

مطالعه‌ی عملکرد پنل جاذب موج انفجار در حفاظت از ابنیه و تأسیسات

علی ابراهیم‌زاده (پژوهشگر)

محمد فیاض* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

مهدی دهقان‌نژاد ثانی‌آبادی (کارشناس)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه ایوانکی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۲)
دوری ۳۹، شماره ۳، صص. ۵۰-۳۷، (پژوهشی)

طرح مقاوم‌سازی وقتی کارآمد است که علاوه بر مقرون به صرفه بودن، تلفات جانی و خسارت زیربنایی را کاهش دهد و ابعاد و دامنه‌ی آسیب‌ها را هر چه بیشتر محدود کند. طراحی و ساخت اغلب موانع مقاوم در برابر انفجار در انواع سازه‌ها به دلیل هزینه‌ی بالا از یک سو و احتمال کم رخداد انفجار در طول عمر سازه از سوی دیگر بهینه نیستند. در پژوهش حاضر پیشنهاد استفاده از روش ترکیبی تور مهارکننده در کنار پنل جاذب موج انفجار به عنوان الگویی جدید در حفاظت از ابنیه در برابر انفجارهای خارجی مطالعه شده است. راکت در فاصله‌ی مشخصی از سازه‌ی اصلی توسط یک تور مقاوم مهار شده و پنل، موج ناشی از انفجار را جذب کرده است. با انجام مطالعه و آزمایش‌هایی روی انواع مواد جاذب، پنل منتخب معرفی و رفتار آن در مقابل تهدید در فاصله‌های مختلف به صورت عددی و میدانی ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، تطابق مناسبی با آزمایش‌های میدانی داشته است که قابل تعمیم برای مقادیر مختلف خرج‌ها نیز است.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی، جذب انرژی، موج انفجار، مدل‌سازی عددی، آباکوس، بتن پارچه‌بی، پنل جاذب.

ali.ebrahimzade@ut.ac.ir
m.fayyaz@modares.ac.ir
mahdi.deh1378@gmail.com

۱. مقدمه

انفجار باعث آسیب رساندن به سازه‌ها و زیرساخت‌های موجود می‌شود و می‌تواند خدمات مالی و جانی زیادی را نیز به بار آورد؛ در سال‌های گذشته، مواد منفجره در نقاط مختلف جهان منجر به آسیب‌های جدی مالی و جانی شده است؛ بنابراین ارائه‌ی ساختاری از پنل محافظ به منظور مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری باعث افزایش امنیت ساختمان‌ها می‌شود.

امروزه افزایش خطرهای پیچیدگی انواع انفجارهای خارجی، مانند اصابت راکت و پرتابه‌های انفجاری روی سقف و دیواره‌های سازه‌ها موجب آسیب‌پذیری و کاهش عمر بسیاری از سازه‌ها از جمله سازه‌های حساس و حیاتی شده است. حساسیت مسئله‌ی اخیر، منجر به مطالعات آزمایشگاهی و تئوری در زمینه‌ی بهره‌گیری از لایه‌های جاذب به عنوان فداشونده و مستهلک‌کننده‌ی انرژی برای حفاظت از سازه‌ها شده است. با توجه به اینکه هزینه‌ی مقاوم‌سازی سازه‌ها در مقابل انفجار سرسام‌آور

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۱/۹/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۱۱.

استناد به این مقاله:

ابراهیم‌زاده، علی، فیاض، محمد، و دهقان‌نژاد ثانی‌آبادی، مهدی، ۱۴۰۲. مطالعه‌ی عملکرد پنل جاذب موج انفجار در حفاظت از ابنیه و تأسیسات. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳).

صص. ۳۷-۵۰. DOI:10.24200/J30.2023.60842.3124

بر روی دال‌های بتن مسلح با الیاف فولادی صورت گرفته است. اگرچه استفاده از الیاف و لایه‌های کامپوزیتی منجر به افزایش مقاومت سازه‌ها در برابر بار انفجاری می‌شود، ولی همگی محدودیت‌های اجرایی و محاسباتی دارند و نمی‌توان سازه‌ها (به ویژه سازه‌های موجود) را با افزودن لایه‌های کامپوزیتی، به طور نامحدود مقاوم‌سازی کرد.

سنگره^۵ و همکاران (۲۰۰۸)^[۹] در مرکز توسعه‌ی تحقیقات فناوری دفاعی دانشکده‌ی علوم مهندسی بن‌گورین، چند نمونه دال بتن مسلح را با لایه‌های جاذب آلومینیومی پوشانده و تحت موج انفجار ناشی از یک تن مواد منفجره در فاصله‌ی ۲۰ متری قرار داده‌اند. مقایسه‌ی رفتار دال‌های با پوشش و بدون پوشش جاذب نشان می‌دهد که استفاده از جاذب آلومینیومی ضمن کم کردن سرعت و شتاب دال، ترک‌ها و آسیب‌ها را کاهش داده است. فرهادی و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۰] با شبیه‌سازی صفحه‌ی لانه زنبوری مربعی از جنس فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر حرارت در نرم‌افزار آباکوس، اثر آن در کاهش موج انفجار وارد بر سازه را نشان داده‌اند. اگرچه استفاده از چنین جاذب‌هایی می‌تواند بار انفجار اعمالی بر سازه را کاهش دهد، اما قیمت بالای شبکه‌های لانه زنبوری آلومینیومی و هزینه‌های سنگین تحمیل شده بر پروژه از مزیت آن می‌کاهد و کاربرد آن را در مصادیق عملی بسیار محدود می‌سازد. برخی پژوهشگران از هسته‌ی فوم در بین دو ورق فلزی برای جذب انرژی ناشی از موج انفجار استفاده کرده‌اند.^[۱۱] به این منظور، زی^۶ و همکاران (۲۰۱۴)^[۱۳] از لایه‌ی کامپوزیتی فوم آلومینیومی مجوف استفاده کرده‌اند، که به ورق‌های شکل‌پذیر فولادی محدود بوده و هزینه‌ی آن بسیار زیاد گزارش شده است. از مطالعات کاربردی‌تر در این زمینه می‌توان به کار هومایی^۷ و همکاران (۲۰۱۶)^[۱۴] در استفاده از لایه‌ی ماسه‌یی و کار روتر و رایت^۸ (۲۰۱۶)^[۱۵] در به کارگیری پوشش فداشونده اشاره کرد، که در آنها به کارایی ماسه و قطعات فداشونده در مقابله با موج انفجار تأکید شده است.

پانل‌های ساندویچی نسبت به کامپوزیت‌های لایه‌یی، قابلیت جذب انرژی بیشتری دارند. هر چه ضخامت هسته‌ی پانل ساندویچی بیشتر شود، مقاومت آن در برابر ضربه‌ی ناشی از موج انفجار افزایش پیدا می‌کند.^[۱۶] پانل‌ها به دلیل شکل هندسی ویژه‌ی که دارند، علاوه بر عامل سبکی، رفتار بسیار مناسبی در برابر ضربه‌ی ناشی از انفجار و جذب انرژی ناشی از آن دارند. از این رو، بسیاری از جاذب‌های انرژی به شکل پانل طراحی می‌شوند. هسته‌ی پانل مهم‌ترین نقش را در استهلاک انرژی انفجار دارد، که به عنوان فداشونده می‌تواند از دو جنبه‌ی هندسی و خواص مکانیکی مواد ارزیابی شود. ویژگی‌های هندسی هسته، مانند: اندازه و تعداد سلول‌ها، شکل هندسی سلول‌ها، ضخامت ورق هسته، ضخامت یا عمق هسته و ... می‌توانند در میزان جذب انرژی پانل مؤثر باشند.^[۱۷]

نوریک و مارتین^۹ (۱۹۸۹)^[۱۸] ضمن ارائه و تحلیل روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی تغییر شکل صفحات نازک در برابر بار انفجاری، نسبت ضخامت به خیز را به عنوان تابعی از بار وارده، خواص مواد، هندسه و ابعاد صفحه ارزیابی کرده‌اند. راجندرانا و لی^{۱۰} (۲۰۰۹)^[۲۰] به بررسی رفتار ورق‌ها تحت بارگذاری انفجاری پرداختند و روابط ریاضی حاکم بر مدل‌سازی بار انفجاری را به دست آوردند. ژاکوب^{۱۱} و همکارانش (۲۰۰۴)^[۲۱] مطالعات خود را روی صفحات فولادی با نسبت‌های متغیر طول به عرض و همچنین تغییر در ضخامت، ارائه و نتایج مطالعات خود را با روش المان محدود ارزیابی کردند. زتو و هاتچینسون^{۱۲} (۲۰۰۳)^[۲۲] مطالعه‌ی برای ارزیابی پانل ساندویچی تحت موج انفجار انجام دادند و دریافتند که پانل ساندویچی با هسته‌ی دارای مقاومت کافی، می‌تواند ایمپالس بزرگ‌تری را نسبت

