

## (گزارش فنی)

## طراحی و شبیه‌سازی دیوار تقویت شده با سپر بتنی انبار مواد منفجره در برابر بارگذاری انفجار

امیررضا خدابخش<sup>۱</sup>، محمد تاجی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: تیر ۱۳۹۶، پذیرش: آبان ۱۳۹۸)

## چکیده

حملات تروریستی با آسیب رساندن به سازه‌ها و زیرساخت‌های یک کشور می‌تواند صدمات مالی و جانی زیادی را نیز به بار آورد؛ بنابراین توجه به موضوع پدافند غیرعامل در ساخت سازه‌ها و همچنین طراحی و کنترل این سازه‌ها باید مدنظر قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های کشور معادن هستند. در معادن، حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین محل در حملات تروریستی انبارهای نگهداری مواد منفجره و چاشنی‌ها و فتیله‌های انفجاری هستند. در این پژوهش انبار نگهداری چاشنی‌های الکتریکی با ابعاد ۶/۵ در ۳/۵ متر ابتدا در ETABS طراحی و سپس برای بررسی رفتار و میزان مقابله این دیوار در برابر بار انفجاری، از برنامه اجزای محدود ABAQUS استفاده شد. دیوار برشی U شکل، با طول و ارتفاع سه متری انتخاب گردید. دیوار برشی در چهار حالت: بدون سپر و همراه با سپر محافظ ۸، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری، برای مقابله با بارهای انفجاری بررسی شد. بارهای انفجاری در سه فاصله ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از مرکز سپر قرار داده شد. مشخص گردید که وجود سپر محافظ بتنی می‌تواند به شدت میزان جابجایی دیوار برشی را تا ۹۷/۴ درصد، میزان تنش دیوار برشی را تا ۵۶/۴ درصد و میزان تنش پای ستون را تا ۳۶/۷ درصد کاهش دهد و از دیوار در برابر بارهای انفجاری محافظت نماید. نتیجه بررسی نشان داد ترکیب دیوار برشی بتنی به همراه سپر محافظ، سازه مناسبی برای نگهداری مواد منفجره و چاشنی‌های انفجاری معادن خواهد بود.

## کلمات کلیدی

انبار مواد منفجره، بارگذاری انفجار، دیوار برشی، سپر محافظ بتنی، نرم‌افزار ABAQUS

\*عهده‌دار مکاتبات: Mohammadtaji@yahoo.com

## ۱- مقدمه

بتن ماده‌ای است که در صنعت ساخت و ساز به وفور از آن استفاده می‌شود و می‌توان این ماده را در ساخت سازه‌های شهری و نظامی به کار برد. حملات تروریستی در سالیان اخیر خسارات جانی و مالی زیادی را به بار آورده است. برخی ساختمان‌ها مانند فضاهای درمانی، بهداشتی، خدماتی، صنعتی و ... به دلیل نقش مهمی که در شرایط بحرانی دارند، از ارزش دوچندانی برخوردار هستند. یکی از مهم‌ترین سازه‌ها که در صورت مواجهه با این نوع حملات بسیار آسیب‌پذیر است، انبارهای نگهداری چاشنی‌ها و مواد آتشباری معدن است. در کشور حدوداً ۹۶۰ انبار نگهداری مواد منفجره مربوط به معدن و ۱۰۷۰ انبار نگهداری مواد منفجره برای پروژه‌های عمرانی از قبیل پروژه‌های سدسازی وزارت نیرو، پروژه‌های لرزه‌نگاری وزارت نفت و پروژه‌های تونلسازی و راه‌سازی وزارت راه و شهرسازی وجود دارد. از این رو لزوم طراحی سازه‌های انبار مربوط به نگهداری مواد منفجره و چاشنی آنها به شدت باید مورد توجه و باز طراحی جهت تأمین اصول پدافند غیرعامل قرار گیرد تا در شرایط اضطرار و بحران معدن کشور ایمن و محفوظ گردند. بتن در اثر انفجار دچار ترک‌خوردگی و شکست می‌شود و در نتیجه باعث فروپاشی پیش‌رونده در کل سازه می‌گردد. برای جلوگیری از آسیب بتن در اثر انفجار، روش‌های مختلف پیشنهاد و تحقیق شده است که از جمله آن می‌توان به تقویت با صفحات فولادی 0، تقویت با کامپوزیت‌های پلیمری [۲،۳]، استفاده از الیاف برای مسلح کردن بتن [۴-۶]، استفاده از اسپری و رنگ‌های پلیمری [۷،۸] و همچنین استفاده از لایه‌های مختلف در میان پنل‌های بتنی 0 اشاره کرد. برای تقویت دیوارهای بتنی تحقیقات و پیشنهادهای مختلفی ارائه شد که بتوان به کمک این تکنیک‌ها دیوارهای بتنی را در برابر انفجار مقاوم کرد. از جمله این را پژوهش‌ها، تقویت دیوار برشی بتنی با ورق‌های فولادی بود که توسط رفیعی و همکارانش در سال ۲۰۱۳ و در دانشگاه ترنادهو کانادا انجام شد 0. راهکار پیشنهادی دیگر برای تقویت دیوارهای بتنی، استفاده از فیبر برای تقویت دیوار بود. این پژوهش در سال ۲۰۱۴ توسط پانتلیدس انجام گرفت که تحت عنوان «پنل بتن‌آرمه و پنل بتن‌آرمه همراه با فیبر در معرض انفجار و

