندازه‌گیری بر حسب (مگاپاسکال - ثانیه) نشان



شکل ۱۵- نمودارهای شناسایی فشار-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز نمونه‌ها (سناریوی ۱)

جدول ۵- مقایسه نتایج نمونه‌های NSC و RPC تحت ۲۰ kg TNT در فاصله ۴ m

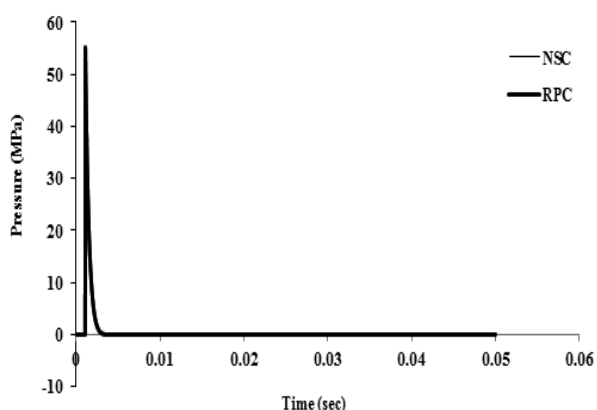
نمونه‌ها	دال بتن معمولی (NSC)	دال RPC	درصد کاهش جابجایی دال RPC نسبت به نمونه نظیر NSC
جابجایی بیشینه (m)	-۰/۰۰۱۳	-۰/۰۰۱۲	۷/۶۹ %
جابجایی باقیمانده (m)	-۰/۰۰۰۳۳	-۱/۳۳ × ۱۰ ^{-۶}	۹۹/۵۷ %

جدول ۶- مطالعه پارامتری بر اساس نقطه انفجار تحت مواد منفجره متفاوت برای نمونه دال‌های با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر

سناریوی انفجار	میزان ماده منفجره (خرج) (TNT, kg)	فاصله نقطه انفجار از بالای مرکز نمونه‌ها
۱	۲۰	۱/۵
۲	۹۲۵ (Mark 84 bomb)	۴

و ۰/۰۱۵۶ متر کاهش می‌یابد. در حالی که در دال RPC بیشینه جابجایی و جابجایی باقیمانده مرکز دال به ترتیب به اندازه ۰/۰۰۵۱ و ۰/۰۰۱۹۸ متر کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده به طور خلاصه در جدول (۸) مقایسه شده‌اند.

شکل (۱۸) نمودار فشار انفجار تحت Mark 84 bomb را نسبت به زمان اندازه‌گیری بر حسب مگاپاسکال - ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۱۸ - نمودارهای شناسایی فشار-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در یک فاصله ۴ متری بالای مرکز نمونه‌ها (سناریوی ۲)

در شکل (۱۶) جابجایی قائم مرکز دال‌های RPC و NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر نسبت به زمان اندازه‌گیری تحت ۲۰ کیلوگرم TNT در فاصله ۱/۵ متر بالای مرکز نمونه‌ها مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی مرکز نمونه دال RPC نسبت به دال NSC تحت ۲۰ کیلوگرم TNT کمتر می‌باشد. ماکزیمم جابجایی مرکز نمونه‌ها برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، به ترتیب ۰/۰۰۵۴- و ۰/۰۰۳۲- متر می‌باشد. همچنین این تغییر مکان‌ها به ترتیب در زمان‌های ۰/۰۰۲۱۳ و ۰/۰۰۱۲۴ ثانیه پس از شروع انفجار در مرکز نمونه‌ها ایجاد می‌شود. به علاوه، تغییر مکان باقی‌مانده در نمونه‌های NSC و RPC به ترتیب برابر ۰/۰۰۵۲- و ۰/۰۰۰۷۶ m می‌باشند. همچنین تغییر مکان‌های بیشینه و باقیمانده در جدول (۷) بطور خلاصه مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود عملکرد بتن RPC بسیار بهتر از نمونه نظیر NSC می‌باشد.