به یک صفحه‌ی فلزی با جرم یکسان تحمل کند. یکی از مطالعات آزمایشگاهی توسط موری^{۱۳} (۲۰۰۹)^[۲۳] با هدف تعیین عملکرد و مودهای شکست سازه‌ی ساندویچی که تحت اثر موج انفجار واقع شده بود، صورت گرفته است. والدویت^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۶)^[۲۴] یک مطالعه‌ی تحلیلی آزمایشگاهی روی پانل ساندویچی فلزی با هسته‌ی موج دار، تحت بارگذاری‌های طولی و عرضی انجام داده‌اند. جینگ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۳)^[۲۵] پاسخ دینامیکی پانل ساندویچی استوانه‌یی با هسته‌های آلومینیوم و فوم را به صورت عددی در مقابل موج انفجار بررسی کردند و دریافتند کرنش فشاری که مهم‌ترین نقش را در جذب انرژی سازه‌ی ساندویچی دارد، تقریباً با ایمپالس نرمال شده به صورت خطی افزایش می‌یابد. وطنی اسکویی و کیا کجوری (۲۰۱۵)^[۲۶] مطالعاتی روی اثر موج انفجار در پانل ساندویچی با هسته‌ی I شکل به صورت عددی انجام دادند و دریافتند که هسته‌ی I شکل با سوراخ‌های دایره‌یی در جان خود می‌تواند جذب انرژی بیشتر و جابه‌جایی کمتری نسبت به هسته‌ی I شکل و همچنین صفحه‌ی فلزی معادل داشته باشد. آری هاران و همکاران (۲۰۰۷)^[۲۷] رفتار ساندویچ پانل با هسته‌ی لانه زنبوری تماماً فولادی را با ساندویچ پانلی که لایه‌ی در معرض انفجار آن فولادی و هسته‌ی لانه زنبوری و لایه‌ی پایینی آن از جنس سبک پلیمری بوده است، را با هم مقایسه کردند و دریافتند که ساندویچ پانل کامپوزیتی در عین سبک بودن، عملکرد بسیار مناسب‌تری دارد. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۸] اثر انفجار در پانل‌های ساندویچی با هسته‌های لانه زنبوری و مربعی را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند و دریافتند که با افزایش اندازه المان‌های هسته میانی، هسته با شکل مربع عملکرد بهتری دارد. سبزواری و شهبان (۲۰۱۸)^[۲۹] تحلیل رفتاری چهار نوع ورق موجدار مستطیلی، دوزنقه‌یی، مثلثی و بیضی را برای هسته‌ی پانل‌های ساندویچی در معرض انفجار بررسی کرده‌اند. در بحث جذب انرژی، پارامترهای مختلفی، مانند: اندازه و هندسه‌ی سازه، جنس سازه و نحوه‌ی اعمال بار و همچنین میزان بار وارده در رفتار سازه اثرگذار هستند. برای دستیابی به یک جاذب بهینه، باید سازه از دیدگاه‌های گوناگونی بررسی شود. اگرچه پژوهشگران بسیاری، راهکارهای متنوعی در مقاوم‌سازی المان‌های سازه‌یی معرفی کرده‌اند، لکن نتایج اغلب مطالعات مذکور منجر به افزایش وزن و هزینه‌ی مستحذات خواهد شد. در حالی که بارهای انفجاری برای بسیاری از سازه‌ها به عنوان بارهای اتفاقی و با احتمال پایینی در طول عمر مفید آنها رخ خواهد داد و استفاده از ظرفیت خمیری مواد به کار رفته به جای طراحی کامل مواد در ناحیه‌ی کشسان ضرورت دارد. در پژوهش حاضر، روشی نوین در کنار سایر روش‌های معرفی شده تا کنون ارائه شده است، که امکان کنترل وزن و هزینه‌ی سازه‌ها را از طریق استفاده از ظرفیت خمیری مواد در کنار ایجاد فاصله‌ی برخورد فراهم می‌کند. از آنجا که فشار موج انفجار در حالت تماسی به مراتب بیشتر از حالت آزاد است و انرژی موج به سرعت در زمان گسترش مستهلک می‌شود؛ بنابراین در روش ارائه شده با استفاده از یک تور فاصله‌دهنده، محل برخورد راکت و پرتابه در فاصله‌ی مشخصی از سازه‌ی اصلی روی می‌دهد. همچنین با استفاده از پنبه‌ی که به عنوان پوشش روی سازه قرار می‌گیرد، انرژی ناشی از موج انفجار، مستهلک می‌شود و در نتیجه، سازه‌ی اصلی در برابر تهدید مصون می‌ماند. پنبه پیشنهادی سبک، ارزان، قابل کاربرد است و روی انواع سقف‌ها، قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالا و تردپذیر دارد.

پنبه مذکور در مقابل انفجار ۳ کیلوگرم TNT در فاصله‌های ۰/۵۳، ۰/۲ و ۱ متری به صورت میدانی آزمایش شده و در مرحله‌ی بعد، مدل‌سازی عددی آزمایش‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفته است، تا نتایج به دست آمده برای طیف وسیعی از تهدیدها قابل کاربرد باشد.

۲. روش پژوهش

پس از مطالعه بر روی انواع مواد جاذب موج انفجار، در پژوهش حاضر از پنبلی متشکل از لیکا و بتن پارچه‌بی استفاده شده است.

انفجار، یک واکنش شیمیایی سریع در ماده است، که ماده‌ی اولیه را به گاز تبدیل می‌کند. مواد منفجره براساس ویژگی‌های ساختاری خود می‌توانند منفجر یا محترق شوند. از این لحاظ می‌توان آنها را به دو دسته‌ی کلی مواد منفجره‌ی ضعیف و قوی تقسیم کرد. مواد منفجره‌ی قوی می‌توانند منفجر شوند و در نتیجه، امواج شوک ایجاد کنند و مصالح را بسوزانند یا خرد کنند، در مصالح نفوذ کنند، نیروی بالا برنده به مواد اعمال کنند و آنها را بلند کنند. چنانچه یک ماده‌ی منفجره در تماس با یک جسم جامد باشد، رسیدن موج انفجار به سطح ماده‌ی منفجره باعث ایجاد امواج تنش شدیدی در آن ماده‌ی جامد خواهد شد، که ممکن است منجر به خرد شدن و از هم پاشیدن آن ماده شود. این اثر ناگهانی که مانند ضربه‌ی چکش است، بریزانس نامیده می‌شود. شاخص اصلی در تعیین قابلیت بریزانس یک ماده‌ی منفجره، فشار دینامیکی جبهه‌ی موج انفجار است.^[۳۰]

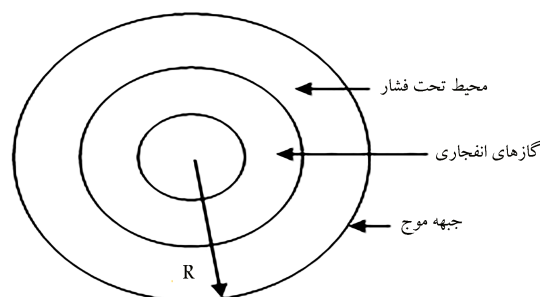
مطابق شکل ۱ انفجار ناشی از یک خرج کروی در هوای آزاد، امواجی با فشار و سرعت زیاد به شکل کروی تولید و در محیط اطراف منتشر می‌کند. با گذشت زمان، هر قدر که شعاع کره و به تبع آن حجم محیط متأثر از امواج انفجار بیشتر می‌شود، فشار و سرعت موج ناشی از انفجار به شدت کاهش می‌یابد. به فشار ناشی از موج انفجار در هر نقطه از محیط اطراف انفجار، که مقدار آن با وزن ماده‌ی منفجره رابطه‌ی مستقیم و با فاصله از مرکز انفجار رابطه‌ی معکوس دارد، اضافه فشار می‌گویند، محاسبه‌ی اندازه و تغییرات فشار در طی زمان، اهمیت کاربردی زیادی دارد.

با توجه به پیچیده بودن پدیده‌ی انفجار، معمولاً رابطه‌های ارائه شده برای محاسبه‌ی اضافه فشار یا فشار ناشی از انفجار، ترکیبی از روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی است. در قرن ۱۹ میلادی، آزمایش‌های گسترده‌ی درباره‌ی بررسی پدیده‌ی انفجار و آثار آن در سازه‌ها و تأسیسات نزدیک به محل انفجار توسط پژوهشگران انجام شده است.^[۳۱]

برود^{۱۶} (۱۹۹۵)،^[۳۲] با توجه به اندازه فشار در هر نقطه، یک رابطه‌ی دو ضابطه‌ی را برای محاسبه‌ی اضافه فشار انفجار در فاصله‌های نزدیک و دور از محل انفجار ارائه کرده است.

هنریج (۱۹۹۵)،^[۳۳] بر مبنای مطالعات نظری و آزمایشگاهی، یک رابطه‌ی سه ضابطه‌ی را برای محاسبه‌ی اضافه فشار ناشی از انفجار ارائه کرده است (روابط ۱ الی ۵):

$$P_s = \frac{6/7}{z^3}, \quad p_s > 10 \text{ bar} \quad (1)$$



شکل ۱. انتشار موج انفجار در محیط.^[۳۱]

$$P_s = \frac{0/975}{z} + \frac{1/455}{z^2} + \frac{5/85}{z^3} - 0/019, \quad p_s < 10 \text{ bar} \quad (2)$$

$$p_s = \frac{14/027}{z} + \frac{5/540}{z^2} + \frac{0/357}{z^3} + \frac{0/00625}{z^4} \text{ bar},$$

$$0/05 \leq z \leq 0/3 \quad (3)$$

$$p_s = \frac{6/194}{z} + \frac{0/326}{z^2} + \frac{2/132}{z^3} \text{ bar}, \quad 0/3 \leq z \leq 1 \quad (4)$$

$$p_s = \frac{0/662}{z} + \frac{4/05}{z^2} + \frac{3/288}{z^3} \text{ bar}, \quad 1 \leq z \leq 10 \quad (5)$$

که در آنها، P_s اضافه فشار دینامیکی و z فاصله‌ی مقیاس شده است، که از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$z = R \left[\frac{1}{w} \right]^{1/3} \quad (6)$$

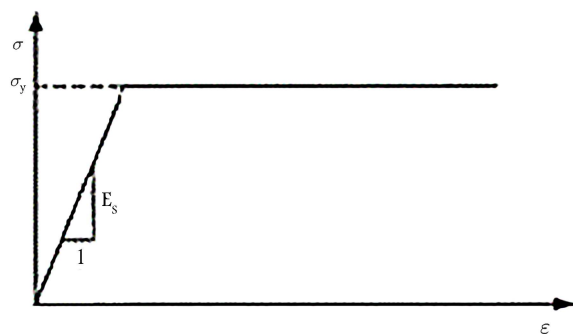
که در آن، w جرم TNT معادل ماده‌ی انفجاری مورد نظر یا قدرت انفجار و R فاصله‌ی نقطه‌ی مورد بررسی تا مرکز انفجار است. در صورتی که جرم بر حسب کیلوگرم و فاصله بر حسب متر باشد، مقادیر $(z \geq 0/05) \text{ m/kg}^{1/3}$ انفجار در فواصل دور و مقادیر $(z \leq 0/05) \text{ m/kg}^{1/3}$ انفجار در فواصل نزدیک در نظر گرفته می‌شود.

جذب انرژی با تغییر شکل بروز می‌کند و با کمیت‌های مرتبط با تغییر شکل قابل اندازه‌گیری است. نمونه‌ی کمیت‌های مذکور، بیشینه‌ی مقدار خیز سازه یا چرخش‌های تکیه‌گاهی آن است. مواد سازه‌ی دارای رفتاری کشسان و خمیری هستند. رفتار کشسان خمیری را برای راحت تر شدن محاسبات به صورت‌های مختلف ساده‌سازی کرده‌اند. معروف‌ترین و ساده‌ترین مدل که بسیار مورد توجه قرار گرفته است، رفتار کشسان خمیری کامل است، که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که در آن، ε کرنش و σ تنش و E_s نیز مدول کشسانی ماده‌ی مورد نظر را نشان می‌دهند.

مواد شکل‌پذیر در برابر مواد ترد، قابلیت جذب انرژی بیشتری دارند. سطح زیر منحنی تنش - کرنش، انرژی جذب شده توسط المان را ارائه می‌دهد. برای به دست آوردن کل انرژی جذب شده (E_A) می‌توان از رابطه‌ی ۷ استفاده کرد، که در آن، P نیروی اعمالی، S_b میزان جابه‌جایی نهایی، و d_s المان جابه‌جایی در طول روند می‌چاله شدن است.

$$E_A = \int_0^{S_b} P ds \quad (7)$$

براساس آزمایش‌های میدانی مختلف و همچنین مدل‌سازی‌های عددی انجام شده برای جاذب‌های مختلف مرسوم (ساندویچ پل فلزی و فومی، فوم ضد انفجار، فوم



شکل ۲. رفتار کشسان خمیری کامل.

بتن و ...) پوکه های صنعتی به دلیل تخلخل زیاد، ضربه پذیری و وجود اصطکاک بین دانه ها، دارای سطح زیر منحنی تنش - کرنش بیشتر و بنابراین جذب انرژی بالاتری در مقابل موج انفجار هستند.