آزمون استاتیکی پس از انفجار» بود [۱۱]. پنل‌های تقویت شده با الیاف بهترین عملکرد را در بین دیوارهای بتنی مدل آزمایشگاهی ایشان داشتند. برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر انفجار بر سازه و المان‌های سازه‌ای که در سالیان اخیر بدان پرداخته شده است در جدول ۱ به نمایش درآمده است.

یکی از بهترین و در عین حال کم هزینه‌ترین روش‌ها برای تحلیل سازه‌های تحت اثر انفجار و مشاهده رفتار المان‌های این نوع سازه‌ها، استفاده از روش دینامیکی صریح در نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند آباکوس است، لذا در این پژوهش سعی بر آن شد که بتوان با استفاده از روش ذکر شده، دقیق‌ترین نوع تحلیل برای دیوارهای بتنی ساختمان‌های نگهداری مواد منفجره در برابر انفجار را مدلسازی و تحلیل کرد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از رفتار سپر محافظ تانک‌ها در برابر انفجار، ایده سپر محافظ بتنی برای المان دیوار برشی U شکل جهت استفاده در انبارهای نگهداری چاشنی‌های انفجاری معدن پیشنهاد و طراحی گردید. بدین منظور از پنل‌های دیوار برشی به همراه یک لایه بتن مسلح به عنوان سپر محافظ در قسمت جلوی دیوار استفاده شد. سپر محافظ با جذب انرژی انفجار از تخریب دیوار برشی بتنی جلوگیری می‌کند و باعث می‌شود ساختمان در شرایط سرویس باقی بماند. مشخصات دیوار بتنی شامل: ۱- طول دهانه (آکس به آکس ستون کناری) به اندازه ۳ متر، ۲- ارتفاع به اندازه ۳ متر، ۳- سپر بتنی برای جلوگیری از تغییرات مرکز سختی در راستای مهاربندی دیوار برشی دارای حرکت آزاد است. برای طراحی دیوار برشی از آیین‌نامه‌های ایران و نرم‌افزار ETABS استفاده شد. پارامترهایی مانند شکل هندسی، بارگذاری استاتیکی و زلزله و وزن المان توسط نرم‌افزار محاسبه و تعیین شد. در این مدلسازی دیوار برشی U شکل، مرحله اول بدون سپر و مراحل بعد با سپر به ضخامت‌های ۸، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر در برابر بارهای مختلف انفجاری بررسی شد. بارهای انفجاری از نوع TNT و در مقادیر مختلف و در فواصل ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از مرکز رویه سپرها شبیه‌سازی گردید. حد نهایی جابجایی سپر به میزان ۱۵ سانتی‌متر محدود شد. بیش‌ترین میزان بارهای انفجاری که در هر فاصله توانستند سپر محافظ را تا حد ۱۵ سانتی‌متر جابجا کنند، استخراج گشت و این بارها به مدل بدون سپر در هر فاصله نیز تخصیص داده شدند. برای شبیه‌سازی