در شکل (۱۷) نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر مقایسه شده‌اند. بیشینه جابجایی مرکز نمونه‌ها برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۰/۰۰۲۲- و ۰/۰۰۸۳- متر می‌باشد. به علاوه، تغییر مکان باقی‌مانده در نمونه‌های NSC و RPC به ترتیب برابر ۰/۰۰۲۰۸- و ۰/۰۰۲۷۴- متر می‌باشند. در دال NSC با افزایش ضخامت از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر بیشینه جابجایی و جابجایی باقیمانده مرکز دال به ترتیب به اندازه ۰/۰۱۶۶-

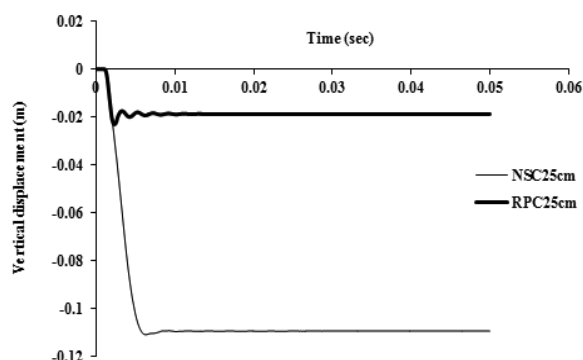
نمونه‌ها	دال بتن معمولی (NSC)	دال RPC	درصد کاهش جابجایی دال RPC نسبت به نمونه نظیر NSC
جابجایی بیشینه (m)	-۰/۰۰۵۴	-۰/۰۰۳۲	۴۰/۴۷ %
جابجایی باقیمانده (m)	-۰/۰۰۵۲	-۰/۰۰۰۷۶	۸۵/۳۸ %

نمونه‌ها	دال بتن معمولی (NSC)	دال RPC	کاهش جابجایی (m) دال NSC با ضخامت ۲۵ cm نسبت به نمونه ۱۵ cm	کاهش جابجایی (m) دال RPC با ضخامت ۲۵ cm نسبت به نمونه ۱۵ cm
جابجایی بیشینه (m) ۱۵ cm	-۰/۰۰۲۲	-۰/۰۰۸۳	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۵۱
جابجایی بیشینه (m) ۲۵ cm	-۰/۰۰۵۴	-۰/۰۰۳۲	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۵۱
جابجایی باقیمانده (m) ۱۵ cm	-۰/۰۰۲۰۸	-۰/۰۰۲۷۴	۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۱۹۸
جابجایی باقیمانده (m) ۲۵ cm	-۰/۰۰۵۲	-۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۱۹۸

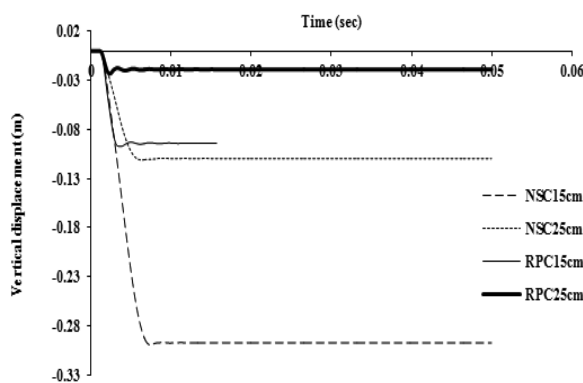
در شکل (۱۹) جابجایی قائم مرکز دال‌های RPC و NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر نسبت به زمان اندازه‌گیری تحت Mark 84 bomb در فاصله ۴ متری بالای مرکز نمونه‌ها مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی مرکز نمونه دال RPC نسبت به دال NSC تحت Mark 84 bomb خیلی کمتر می‌باشد. بیشینه جابجایی مرکز نمونه‌ها برای دال‌های NSC و RPC به ترتیب $-0/111$ و $-0/2305$ متر می‌باشد. همچنین این تغییر مکان‌ها به ترتیب در زمان‌های $0/0628$ و $0/0231$ ثانیه پس از شروع انفجار در مرکز نمونه‌ها ایجاد می‌شود. به علاوه، تغییر مکان باقی‌مانده در نمونه‌های NSC و RPC به ترتیب برابر $-0/1096$ و $-0/187$ متر می‌باشند که در شکل‌های زیر نشان داده شده است. همچنین تغییر مکان‌های بیشینه و باقی‌مانده در جدول (۹) به طور خلاصه مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود عملکرد بتن RPC بسیار بهتر از نمونه نظیر NSC می‌باشد.