شبیه سازی بتن پارچه ای با استفاده از مدل رفتاری مناسب CDP در مقیاس های ماکرو و مزو صورت گرفته و نتایج با هم مقایسه شده است. در مدل ماکرو سعی بر آن بوده است که ضمن کاهش حجم محاسبات، نتایجی با دقت مناسب حاصل شود. در این شبیه سازی، نمودارهای فشاری و کششی بتن پارچه ای حاصل شده از آزمایشگاه و نتایج مطالعات ژانگ، به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده است. بتن پارچه ای به صورت خمش چهار نقطه ای شبیه سازی و در انتها، نمودار نیرو بر حسب جابه جایی به عنوان خروجی نرم افزار، در یک مرحله به صورت دوخطی و در مرحله ی بعد، ترک ها و شکستگی هایی در نمودار حاصل لحاظ شده است. در نهایت، با استفاده از نمودار دوخطی نهایی و نمودار مطالعات ژانگ، به مدل نهایی ماکرو بتن پارچه ای منجر شده است.

روش مدل سازی مزو بتن پارچه ای به صورت دوفازی (بتن و نخ) در نظر گرفته شده است، بدین صورت که ابتدا ملات ۴۰ مگاپاسکال برای فاز بتن و نخ fdy به فاز نخ در نظر گرفته شده و سپس به فک، جابه جایی ۱۰ میلی متر داده شده و نمودار نیرو - جابه جایی ترسیم و با نمودار نیرو - جابه جایی مدل ماکرو تک مقایسه شده است. در ادامه، مشخصات و نمودارهای ورودی به نرم افزار آباکوس در مدل ماکرو و مزو در شکل ۳ مشاهده می شود.

با توجه به استفاده از انواع مواد در لایه بندی پیل و عدم دسترسی به نتایج آزمایش های دینامیک برای تمام مواد، تأثیر نرخ کرنش برای بتن پارچه ای به صورت اصلاح پارامترهای مؤثر که در جدول ۱ ارائه و با نتایج آزمایش های دینامیک تطبیق داده شده است.

طبق مطالعات فیاض و همکارانش (۲۰۱۸)، برای جذب انرژی موج انفجار توسط پوسته ی بتن پارچه ای، خردشدگی فقط در سطوح آن مشاهده شده و عمق زیادی نداشته است؛ اما در نواحی تکیه گاهی ضعیف عمل کرده و خسارت های زیادی (خردشدگی و سوراخ شدگی) بر آن وارد شده است. [۳۵]

از این رو در پژوهش حاضر، برای جذب انرژی موج انفجار از پیل هایی استفاده شده که شامل یک لایه پوکه ی صنعتی به عنوان هسته بوده است، که نقش استهلاک کننده ی انرژی را ایفا کرده و از ماده ی جدیدی به نام بتن پارچه ای در دو لایه به عنوان پوسته ی پیل جهت نگهداشتن هسته و همچنین تقسیم و انتقال فشار موج در سطح بیشتری به هسته استفاده شده است. در ادامه، ادبیات فنی پوکه های صنعتی و بتن پارچه ای به صورت مختصر ارائه شده است.

۱.۲. پوکه ی صنعتی (لیکا)

عموماً سبک دانه هایی را که به وسیله ی فرایند انبساط رس تولید می شوند، با نام لیکا می شناسند، که از حروف اول کلمات انگلیسی تشکیل دهنده ی رس منبسط شده ی

جدول ۱. پارامترهای مؤثر در اثر نرخ کرنش در بتن پارچه ای.

پارامتر	مقدار
زاویه ی اتساع	۲۰-۴۰
پتانسیل خروج از مرکزیت خمیری	۰/۱
پارامتر نسبت مقاومت فشاری دوجوره به تک محوره	۱/۱۶-۱/۲۵
K_c	۰/۶۶۷

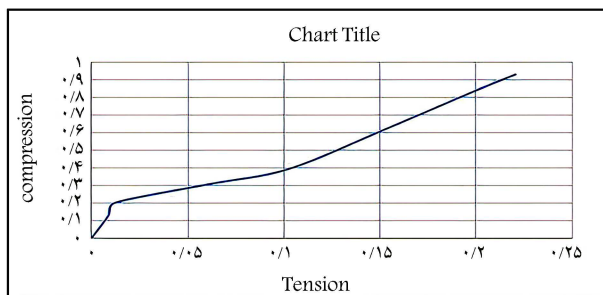
سبک حاصل شده است و یک نام عمومی برای سبک دانه های مذکور به حساب می آید. سبک دانه های رس منبسط شده (لیکا) به روش تر در کوره ی گردان تولید می شوند. گِل حاصل از رس و آب از بالای کوره ی گردان وارد آن می شود، سپس با عبور این قطعات از کوره ی گردان که حرارتی بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه ی سانتی گراد دارد، سبک دانه های با شکل ها و اندازه های مختلف ایجاد می شود. این محصول در گذشته و در حال حاضر با نام های دیگری مانند آرلاپتس، فیو، آرگکس (فرانسه)، و لترلایت (ایتالیا) نیز تولید شده است. [۳۸-۳۶]

کارهای متعددی که در ۴۰ سال گذشته در سراسر اروپا انجام شده است، نشان داده اند که استفاده از لیکا در مواردی مانند ساخت بتن های سبک، [۴۰،۳۹] مواد فیلتر در فرایند تصفیه ی آب، [۴۲،۴۱] مواد عایق زیر پایه ی مخزن نمک در نیروگاه های انرژی حرارتی خورشیدی [۴۳،۴۲] و پرکننده ی سبک وزن ژئوتکنیکی [۴۵،۴۴] و نیز چگالی سبک آن باعث شده است که به عنوان مصالح ساختمانی در خاکریزها و به عنوان مواد پرکننده در ساختارهای نگهدارنده برای کاهش فشارهای فعال به کار رود.

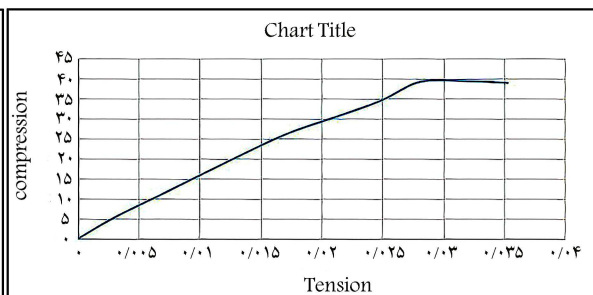
عملکرد مقاومت سنگ دانه به ویژگی های هر دانه وابسته است. مطالعات متعددی در مورد مقاومت در برابر شکست دانه های منفرد تحت فشار تک محوری در مواد مختلف وجود دارد، [۴۸،۴۷] یا سنگ پر، [۴۹] که در پژوهش حاضر به عنوان مرجع برای لیکا در نظر گرفته شده است. بر اساس مطالعات انجام شده ذرات با بیش از دو تماس تحت فشار شکسته شده اند. [۵۳-۵۰]

۲.۲. بتن پارچه ای

بتن مسلح به پارچه (TRC) [۷]، مزیت های متنوعی از قبیل مقاومت کششی بالا، انعطاف پذیری عالی، ضخامت و وزن کم و مقاوم در برابر خوردگی دارد. [۵۵،۵۴] به عنوان یک جزء تسلیح کننده، پارچه می تواند مقاومت کششی را به گونه ی قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر نوع الیاف، هندسه ی بافت که شامل فضای الیاف بود و سبک بافت است. [۵۷،۵۶] سبک و اندازه ی دسته بندی الیاف ممکن است تأثیر قابل توجهی در کارآمدی تسلیحات به کار رفته در بتن داشته باشند. [۵۸] بتن پارچه ای که توسط برون و کروفرود (۲۰۰۵) در انگلیس اختراع شد، یکی از مطلوب ترین محصولات در زمینه ی مهندسی عمران است. [۵۹] بتن پارچه ای، که یک پارچه ی سه بعدی پر شده با پودر سیمان انعطاف پذیر است، زمانی که هیدراته و سخت می شود، یک لایه ی بتنی نازک، مستحکم، ضد آب و ضد حریق را تشکیل می دهد. خصوصیات و ویژگی اجزاء آن، شامل: ماتریس سیمان، نوع الیاف و الگوی هندسی پارچه مستقیماً مقاومت مکانیکی و پایداری حجمی را تحت تأثیر قرار می دهد. [۶۱،۶۰] در مقایسه با مخلوط های بتن سنتی، بتن پارچه ای دارای نصب آسان تر و سریع تر و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه تر است و همچنین مزیت هایی از قبیل: کاهش آسیب های زیست محیطی، کاهش زمان ساخت و ساز و بهره برداری و کاهش نیروی کاری دارد. کاربردهای بتن پارچه ای، شامل: جان پناه ها و سنگرهای نظامی، ساخت کانال های انتقال آب، پایدار کردن خاکریزها، ساخت سریع سواره رو جهت ایجاد سطوح فرود، تقویت سازه، پوشش کانال، پوشش تونل، تثبیت خاک و ... است. [۶۲] در شکل ۴ الف و ب، اجزاء بتن پارچه ای مشاهده می شود. نحوه ی ساخت بتن پارچه ای به این صورت است که پارچه ی اسپیسر بافته شده با نخ مخصوص با سیمان و افزودنی های لازم پر و با استفاده از پوشش آب بند تقویت و ضد آب می شود. در جدول ۲، نیز مشخصات فنی بتن پارچه ای ارائه شده است.



(ب)



(الف)

	Yield Stress	Cooling Strain
1	200000	0
2	1072230	0.03827517
3	1356130	0.1187495
4	155550	0.200709504

(ت)

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	340000000	0.15

(پ)

	Yield Stress	Plastic Strain
1	7310.76	0
2	2387770	0.0127125
3	7126930	0.142223
4	8494740	0.373443
5	10072400	0.326292
6	1666340	0.347534
7	165550	0.417494

(ج)

	Damage Parameter	Inelastic Strain
1	0	0
2	0.03610022	0.000145578
3	0.053123115	0.000344408
4	0.031726256	0.000678742
5	0.162267131	0.004219942
6	0.370238646	0.012954383
7	0.449819042	0.017051008
8	0.489241078	0.019071258

(ث)

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	27897500000	0.2

(خ)

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	800000000	0.008

(ح)

	Yield Stress	Inelastic Strain
1	12000000	0
2	15548300	1.00366E-05
3	24701600	4.28678E-05
4	33897200	0.000120764
5	37286100	0.000263483
6	40000000	0.000699982
7	37916400	0.000969386
8	34769400	0.00131105

(د)

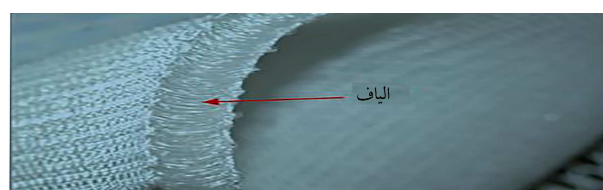
شکل ۳. الف) نمودار فشاری بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو؛ (ب) نمودار کششی بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو؛ (پ) مشخصات کشسان بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو؛ (ت) رفتار کششی بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو؛ (ث) مشخصات تخریب فشاری بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو؛ (ج) استحکام کششی نخ FDY؛ (خ) مشخصات خمیری بتن پارچه‌ای در مقیاس ماکرو؛ (ح) مشخصات کشسان داده شده به نخ بتن پارچه‌ای در حالت شبیه‌سازی موز؛ (د) مشخصات فشاری عنوان ورودی ملات بتن پارچه‌ای در شبیه‌سازی موز.

جدول ۲. جدول خصوصیات مکانیکی پارچه‌ی بتنی.

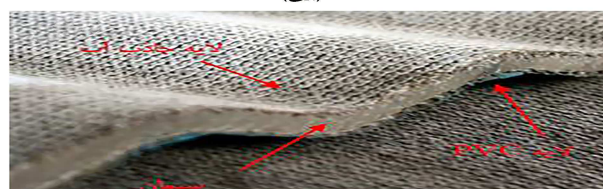
مقدار	واحد	استاندارد	خصوصیات مکانیکی
۳۰	MPa	EN ۱۲۳۹۰-۳	مقاومت ۲۸ روزه
> ۴	MPa	ASTM D۸۰۵۸	شکست اولیه‌ی ترک اولیه
> ۶	MPa	ASTM D۸۰۵۸	شکست نهایی ترک نهایی
۴	kN	EN-ISO ۱۲۲۳۶	مقاومت برشی استاتیکی
۹۵	%	EN ۱۲۴۶۷	ذوب یخ‌ندان ۲۵۰ سیکل
پاس شده	-	EN ۱۲۴۶۷	مقاومت در برابر هوازدگی
پاس شده	-	EN ۱۴۴۱۴	مقاومت شیمیایی
پاس شده	-	DD CEN/TS ۱۴۴۱۶	مقاومت در برابر ریشه‌ی گیاهان
B - S _۱ , d _۰	-	EN ۱۳۵۰۱	واکنش به آتش
۰/۱۱	n	ASTM D۶۴۶۰	ضریب زبری

جدول ۳. سناریوهای آزمایش‌های ۱، ۲ و ۳ برای انجام آزمایش‌های میدانی.

شماره‌ی آزمایش	فاصله (m)	ترتیب لایه‌بندی پلنل	ضخامت (cm)
۱	۰/۵۳	بتن پارچه‌یی	۱/۳
		لیکا	۳۰
		بتن پارچه‌یی	۱/۳
۲	۰/۲	بتن پارچه‌یی	۱/۳
		لیکا	۳۰
		بتن پارچه‌یی	۱/۳
۳	۱	بتن پارچه‌یی	۱/۳
		لیکا	۳۰
		بتن پارچه‌یی	۱/۳



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) الیاف بتن پارچه‌یی؛ ب) لایه‌های مختلف بتن پارچه‌یی.

۳. آزمایش‌های میدانی انفجار

در نوشتار حاضر، یک پلنل (شامل دو لایه بتن پارچه‌یی و یک لایه پوک‌هی صنعتی) در سه حالت مختلف آزمایش شده‌اند. مهم‌ترین شاخصه‌های انتخاب پلنل مذکور، جذب انرژی بالا، ارزانی و سبک بودن و همچنین سهولت دسترسی بوده است. این پلنل فداشونده در یک آزمایش انفجار تماسی و دو آزمایش انفجار آزاد در فواصل دور و نزدیک آزمایش شده است. در جدول ۳، مشخصات و شرایط هر یک از آزمایش‌های میدانی ارائه شده است. مقدار ۳ کیلوگرم خرج TNT به ترتیب در فواصل ۰/۵۳، ۰/۲ و ۱ متری از سطح بتن پارچه‌یی نسبت به پلنل به ابعاد ۱ × ۱ متر آزمایش شده است. از آنجایی که پلنل آزمایشی به عنوان پوشش روی ساختمان‌ها معرفی شده است، بنابراین جهت شبیه‌سازی نمونه‌ی عملی در زیر پلنل از یونولیت به عنوان صفحه‌ی شاهد استفاده شده است.

در حالت انفجار تماسی، آزمایش ۱ - شکل ۵ - الف، مدل کارایی لازم را ایفا نکرده و پلنل متلاشی شده است. همچنین، فاصله‌ی مقیاس شده برابر $0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ و فشار موج انفجار آن برابر 0.536 psi روابط ۶ و ۷ محاسبه شده است. همچنین پلنل فداشونده به علت وجود ترکش و افزایش تصاعدی فشار انفجار در حالت تماسی، به کلی تخریب و متلاشی و از حیز انتفاع خارج شده است (شکل ۶ - الف). در آزمایش ۲ - شکل ۵ - ب، پارامترهای فاصله‌ی مقیاس شده $0.14 \text{ m/kg}^{1/3}$



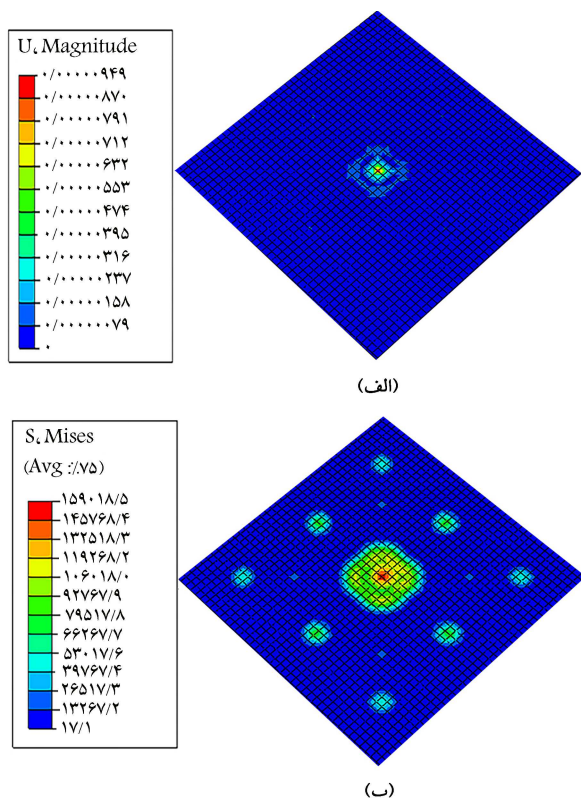
(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۵. الف) آزمایش ۱، ارزیابی پلنل به صورت انفجار تماسی؛ ب) آزمایش ۲، ارزیابی پلنل با فاصله‌ی ۰/۲ متری در انفجار، ج) آزمایش ۳، ارزیابی پلنل با فاصله‌ی ۱ متری در انفجار.

و فشار موج انفجار برابر 6926 psi مطابق روابط ۶ و ۷ محاسبه شده‌اند. با وجود این‌که در این حالت انفجار از حالت تماسی خارج شده و در حوزه‌ی انفجار در فاصله‌ی نزدیک قرار گرفته است، فشار موج انفجار به مراتب کمتر از آزمایش اول بوده است، اما باز به حدی زیاد بوده است که در لایه‌ی انتهایی پلنل، سوراخی به قطر ۱۲ سانتی‌متر ایجاد و به لایه‌ی شاهد آسیب وارد کرده است (شکل ۶ - ب). در آزمایش ۳ - شکل ۵ - ج، پلنل موفق به جذب کامل موج فشاری انفجار و ترکش‌های ناشی از انفجار شده است. همچنین دو پارامتر فاصله‌ی مقیاس شده



(الف)

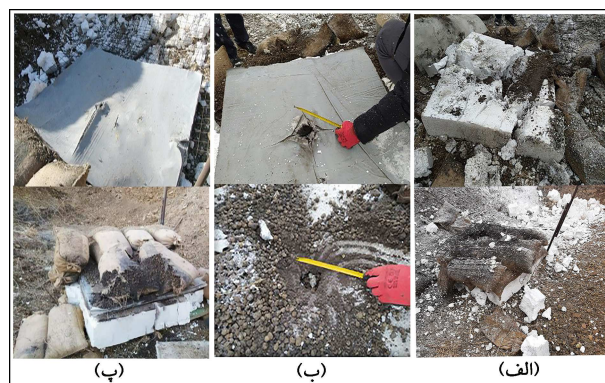
(ب)

شکل ۷. الف) کانتور جابه‌جایی به دست آمده برای بتن پارچه‌یی تحت انفجار کانوپ؛ ب) کانتور تنش فون میسز بتن پارچه‌یی تحت انفجار کانوپ.

۲.۴. راستی آزمایی مدل بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو

پس از پایان تحلیل، نمودار نیرو - جابه‌جایی مطابق شکل ۸ - ب استخراج و با نتایج حالت ماکرو و نتایج آزمایشگاه مقایسه و نتیجه‌گیری شده است که نمودارها از لحاظ ساختار و دوخطی بودن شبیه یکدیگر هستند، ولی تفاوت‌هایی در مشخصات ملات و پارچه دارند؛ چون مشخصات پارچه نمونه داخلی و مشخصات پارچه در نرم‌افزار با هم تفاوت دارند، لذا باعث ایجاد اختلاف شده است. ولی از لحاظ ساختار نمودار، شباهت بسیار زیاد و قانع‌کننده‌ی وجود دارد و تفاوت اصلی به دلیل سختی ماده‌ی بتن در دو حالت است و حالت کشسانی بتن، تأثیر بسیار زیادی دارد و همچنین نتیجه گرفته شد که نتایج حالت مزو با نتایج آزمایشگاه، اختلاف کمتری دارد و مدل‌سازی بتن پارچه‌یی در حالت مزو نسبت به ماکرو، دقت بالاتری دارد. محل شکستگی نمودارها تقریباً در جابه‌جایی ۰/۰۰۵ رخ داده است. همچنین میزان بار قابل تحمل در مدل‌سازی مزو تقریباً ۹۰ نیوتن است. این مقدار برای مدل ماکرو تقریباً ۱۰۰ نیوتن و برای آزمون آزمایشگاهی، معادل ۸۲/۵ نیوتن به دست آمده است (شکل ۸ - ر). با توجه به شکل ۸ - ر نتیجه گرفته شد که نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس‌های مزو و ماکرو با استفاده مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌یی در نرم‌افزار آباکوس، بسیار نزدیک به نتایج پژوهشگران و آزمون‌های آزمایشگاهی بوده‌اند، همچنین این نتایج به دست آمده است:

۱. جابه‌جایی نهایی ایجاد شده در نمونه‌ی بتن پارچه‌یی در آزمون آزمایشگاهی تقریباً ۰/۰۰۹ متر و مقدار جابه‌جایی به دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس در مقیاس مزو و ماکرو، ۰/۰۱ متر بوده است؛



شکل ۶. الف) میزان خرابی آزمایش ۱؛ ب) میزان خرابی آزمایش ۲؛ پ) میزان خرابی آزمایش ۳.