در شکل (۲۰) نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر مقایسه شده‌اند. بیشینه جابجایی مرکز نمونه‌ها برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب $-0/2994$ و $-0/09719$ متر می‌باشد. به علاوه، تغییر مکان باقی‌مانده در نمونه‌های NSC و RPC به ترتیب برابر $-0/2973$ و $-0/094$ متر می‌باشند. در دال NSC با افزایش ضخامت از ۱۵ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر، بیشینه جابجایی و جابجایی باقی‌مانده مرکز دال به ترتیب به اندازه $0/1883$ و $0/1877$ متر کاهش می‌یابد. در حالی که در دال RPC بیشینه جابجایی و جابجایی باقی‌مانده مرکز دال به ترتیب به اندازه $0/07414$ و $0/0753$ متر کاهش می‌یابد. همان‌طور که نتایج حاصل از تحلیل سناریوهای (۱) و (۲) نشان می‌دهند، دال NSC در مقایسه با دال RPC نسبت به افزایش ضخامت بیشتر، واکنش نشان می‌دهد. به عبارتی با افزایش ضخامت دال‌ها، جابجایی بیشینه و باقی‌مانده مرکز نمونه‌ها کاهش می‌یابد ولی اثر این افزایش ضخامت در دال بتن معمولی (NSC) بسیار بیشتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابجایی بیشینه و باقی‌مانده دال RPC با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر، کمتر از دال NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر است.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، دال‌های RPC و NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، فشار انفجار یکسانی را تحت ماده منفجره تجربه می‌کنند که در فاصله ۴ متر بالای مرکز نمونه‌ها تعبیه شده بود. مطابق شکل، بیشینه فشار انفجار ۵۵ مگاپاسکال و در $0/0109$ ثانیه بعد از شروع انفجار اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که فشار بیشینه در نمونه‌های با ضخامت ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر با هم یکسان است.



شکل ۱۹- نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در یک فاصله ۴ متر بالای مرکز نمونه‌ها تحت Mark84 bomb



شکل ۲۰- نمودارهای شناسایی جابجایی-زمان برای دال‌های NSC و RPC با ضخامت‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر در یک فاصله ۴ متری بالای مرکز نمونه‌ها تحت Mark 84 bomb

جدول ۹- مقایسه نتایج نمونه‌های NSC و RPC با ضخامت ۲۵ cm تحت ۹۲۵ kg TNT در فاصله ۴ m

نمونه‌ها	دال بتن معمولی (NSC)	دال RPC	درصد کاهش جابجایی دال RPC نسبت به نمونه نظیر NSC
جابجایی بیشینه (m)	$-0/111$	$-0/2305$	۷۹/۲۵ %
جابجایی باقیمانده (m)	$-0/1096$	$-0/187$	۸۲/۹۴ %

که در سناریوی اول انفجار، یعنی در فاصله ۴ متری از مرکز نمونه‌ها، سطح دال NSC تحت ۹۲۵ کیلوگرم TNT به کل آسیب می‌بیند و خراب می‌شود. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت خرابی در دال RPC بسیار کمتر است. لازم به ذکر است که میزان مواد منفجره قابل حمل در Mark 84 bomb حدود ۴۲۹ کیلوگرم TNT می‌باشد که تحت این میزان ماده منفجره، جایجایی قائم مرکز نمونه‌ها به بیش از نصف کاهش می‌یابند. در نتیجه می‌توان گفت که دال RPC تحت سناریوی اول انفجار، دارای عکس‌العمل مناسب می‌باشد. اما نمونه نظیر NSC به کل خراب می‌شود.