در پژوهش حاضر، براساس نمودار خمش و نمودار نیرو - جابه‌جایی در بتن پارچه‌یی، به اعتبارسنجی بتن پارچه‌یی در دو مقیاس ماکرو و مزو پرداخته شد که در شکل ۷ قابل مشاهده است. در انتها، نیز پوکه‌ی صنعتی در میان دو لایه‌ی بتن پارچه‌یی راستی‌آزمایی شده است. همچنین، مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار آباکوس ۲۰۲۰ انجام شده است.

۴. راستی‌آزمایی

در پژوهش حاضر، براساس نمودار خمش و نمودار نیرو - جابه‌جایی در بتن پارچه‌یی، به اعتبارسنجی بتن پارچه‌یی در دو مقیاس ماکرو و مزو پرداخته شد که در شکل ۷ قابل مشاهده است. در انتها، نیز پوکه‌ی صنعتی در میان دو لایه‌ی بتن پارچه‌یی راستی‌آزمایی شده است. همچنین، مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار آباکوس ۲۰۲۰ انجام شده است.

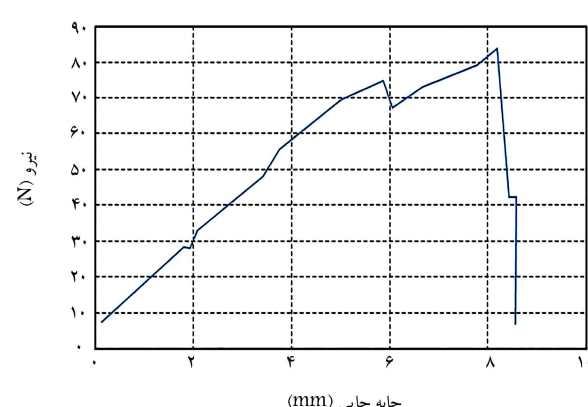
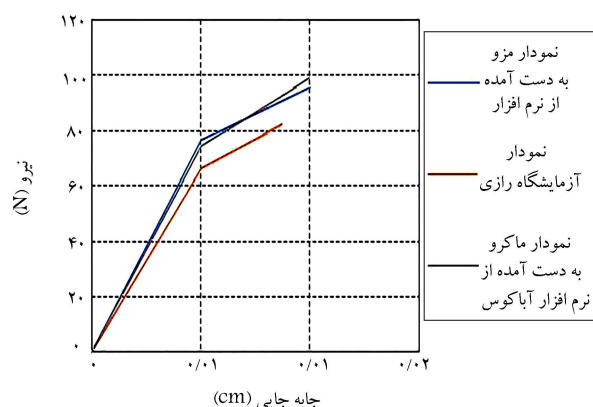
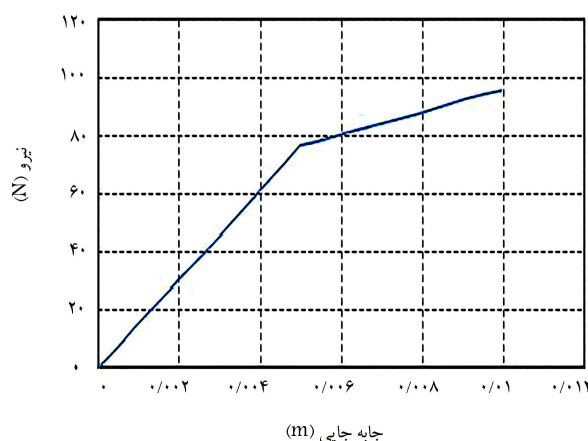
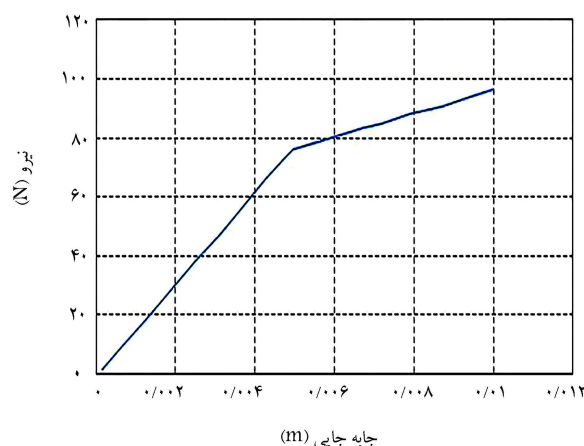
۱.۴. راستی‌آزمایی مدل بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو

نمودار خمش چهار نقطه‌یی بتن پارچه‌یی انتخاب شده با توجه به انتخاب ساینش بندی ۰/۰۲۵ متر و در نظر گرفتن زمان تحلیل یک ثانیه با نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به دست آمده از نتایج مطالعات ژانگ مقایسه و مشاهده شده است که نتایج بسیار به هم نزدیک و قابل قبول هستند و چون نمودار نیرو - جابه‌جایی ارائه شده توسط آقای ژانگ بر مبنای مقاومت خمشی - جابه‌جایی ترسیم شده است، با توجه به شکل ۸ - د، نمودار نیرو - جابه‌جایی به نمودار مقاومت خمشی - جابه‌جایی تبدیل شده است.

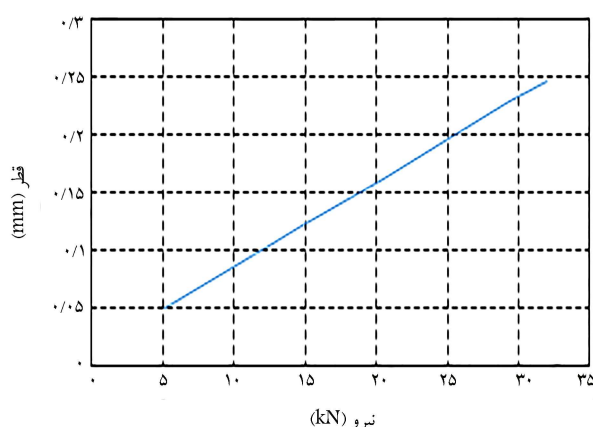
مقاومت خمشی نهایی مطابق رابطه‌ی ۸ به دست آمده است، که در آن، L طول کل نمونه (۴۰۰ میلی‌متر)، B عرض نمونه (۸۰ میلی‌متر) و H ضخامت نمونه (۱۳ میلی‌متر) هستند و از طریق معادله‌ی مذکور، مقدار نیرو برحسب کیلونیوتن محاسبه شده است:

$$MOR = \frac{FL}{BH^2} \quad (8)$$

با توجه به شکل ۸ - ب، مقدار بیشینه‌ی نیرو برای بتن پارچه‌یی ۱۰۰ نیوتن به دست آمده است. با توجه به رابطه‌ی ۵، مقدار مقاومت خمشی نهایی برای بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو، ۲ مگاپاسکال به دست آمده و این مقدار برای پژوهش آقای ژانگ طبق شکل ۸ - الف معادل $2/15 \pm 9/0$ بوده است، که تطابق مناسبی با نتیجه‌ی به دست آمده در نرم‌افزار با میزان خطای ۰/۰۶ دارد. [۶۳]



شکل ۸. الف) نمودار نیرو - جابه‌جایی بتن پارچه‌یی در مقیاس ماکرو تحت خمش چهار نقطه‌یی؛ ب) نمودار نیرو - جابه‌جایی گرفته شده از آزمایشگاه رازی؛ ج) نمودار نیرو - جابه‌جایی به دست آمده بتن پارچه‌یی در حالت شبیه‌سازی در مقیاس مزو؛ د) محاسبه‌ی مقاومت خمشی نمونه‌ی بتن پارچه‌یی طبق مطالعه‌ی ژانگ.



شکل ۹. نمودار بار خرد کردن با قطر ذرات لیکا.

گرد و سطح زبر و ناهموار هستند. در پژوهش حاضر، این سبک از دانه‌های لیکا مدنظر راستی‌آزمایی قرار گرفته است.^[۶۴] برای لیکا به نمودار بار خرد کردن و قطر ذرات شکل ۹ اکتفا شده است.

مارسال (۱۹۶۹)، همبستگی تجربی $Pa = \eta D \lambda$ را بین میانگین بار خرد کردن P_a ، به دست آمده از طریق آزمایش‌های خرد کردن آزمایشگاهی و بعد D ذره پیشنهاد کرده و داده‌های تجربی جمع‌آوری شده از رابطه‌ی تقریباً خطی را ما بین بار خرد کردن و قطر ذرات تشکیل داده است. شکل ۹، با مقادیر $\eta = 7/95$ و

۲. در مقدار جابه‌جایی ۵/۰۰٪ متر، نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی آزمایشگاه و نرم‌افزار، شکست نمودار دوخطی ایجاد شده است؛

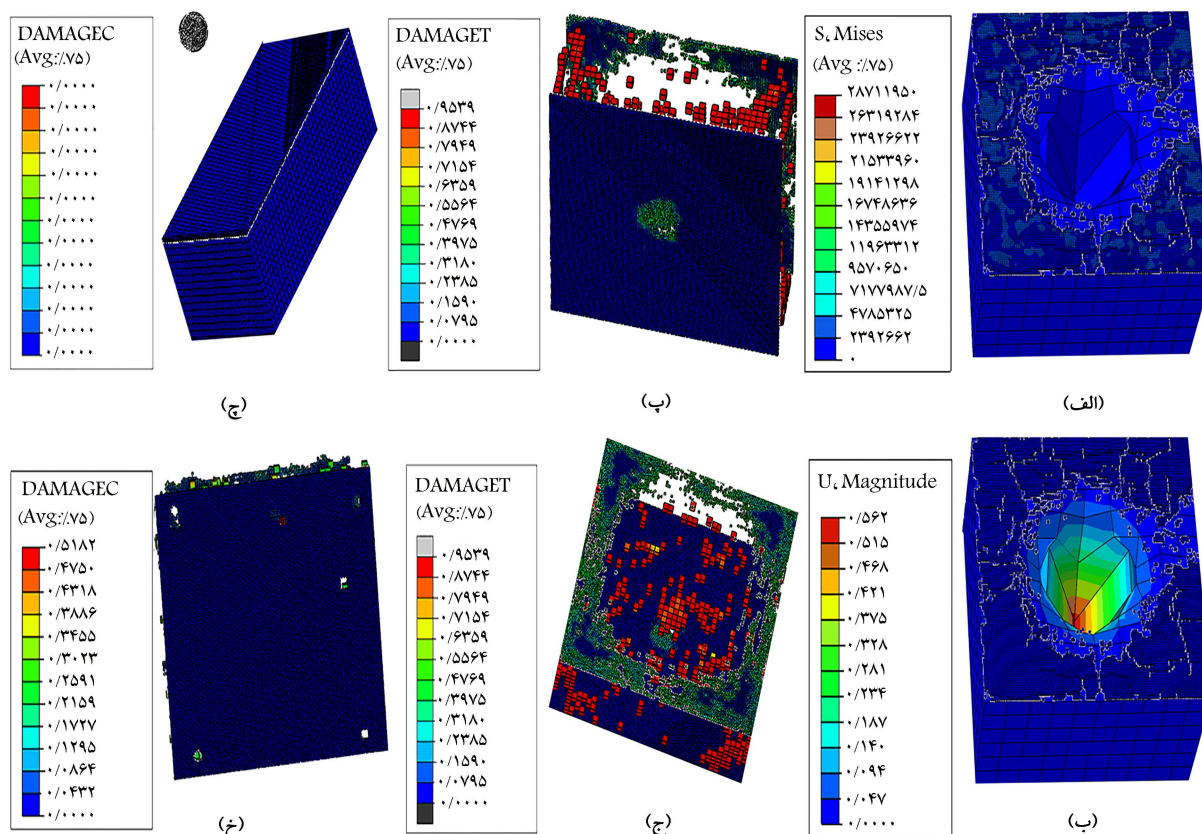
۳. مقدار نیروی ایجاد شده در محل شکستگی نمودارها در مقدار جابه‌جایی ۵/۰۰٪ برای آزمون آزمایشگاهی: ۶۶/۵ نیوتن، برای آزمون عددی در مقیاس مزو: ۷۶/۷۵ نیوتن و برای آزمون عددی در مقیاس ماکرو: ۷۴/۵ نیوتن بوده است؛

۴. مقدار نیروی نهایی به دست آمده از نمودارها، برای آزمون آزمایشگاهی: ۸۲/۵ نیوتن؛ برای آزمون عددی در مقیاس مزو: ۹۵/۷ نیوتن و برای آزمون عددی در مقیاس ماکرو: ۹۹/۲ نیوتن بوده است؛

۵. سطح زیر نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به دست آمده از آزمایشگاه و مدل‌سازی عددی، تقریباً نزدیک به هم به دست آمده است. همچنین نتایج نمودارهای نیرو - جابه‌جایی به دست آمده از خروجی نرم‌افزار آباکوس، تحت مقیاس‌های ماکرو و مزو بتن پارچه‌یی بسیار نزدیک به دست آمده است.

۳.۴. راستی‌آزمایی مدل پوک‌هی صنعتی (لیکا)

بافت متخلخل ناشی از انبساط بافت خاک رس، که در نتیجه‌ی ایجاد و محبوس شدن گازها در جرم به حالت خمیری روان در می‌آید، در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به وجود می‌آید موجب ایجاد مشخصه‌های پایه‌ی دانه‌های لیکا می‌شود. مقادیر کمی حتی شکل دانه‌ها بر حسب روش تولید با کوره‌ی ذوب نواری یا گردان می‌توانند متفاوت باشند. دانه‌های حاصل از کوره‌ی گردان، دارای شکل تقریباً



شکل ۱۰. الف) کانتورهای به دست آمده انفجار در آزمایش ۱؛ ب) جابه‌جایی به دست آمده از آزمایش ۱؛ پ) پارامتر تخریب در لایه‌ی پایینی بتن پارچه‌ی آزمایش ۲؛ ج) تخریب ایجاد شده در آزمایش ۲؛ چ) حالت آزمایش ۳؛ خ) لایه‌ی پایینی بتن پارچه‌ی بعد از انفجار آزمایش ۳.

شده است. روش کانوپ فقط در فواصل دور، دقیق و نتایج آن قابل قبول است برای بررسی انفجار در فواصل بسیار نزدیک و تماسی از روش انفجار اولر-لاگرانژی استفاده شده است.

۵. نتایج مدل‌سازی عددی

پنل فداشونده مطابق آزمایش‌های میدانی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و اعمال شرایط هر آزمایش مدل‌سازی و ارزیابی شده است.

مدل‌سازی پنل فداشونده بدین طریق انجام شده است که دو لایه‌ی بتن پارچه‌ی با ضخامت ۱۳ میلی‌متر به عنوان پوسته و لیکا با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر به عنوان هسته در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل شده است. با مقدار ۳ خرج یک کیلوگرمی TNT، مدل در حالت تماسی در فواصل ۵۳/۰ و ۲/۰ متری و در حالت آزاد در فاصله‌ی ۱ متری ارزیابی شده است. تکیه‌گاه‌های نمونه از نوع مفصلی در نظر گرفته و فقط در جهت قائم مقید شده است.

در مدل‌سازی آزمایش اول، مطابق شکل ۱۰ الف و ب، به دلیل فشار زیاد موج انفجار، پنل تماماً تخریب و متلاشی شده است. در مدل‌سازی آزمایش دوم، مطابق شکل ۱۰ پ و ج، به دلیل مقدار متوسط فشار انفجار، لایه‌ی اولیه‌ی بتن پارچه‌ی و لیکا تخریب و در لایه‌ی دوم بتن پارچه‌ی سوراخی به قطر حدوداً ۱۲ سانتی‌متری ایجاد شده است. در مدل‌سازی آزمایش دوم، به دلیل پارامترهایی چون: آسیب، شدت نیرو، زاویه‌ی اعمال نیرو و مقدار آسیب ۴/۰، سطح خرابی متوسط برآورد شده است. در مدل‌سازی آزمایش سوم، مطابق شکل ۱۰ ج و خ، به دلیل

$\lambda = 1$ نشان می‌دهد که تأثیر قابل‌توجهی در RH ندارد.^[۶۵]

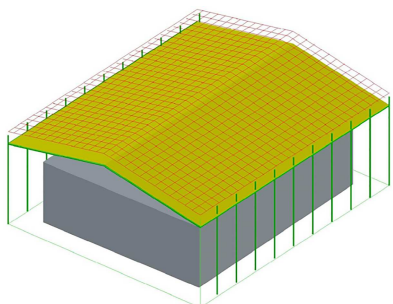
در ابتدا برای اینکه رفتار لیکا تحت انفجار به صورت حذف المان نمایش داده شود، به پیداکردن ماده‌ی بتن سبک لیکا با خواص CDP^{۱۸} پرداخته شد؛ به طوری که رفتار دو مدل رفتاری CDP و خواص موهر - کولمب برای لیکا تحت بارهای مختلف، رفتار یکسانی از خود نمایش دهد. جهت راستی‌آزمایی پوکه‌ی صنعتی (لیکا) از مدل رفتاری مرسوم برای خاک، مدل موهر - کولمب استفاده شده است. پارامترهای ورودی مدل رفتاری موهر - کولمب با توجه مطالعه‌ی زاگری^{۱۹} و همکاران (۲۰۲۱)،^[۶۶] ارائه شده است.

حذف المان در آباکوس با استفاده از یک فایل متنی و فعال ساختن گزینه‌ی مرتبط انجام می‌شود. با حذف یک المان، تمام تلاش‌های روی آن صفر می‌شود و آن المان هیچ‌گونه مشارکت انرژی در محاسبات ندارد (ارجاع راهنمای آباکوس).^[۶۷] در ابتدا یک لایه‌ی لیکا با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر بین دو لایه‌ی بتن پارچه‌ی با ضخامت ۱۳ میلی‌متر قرار گرفت. به ماده‌ی لیکا، مشخصات موهر - کولمب تخصیص داده شد. با توجه به دفترچه‌ی مشخصات لیکای خریداری شده، چگالی لیکا ۳۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ ۳/۱ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳، زاویه‌ی انحراف بین دانه‌های لیکا ۵ درجه و زاویه‌ی گسیختگی بین دانه‌ها ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. با فرض حالت‌های انفجار تماسی و انفجار آزاد در فواصل ۵۳/۰ متری، ۲/۰ متر و ۱ متری روی لایه‌ی اول بتن پارچه‌ی با میزان خرج ۳ کیلوگرم TNT، جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها به دست آمده‌اند.

در مدل‌سازی مذکور در مقابل انفجار از دو روش کانوپ و اولر - لاگرانژ استفاده

جدول ۴. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی شبیه‌سازی بتن پارچه‌یی در مقیاس مزو و ماکرو و نتایج آزمایشگاهی.

بتن پارچه‌یی	خمش			
	گسیختگی	بیشینه‌ی مدول	مدول یانگ	کرش در اولین جابه‌جایی
	مدول یانگ	مدول یانگ	مدول یانگ	ترک (درصد)
خمش جهت تار پارچه	۰/۰۹ ± ۰/۰۲	۰/۹۶ ± ۰/۲۴	۲/۴۰ ± ۰/۲۶	۲/۳۹ ± ۰/۲۷
خمش در جهت پود پارچه	۰/۱۰ ± ۰/۰۱	۱/۰۶ ± ۰/۰۶	۲/۱۵ ± ۰/۰۹	۲/۱۰ ± ۰/۰۳
بعد از خمش در جهت تار پارچه	۱/۷۲ ± ۰/۲۳	۱۷/۸۹ ± ۲/۳۹	۵۰/۸۶ ± ۰/۹۹	۲/۹۸ ± ۰/۳۹
بعد از خمش در جهت پود پارچه	۱/۷۹ ± ۰/۱۹	۱۸/۴۷ ± ۱/۹۴	۴۲/۸۶ ± ۴/۶۱	۲/۴۰ ± ۰/۲۲



شکل ۱۱. نمای سه‌بعدی تور فاصله‌دهنده و پل قرارگرفته جهت محافظت از سازه‌ی حساس.

مورد انتظار را دارد و می‌تواند جهت محافظت از سازه به کار رود. بنابراین جهت محافظت از سازه با پل پیشنهادی در پژوهش حاضر، برای خرج بیشینه‌ی ۳ کیلوگرم TNT، ایجاد فاصله‌ی گریز به اندازه‌ی دست‌کم ۱ متر لازم است. در جدول ۴ نتایج نیرو - جابه‌جایی شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه گردیده است.