۳- در مثال دوم، ضخامت نمونه‌ها از ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر افزایش داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند دال NSC در مقایسه با دال RPC نسبت به افزایش ضخامت بیشتر، واکنش نشان می‌دهد. به عبارتی، با افزایش ضخامت دال‌ها، جایجایی بیشینه و باقی‌مانده مرکز نمونه‌ها کاهش می‌یابد ولی اثر این افزایش ضخامت در دال بتن معمولی (NSC) بسیار بیشتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جایجایی بیشینه و باقیمانده دال RPC با ضخامت ۱۵ سانتی‌متر نزدیک به دال NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر است. می‌توان نتیجه گرفت که در دال RPC با ضخامت بتن کمتر در مقایسه با دال NSC می‌توان به تغییر مکان مورد نظر دست یافت که این موضوع در مقیاس بزرگتر و در پروژه‌های با وسعت بیشتر بسیار حائز اهمیت است و منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود.

۴- نتایج تحلیل نمونه‌های RPC و NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر در مثال دوم (سناریوی ۲) نشان می‌دهد که بیشینه جایجایی و جایجایی باقیمانده مرکز نمونه RPC در مقایسه با نمونه نظیر NSC بسیار کمتر است. در نتیجه، دال RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر، توانایی تحمل ۹۲۵ کیلوگرم TNT را در فاصله ۴ متری از نقطه انفجار دارد اما نمونه NSC تحت این میزان ماده منفجره به کل خراب می‌شود.

همچنین تغییر مکان‌های بیشینه و باقی‌مانده در جدول (۱۰) به‌طور خلاصه مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بتن NSC در مقایسه با نمونه RPC نسبت به افزایش ضخامت بیشتر، واکنش نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از پاسخ‌های دینامیکی دال‌های RPC (بتن پودری واکنش‌پذیر) و NSC (بتن معمولی) به‌منظور بررسی رفتار آنها تحت بار انفجار استفاده شده است. نمونه‌ها در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده و پس از اعتبارسنجی، تحت مقادیر مختلف بار انفجار و در فواصل متفاوت از مرکز دال قرار گرفته‌اند. به‌منظور بررسی دو پارامتر مهم انفجار، یعنی مقدار خرج (ماده منفجره) و فاصله از نقطه انفجار و همچنین بررسی توانایی دال‌های RPC در مقابل بار انفجار، دال‌های RPC و NSC به ابعاد 1000mm×1000mm×150mm در مثال اول تحت ۲۰ کیلوگرم TNT و در دو سناریوی متفاوت بررسی شدند. این سناریوها شامل مقادیر ماده منفجره فوق و در فواصل مختلف از بالای مرکز دال‌ها تعریف شده‌اند. به‌منظور بررسی اثر تغییر ضخامت در مثال دوم، دو سناریوی انفجار برای نمونه‌ها با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر نیز بررسی شده است. در ادامه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نمونه‌ها تحت مواد منفجره فوق به‌طور خلاصه شرح داده می‌شود:

۱- همان‌طور که در نمودارها نشان داده شده است، در یک فشار یکسان، جایجایی قائم بیشینه و جایجایی باقی‌مانده مرکز دال RPC در همه سناریوها، کمتر از مقادیر نظیر در نمونه NSC می‌باشد. همچنین مشاهده شده است که در فواصل کم، عملکرد دال RPC خیلی بیشتر و بهتر از نمونه نظیر NSC می‌باشد.

۲- با توجه به نمودارهای جایجایی بیشینه نمونه‌ها مشاهده می‌شود

جدول ۱۰- مقایسه نتایج نمونه‌های NSC و RPC با ضخامت‌های ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر تحت ۹۲۵ کیلوگرم در فاصله ۴ متر				
نمونه‌ها	دال بتن معمولی (NSC)	دال RPC	کاهش جایجایی (m) دال NSC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر نسبت به نمونه ۱۵ سانتی‌متر	کاهش جایجایی (m) دال RPC با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر نسبت به نمونه ۱۵ سانتی‌متر
جایجایی بیشینه (m) ۱۵ سانتی‌متر	-۰/۲۹۹۴	-۰/۰۹۷۱۹	۰/۱۸۸۳	۰/۰۷۴۱۴
جایجایی بیشینه (m) ۲۵ سانتی‌متر	-۰/۱۱۱۱	-۰/۰۲۲۰۵		
جایجایی باقیمانده (m) ۱۵ سانتی‌متر	-۰/۲۹۷۳	-۰/۰۹۴	۰/۱۸۷۷	۰/۰۷۵۳
جایجایی باقیمانده (m) ۲۵ سانتی‌متر	-۰/۱۰۹۶	-۰/۰۱۸۷		

- reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C," Nucl. Eng. Des., vol. 241, pp. 2416-2424, 2011.
13. Z. Wenzhong, L. Baifu, and W. Ying, "Stress-strain relationship of steel-fibre reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures," *Mate. Rr. Struct.*, doi 10.1617/s11527-014-0312-9.
 14. N.-H. Yi, J.-H. Kim, Y.-G. Cho, and J. H. Lee, "Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete," *Constr. Build Mater.*, vol. 28, pp. 694-707, 2012.
 15. S. Lavanya Prabha, J. K. Dattatreya, M. Neelamegam, and M. V. Seshagiri, "Properties of reactive powder concrete under uniaxial compression," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 11, pp. 6408-6416, 2010.
- ۵- مراجع**
1. . Richard and M. Cheyrezy, "Composition of reactive powder concretes," *Cement Concrete Res*, vol. 25, pp. 1501-1511, 1995.
 2. M. M. Reda, N. G. Shrive, and J. E. Gillott, "Microstructural investigation of innovative UHPC," *Cement Concrete Res*, vol. 29, pp. 323- 329, 1999.
 3. M. Cheyrezy, V. Maret, and L. Frouin, "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)," *Cement Concrete Res*, vol. 25 pp. 1491-1500, 1995.
 4. N. Roux, C. Andrade, and M. A. Sanjuan, "Experimental study of durability of reactive powder concretes," *J. Mater. Civil Eng.*, vol. 8, pp. 1-6, 1996.
 5. O. Bonneau, M. Lachemi, E. Dallaire, J. Dugat, and P. C. Aitcin, "Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes," *ACI Mater. J.*, vol. 94, pp. 286-290, 1997.
 6. R. Adeline, M. Lachemi, and P. Blais, "Design and Behavior of the Sherbrooke Footbridge," *International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke (Quebec) Canada*, pp. 16-20, August 1998.
 7. J. Jung wirth, "Underspanned Bridge Structures in Reactive Powder Concrete," *4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, Munich, Germany, 2002.*
 8. P. Richard and M. Cheyrezy, "Reactive powder concretes with high ductility and 200-800MPa compressive strength," In: *Proceedings of V.M. Malhotra Symposium, Concrete Technology Past Present and Future, ACI SP 144, P. K. Metha, S. Francisco*, pp. 507-518, 1994.
 9. H. Zanni, M. Cheyrezy, V. Maret, S. Philippot, and P. Nieto, "Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using 29Si NMR," *Cement Concrete Res*, vol. 26, no. 1, pp. 93-100, 1996.
 10. O. Bayard and O. Plé, "Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modeling and experimental investigations," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 70, pp. 839-851, 2003.
 11. Y. W. Chan and S. H. Chu, "Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete," *Cement Concrete Res.*, vol. 34, no. 7, pp. 1167-1172, 2004.
 12. T. Yuh-Shiou, P. Huang-Hsing, and K. Ying-Nien, "Mechanical properties of steel fiber

Studying of the Reactive Powder Concrete Behavior Reinforcing with Fiber Subjected to Blast Load

M. R. Yavari*, H. Akbarzadeh Bengar, O. Yazdanpanah

Abstract

In this paper the reactive powder concrete (RPC) behavior subjected to different explosion charges and also in different distance of explosion point has been investigated. Moreover, the effect of change in the thickness of RPC slab has been considered. In order to analytical simulation of RPC behavior against blast and also accuracy of results using ABAQUS software, a RPC slab studied in the literature has been verified. The obtained results are showed that the simulated model of RPC is match with literature one. In order to compare of resulted results of RPC slab a NSC slab has also simulated. Different scenarios of explosion in form of tow numerical examples have been considered. It's noted that the NSC slab is supposed to be a reinforced concrete, whereas 2% volume of special short steel fibers were used in the RPC specimen. The acquired results of analysis have been showed that the RPC have better blast explosion resistance than reinforced normal strength concrete and can be used in built and strengthening of structures.

Key Words: *Reactive Powder Concrete (RPC), blast load, distance of explosion point, analytical simulation.*