۶. روش پیشنهادی جهت حفاظت از ابنیه و تأسیسات در برابر اصابت پرتابه‌های انفجاری

هدف از پژوهش حاضر، محافظت از ابنیه و تأسیسات در برابر تهدیدهای ناشی از اصابت پرتابه‌های انفجاری مانند راکت است. نتایج آزمایش‌های انفجار نشان داد که پل معرفی شده در پژوهش حاضر، انرژی موج فشاری ناشی از انفجار سه کیلوگرم TNT (۱۴۵۶ psi) را که در فاصله‌ی ۱ متری از آن قرار داشته کاملاً جذب کرده است ($Z = 0/7 \text{ m/kg}^{1/3}$). با توجه به اینکه در انفجار آزاد، آسیب وارد شده به پل فقط به فشار موج انفجار بستگی دارد، که آن نیز براساس پارامتر فاصله‌ی مقیاس شده ($Z = R/W^{1/3}$) محاسبه می‌شود؛^[۶۸] بنابراین، در صورت تهدیدهای بزرگ‌تر یعنی افزایش جرم خرج پرتابه (W)، کافی است فاصله‌ی (R) طوری افزایش پیدا کند که فاصله‌ی مقیاس شده برابر ($0/7 \text{ m/kg}^{1/3}$) شود. به عنوان مثال، در صورتی که خرج پرتابه ۴ کیلوگرم TNT باشد، باید فاصله‌ی (R) برابر ۱/۰۵ متر اتخاذ شود، که در نتیجه، فاصله‌ی مقیاس شده (Z) برابر ($0/7 \text{ m/kg}^{1/3}$) می‌شود، در این صورت فشار انفجار ناشی از آن روی پل برابر ۱۴۵۶ psi خواهد شد، تا پل پیشنهادی در پژوهش حاضر بتواند این موج انفجار را جذب کند. این فاصله (R) به وسیله‌ی تور تعبیه شده در بالای پل تأمین می‌شود. در شکل ۱۱، به صورت شماتیک پل و تور فاصله‌دهنده‌ی بالای آن جهت محافظت از سازه‌ی حساس موجود مشاهده

فشار انفجار نسبتاً کمتر مطابق آزمایش‌های عملی، نتیجه‌ی خوبی برآورد شده است، که یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی شده، پارامتر آسیب است. پارامتر آسیب جهت بیان ظرفیت بتن برای تحمل بارگذاری‌های متعارف مانند فشار موج انفجار بیان می‌شود. آسیب را به طور کلی می‌توان به عنوان نسبت مساحت تخریب شده به مساحت سالم دال تعریف کرد، که همواره عددی بین ۰ و ۱ خواهد بود (رابطه‌ی ۹):

$$DI = 1 - \frac{PR}{p_0} \quad (9)$$

که در آن، P ظرفیت باربری اولیه و PR ظرفیت باربری باقی‌مانده در دال بتن هستند. سطوح مختلف آسیب می‌تواند به این صورت تعریف شود که المان‌های با $DI = 0/2 \sim 0/5$ ، دارای سطح آسیب کم؛ المان‌های با $DI = 0/5 \sim 0/8$ ، دارای سطح آسیب متوسط و المان‌های با $DI = 0/8 \sim 1$ ، ظرفیت باربری آسیب زیاد هستند و در نهایت، المان‌هایی با $DI = 0/8 \sim 1$ ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهند و به عبارتی فرو می‌ریزند. در ادامه، نتایج مدل‌سازی قابل مشاهده است.

در آزمایش ۱ شکل ۱۰ الف و ب، به دلیل تماسی بودن انفجار، پل به کلی تخریب و شک و وجه تحتانی نیز منتقل شده است. در این سناریو اگرچه خسارت کلی نسبت به سناریوی دوم محدودتر بوده است، ولی با توجه به تماسی بودن انفجار، خسارت موضعی تا وجه تحتانی پل ادامه یافته و با توجه به کاتوره‌های تنش که مقادیر بیشتری را نسبت به دیگر سناریوها نشان می‌دهند، شک منتقل شده نیز نسبت به سایر سناریوها شدیدتر بوده است. در آزمایش ۲ شکل ۱۰ پ و ج، با توجه به این‌که فاصله‌ی گریز $0/2$ متر نسبت به حالت تماسی بیشتر بوده است، کره شکل‌گرفته از انفجار بزرگ‌تر شده و موج، روی سطح بزرگ‌تری از پل اثر کرده است، که به دلیل خارج شدن انفجار از حالت موضعی، به خصوص در مورد وجه تحتانی است. با توجه به اینکه نقش پل در روش پیشنهادی پژوهش حاضر فقط فداشونده است، در این حالت نیز پل ظرفیت خود را از دست می‌دهد و به عبارتی، فرو می‌ریزد، اما نسبت به حالت آزمایش ۱، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

لکن با توجه به ایجاد حفره‌ی تحتانی، از این سناریو نیز نمی‌توان به عنوان یک لایه فداشونده‌ی مطمئن جهت حفاظت از سازه استفاده کرد. در آزمایش سوم شکل ۱۰ ج و خ، شعاع تخریب بسیار کمتر بوده است. در این سناریو، اگرچه لایه‌ی زیرین پل دارای سطحی از آسیب است و بررسی تنش‌ها نشان می‌دهند که بخشی از سطح، وارد ناحیه‌ی خمیری نیز شده است، از آنجایی که پل مورد نظر در واقع نقش فداشونده برای محافظت از سازه‌ی اصلی را دارد و عدم تخریب کامل مصالح نشان می‌دهد که شک عبوری متوقف شده است، در این حالت پل مذکور کاربری

جدول ۵. شعاع تخریب و آسیب کششی وارد بر لایه‌ی زیرین پنل در آزمایش‌های ۱ الی ۳.

شماره‌ی آزمایش	شعاع تخریب (سانتی‌متر)	آسیب کششی
۱	تخریب	۱
۲	۱۲	۰/۸
۳	۳	۰/۷۱

می‌شود. در جدول ۵ نیز شعاع تخریب و آسیب کششی لایه زیرین بتن پارچه‌یی در سه آزمایش انجام شده مشاهده می‌کنید.

۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با توجه به آزمایش‌های اولیه و بررسی‌های انجام شده جهت محافظت از ساختمان‌های حساس در مقابل تهدیدها، پنبلی جهت کاربرد به عنوان پوشش سقف پیشنهاد شده است. رفتار پنبل پیشنهادی (متشکل از دو لایه بتن پارچه‌یی به عنوان پوسته و یک لایه پوکه‌ی صنعتی به عنوان هسته) تحت تأثیر موج فشاری ناشی از انفجار ۳ کیلوگرم TNT در حالت تماسی و آزاد (فواصل دور و نزدیک) به صورت میدانی آزمایش شده است.

سیس در مرحله‌ی بعد، آزمایش‌های مورد نظر در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج مدل‌سازی، تطابق مناسبی با آزمایش‌های میدانی داشته‌اند.

آزمایش‌های انفجار در فواصل (متغیر تخریب برای پنبل) ۰/۵۳ و ۰/۲ متری به ترتیب تخریب‌های زیاد و متوسط برآورد شده است. اما در فاصله‌ی ۱ متری، پنبل پیشنهادی، موج انفجار را کاملاً جذب کرده و دچار آسیب شده است. در آزمایش میدانی انفجار تماسی، پنبل به کلی نابود شد و بنابراین، سناریوی مناسبی جهت محافظت از سازه‌ی اصلی نبوده است. در آزمایش میدانی انفجار آزاد در فاصله‌ی نزدیک $z \geq 0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ ، با توجه به این‌که فشار انفجار در طول پنبل بسیار متغیر و زیاد بوده و همچنین بیشتر به صورت محلی به پنبل فشار وارد شده است، در این حالت نیز پنبل تخریب و به سازه‌ی حساس زیر آن آسیب وارد شده است. اما در آزمایش میدانی انفجار در فواصل دورتر $z \leq 0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ ، به دلیل بزرگ‌تر شدن محل اثر انفجار و کمتر شدن فشار انفجار در فواصل ذکر شده، پنبل پیشنهادی کاملاً انرژی ناشی از انفجار را جذب کرده و همچنین سازه‌ی حساس زیر آن دچار آسیب نشده است.

در انفجار تماسی، رفتار سازه قابل مدل‌سازی دقیق نیست و مسائلی از قبیل برخورد و نفوذ، برش مستقیم و پدیده‌ی کشش ناشی از انتشار موج در میزان آسیب تأثیرگذار هستند. بنابراین از آنجایی که فشار ناشی از انفجار با توان سوم فاصله نسبت عکس دارد، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها جهت کمینه‌سازی آسیب وارد بر پنبل، افزایش فاصله‌ی انفجار (R) است.

در پژوهش حاضر روشی ارائه شده است که با استفاده از یک تورکه در فاصله‌ی (R) در پنبل پیشنهادی بر روی سازه‌های حساس تعبیه شده است. از سازه‌ی مذکور در برابر تهدیدهای انفجاری که عمدتاً توسط پهپادها و راکت‌اندازها صورت می‌گیرد، محافظت می‌کند.

پانویس‌ها

1. Zhang
2. Muszynski & Purcell
3. Silva & Lu
4. Lan
5. Schenker
6. Xie
7. Homae
8. Rutner & Wright
9. Nurick & Martin
10. Rajendran & Lee
11. Jacob
12. Xue & Hutchinson
13. Mori
14. Valdevit
15. Jing
16. Brode
17. Textile Reinforced Concrete
18. Concrete Damage Plasticity
19. Zukri

منابع (References)

1. Gholi por, R. and Izadi fard, R., 2011. Investigation of flexural behavior of reinforced concrete beams (against explosive loading) Real scale test (FRP reinforced with master thesis). Master Thesis, Malek Ashtar University of Technology [In Persian].
2. Zhang, B., Masmoudi, R. and Benmokrane, B., 2004. Behavior of one-way concrete slabs reinforced with CFRP grid reinforcements. *Constr. Build. Mater*, 18(8), pp.625-635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.007>.
3. Mosalam, Kh.M. and Mosallam, A.S., 2001. Nonlinear transient analysis of reinforced concrete slabs subjected to blast loading and retrofitted with CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 32(8), pp.623-636. DOI:10.1016/S1359-8368(01)00044-0.
4. Zhang, G., Kishi, N., Mikami, H. and et al., 2007. Experimental parameter study on shear load carrying capacity

- of RC beams reinforced with AFRP sheets in shear. *J. Struct. Eng.*, 53, pp.1040-1049
5. Muszynski, L.C. and Purcell, M.R., 2003. Composite reinforcement to strengthen existing concrete structures against air blast. *J. Compos. Constr.*, 7(2), pp.93-97. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:2(93).
 6. Silva, P.F. and Lu, B., 2009. Blast resistance capacity of reinforced concrete slab. *J. Struct. Eng.*, 135(6), pp.708-716. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000011).
 7. Silva, P.F. and Lu, B., 2007. Improving the blast resistance capacity of RC slab with innovative composite materials. *Compos. Part B-Eng.*, 38(5.6), pp.523-534. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.06.015>.
 8. Lan, Sh., Lok, T.-S. and Heng, L., 2005. Composite structural panels subjected to explosive loading. *Constr. Build. Mater.*, 19(5), pp.387-395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.021>.
 9. Schenker, A., Anteby, L., Gal, E. and et al., 2008. Full scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. *Int. J. Impact Eng.*, 35(3), pp.184-198. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2006.12.008.
 10. Farhadi, K., Afkar, A. and Kamari, M.N., 2015. Numerical simulation of metallic honeycomb sandwich panel structures under dynamic loads. *J. Mater. Environ. Sci.*, 6(7), pp.2013-2020.
 11. Tomte, A., 2015. Energy absorption and damage prevention in a submerged floating tunnel during internal blast loading. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
 12. Zhou, H., Wang, Y., Wang, X. and et al., 2015. Energy absorption of graded foam subjected to blast: A theoretical approach. *Mater. Design*, 84, pp.351-358. DOI:10.1016/j.matdes.2015.06.124.
 13. Xie, B., Tang, L., Liu, Y. and et al., 2014. Research on the energy absorption properties of aluminum foam composite panels with enhanced ribs subjected to uniform distributed loading. *J. Sandwich Struc. Mater.*, 17(2), pp.1-13. <https://doi.org/10.1177/1099636214555046>.
 14. Homae, T., Sugiyama, Y., Wakabayashi, K. and et al., 2016. Water and sand for blast pressure mitigation around a subsurface magazine. *Sci. Tech. Energetic Mater.*, 77(1), pp. 18-21.
 15. Rutner, M.P. and Wright, J.P., 2016. Duality of energy absorption and inertial effects: Optimized structural design for blast loading. *Int. J. Protective Struct.*, 7(1), pp.18-44. DOI:10.1177/2041419615622726.
 16. Gilkie, R.C. and Sundararaj, P., 1971. The impact resistance of plastics sandwich constructions using low density urethane foam cores. *J. Cell. Plast.*, 7(6), pp.313-318. <https://doi.org/10.1177/0021955X7100700605>.
 17. Nayak, S.K., 2010. Optimization of honeycomb core sandwich panel to mitigate the effects of air blast loading. MS. Thesis, The Pennsylvania State University.
 18. Nurick, G.N. and Martin, J.B., 1989. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review part II: Experimental studies. *Int. J. Impact. Eng.*, 8(2), pp.171-186. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(89\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(89)90015-8).
 19. Nurick, G.N. and Martin, J.B., 1989. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading-a review: Part i: Theoretical considerations. *Int. J. Impact. Eng.*, 8(2), pp.159-170. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(89\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0734-743X(89)90014-6).
 20. Rajendran, R. and Lee, J.M., 2009. Blast loaded plates. *Mar. Struct.*, 22(2), pp.99-127. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2008.04.001>.
 21. Jacob, N., Yuen, S.C.K., Nurick, G. and et al., 2004. Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads-experiments and predictions. *Int. J. Impact. Eng.*, 30(8.9), pp.1179-1208. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2004.03.012.
 22. Xue, Z. and Hutchinson, J.W., 2003. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads. *Int. J. Mech. Sci.*, 45(4), pp. 687-705. DOI:10.1016/S0020-7403(03)00108-5.
 23. Mori, L.F., Queheillalt, D.T., Wadley, H.N.G. and et al., 2009. Deformation and failure modes of I-core sandwich structures subjected to underwater impulsive loads. *Exp. Mech.*, 49, pp. 257-275. DOI:10.1007/s11340-008-9166-9.
 24. Valdevit, L., Wei, Z., Mercer, C. and et al., 2006. Structural performance of near-optimal sandwich panels with corrugated cores. *Int. J. Solids. Struct.*, 43(16), pp.4888-4905. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2005.06.073.
 25. Jing, L., Yang, F., Wang, Z. and Zhao, L., 2013. A numerical simulation of metallic cylindrical sandwich shells subjected to air Blast loading. *Lat. Am. J. Solids Stru.*, 10(3), pp.631-645. DOI:10.1590/S1679-78252013000300010.
 26. Vatani Oskoue, A. and Kiakojouri, F., 2015. Non-linear dynamic analysis of steel hollow I-core sandwich panel under air blast loading. *Civil. Eng. Civil. Infr.*, 48(2.2), pp.323-344. DOI:10.7508/cej.2015.02.008.
 27. Peyman, S. and Ghazanfarinia, S., 2007. Defence and security structures. *MAUT Press*, [In Persian].
 28. Soleimani, S.M., Ghareeb, N.H. and Shaker, N.H., 2018. Modeling, simulation and optimization of steel sandwich panels under blast loading. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(3), pp.1130-1140. DOI:10.3844/ajeassp.2018.1130.1140.
 29. Sabzevari, S. and Shahabian, F., 2018. Optimum selection of corrugated sandwich panels shape and materials subjected to blast loading. *J. of Structural and Construction Engineering*, 5.2(17), pp.39-52 [In Persian]. DOI:10.22065/jsce.2018.126299.1531.
 30. Han, F., Chen, H., Jiang, K. and et al., 2014. Influences of geometric patterns of 3D spacer fabric on tensile behavior of concrete canvas. *Construction and Building Materials*, 65, pp.620-629. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.041.

31. Hegger, J. and Voss, S., 2008. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures*, 30(7), pp.2050-2056. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.006>.
32. Peyman, S. and Ghazanfarinia, S., 2007. Defence and security structures. pp.25-149. [In Persian].
33. Bulson, Ph.S., 1997. *Explosive Loading of Engineering Structures*, (1st ed). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203473863>. CRC Press.
34. Brode, H.L., 1995. Numerical solutions of spherical blast waves. *Journal of Applied Physics*, 26(6), pp.766-775. <https://doi.org/10.1063/1.1722085>.
35. Fayyaz, M. and Ghorban Nejad, A. and Khosravi, F., 2019. Numerical investigation of damages on concrete canvas shell under near-field blast. *Scientific J. of Advanced Defence Science Technology*, 10(1), pp.79-87. [In Persian].
36. Shokrchi, M., Emdadi, A. and Ghali Leyber, N., 1999. Lightweight concrete, knowledge, technology, applications. University of Tehran Press, [In Persian].
37. Neville, A.M. and Brooks, J.J., 1987. Concrete technology. *England, Longman Scientific & Technical*, p.438.
38. Clarke, J.L., 2005. *Structural Lightweight Aggregate Concrete/John L. Clarke*. Glasgow, UK: Blackie Academic & Professional, an Imprint of Chapman & Hall.
39. Shafigh, P., Hassanpour, M., Razavi, V. and et al., 2011. An investigation of the flexural behaviour of reinforced lightweight concrete beams. *International Journal of Physical Sciences*, 6(10), pp.2414-2421. [In Persian].
40. Fathollah, S. and Shafigh., P., 2012. High-strength lightweight concrete using leca, silica fume, and limestone. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(7), pp.1885-1893. DOI:10.1007/s13369-0285-3 [In Persian].
41. Johansson, L., 1997. The use of LECA (light expanded clay aggregates) for the removal of phosphorus from wastewater. *Water Science and Technology*, 35(5), pp.87-93. DOI:10.1016/S0273-1223(97)00056-5.
42. Lekang, O.I. and Kleppe, H., 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering*, 21(3), pp.181-199. DOI:10.1016/S0144-8609(99)00032-1.
43. Zhou, H., Shi, H., Lai, Zh. and et al., 2020. Migration and phase change study of leaking molten salt in tank foundation material. *Applied Thermal Engineering*, 170, p.114968. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.114968.
44. Zhou, H., Shi, H., Zhu, Y. and et al., 2020. "An experimental investigation of temperature distribution and heat loss in molten salt tanks in concentrating solar power plants. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(1), p.14101. <https://doi.org/10.1063/1.5131071>.
45. Zhou, H., Shi, H., Zhu, Y. and et al., 2020. An experimental investigation of temperature distribution and heat loss in molten salt tanks in concentrating solar power plants. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(1), p.14101. <https://doi.org/10.1063/1.5131071>.
46. Rocas-Alonso, E.A., González-Galindo, J. and Estaire, J., 2021. Experimental study on grain failure of lightweight expanded clay aggregate under uniaxial and biaxial load conditions. *Powder Technology*, 383, pp.542-553. DOI:10.1016/j.powtec.2021.01.052.
47. Koohmishi, M. and Palassi, M., 2016. Evaluation of the strength of railway ballast using point load test for various size fractions and particle shapes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), pp.2655-2664. DOI:10.1007/s00603-016-0914-3.
48. Manso, J., Marcelino, J. and Caldeira, L., 2021. Single-particle crushing strength under different relative humidity conditions. *Acta Geotechnica*, 16(3), pp.749-761. DOI:10.1007/s11440-020-01065-w.
49. Gundepudi, M.K., Sankar, B.V., Mecholsky, J.J. and et al., 1997. Stress analysis of brittle spheres under multiaxial loading. *Powder Technology*, 94(2), pp.153-161. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(97\)03307-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(97)03307-X).
50. Salami, Y., Dano, Ch., Hicher, P.Y. and et al., 2015. The effects of the coordination on the fragmentation of a single grain. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 26(1), p.012015. DOI:10.1088/1755-1315/26/1/012015.
51. Todisco, M.C., Wang, W., Coop, M.R. and et al., 2017. Multiple contact compression tests on sand particles. *Soils and Foundations*, 57(1), pp.126-140. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.009>.
52. Zhang, Y., 2018. Comportement mécanique du matériau granulaire en tenant compte de la rupture des particules. PhD Diss, Universit de Lorraine.
53. Hegger, J. and Voss, S., 2008. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures*, 30(7), pp.2050-2056. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.006>.
54. Colombo, I.G., Magri, A., Zani, G. and et al., 2013. Erratum to: Textile reinforced concrete: Experimental investigation on design parameters. *Materials and Structures*, 46(11), pp.1953-1971.
55. Peled, A., Cohen, Z., Pasder, Y. and et al., 2008. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. *Cement and Concrete Composites*, 30(3), pp.174-183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.001>.
56. Peled, A., 2011. Strain hardening behavior of textile reinforced concrete (TRC). In *Proc. of the SHCC2-Rio Conference*, pp.45-52.
57. Hartig, J., Häußler-Combe, U. and Schicktanz, K., 2008. Influence of bond properties on the tensile behaviour of textile reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), pp.898-906. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2008.08.004.
58. Fayyaz, M., Ghorban Nejad, A. and Khosravi, F., 2019. Numerical investigation of damages on concrete canvas

- shell under near-field blast. *Journal of Advanced Defense Science and Technology*, 10(1), pp.79-87. [In Persian].
59. Han, F., Chen, H., Jiang, K. and et al., 2014. Influences of geometric patterns of 3D spacer fabric on tensile behavior of concrete canvas. *Construction and Building Materials*, 65, pp.620-629. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.041.
 60. Fayyaz, O., Ghorban Nejad, A. and Khosravi, F., 2019. Numerical investigation of damages on concrete canvas shell under near-field blast. *Journal of Advanced Defense Science and Technology*, 10(1), pp.79-87. [In Persian].
 61. Ai, H.A. and Ahrens, T.J., 2006. Simulation of dynamic response of granite: A numerical approach of shock-induced damage beneath impact craters. *International Journal of Impact Engineering*, 33(1.12), pp.1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.09.046>.
 62. ics of explosion and its use elsevier. Henrych, J., 1979. The dynam
 63. Zhang, F., Chen, H., Li, X. and et al., 2017. Experimental study of the mechanical behavior of FRP-reinforced concrete canvas panels. *Composite Structures*, 176, pp.608-616. DOI:10.1016/j.compstruct.2017.05.072.
 64. Zukri, A., Nazir, R., Mat Said, Kh.N. and et al., 2018. Physical and mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA). In *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 250, p.01016.
 65. Caldeira, L.M.M.S. and das Neves, E.M., 2015. Mechanical characterization of lightweight expanded clay aggregate materials for modeling their geotechnical behavior. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), p.04015027. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001286.
 66. Zukri, A., 2021. Settlement analysis of treated soft clay using LECA replacement through numerical modelling. *Construction*, 1(2), pp.76-84. <https://doi.org/10.15282/construction.v1i2.6614>.
 67. Systèmes, Dassault., 2008. ABAQUS: User manual, Retrieved from <http://130.149.89.49:2080/v6.11/books/usb/default.htm?startat=pt05ch23s04abm48.h tml>.
 68. UFC regulations.