رفتار دیوار برشی و سپر بتنی تحت بارگذاری انفجاری، از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده شده است. جدول ۱: برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه اثر انفجار بر سازه و المان‌های سازه‌یابی

محقق	سال	نوع المان سازه			نوع پژوهش		نرم‌افزار				
		دیوار برشی	ستون	تیر	ساختمان	غیره	عددی	تجربی	ABAQUS	LS-DYNA	غیره
Akers, et al 0	۲۰۰۶	✓					✓				✓
Yusof, et al 0	۲۰۱۱					✓					
Elsanadedy, et al 0	۲۰۱۴				✓					✓	
Fatt & Sirivolu 0	۲۰۱۵					✓	✓				
Zhang, et al 0	۲۰۱۵			✓	✓					✓	
Štoller, et al 0	۲۰۱۵	✓					✓			✓	
Qing, et al 0	۲۰۱۵	✓					✓			✓	
Parisi, et al 0	۲۰۱۶					✓				✓	
Campidelli, et al 0	۲۰۱۶	✓					✓			✓	
Li, Jun, et al 0	۲۰۱۶	✓					✓				
Furqan, et al 0	۲۰۱۷	✓				✓				✓	
Dear, et al 0	۲۰۱۷	✓					✓			✓	
Gargano, et al 0	۲۰۱۷	✓					✓			✓	
Wang, Shen 0	۲۰۱۷					✓				✓	
Yu, Z. L, at al 0	۲۰۱۷					✓				✓	
Guo, Zhikun, et al 0	۲۰۱۷						✓			✓	
Ding, Yang, et al 0	۲۰۱۷			✓	✓					✓	
Ibrahim, Yasser, et al 0	۲۰۱۷			✓	✓					✓	
Li, Zhan, et al 0	۲۰۱۷	✓					✓			✓	
Markose & Rao 0	۲۰۱۷					✓				✓	
Arora, et al 0	۲۰۱۷	✓					✓			✓	

در پدیده انفجار، گازها با فشار بالا به صورت موج ضربه‌ای در اتمسفر گسترش می‌یابد. این ضربه که موج انفجار نامیده می‌شود بر اساس تابعی از حداکثر فشار (Ps) بیان می‌شود. رابطه‌های (۱) تا (۳) مربوط به محاسبه سرعت جبهه موج انفجار (Us)، چگالی هوا در پشت جبهه موج (ps) و فشار دینامیکی بیشینه (qs) عبارت‌اند از:

$$P_r = 2P_s + (\gamma + 1) * q_s \quad (1)$$

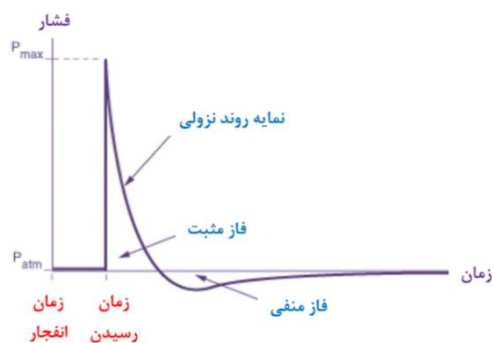
$$q_s = 1/2 \rho_s U_s^2 \quad (2)$$

$$U_s = \frac{a_0 P_s}{\gamma P_0} \left[ 1 + \left[ \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right] \frac{P_s}{P_0} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

در رابطه‌های (۱) تا (۳) فشار دینامیکی، چگالی هوا در پشت جبهه موج و  $U_s$  سرعت ذره پشت جبهه موج هستند. زاویه برخورد موج انفجار بر سطح سازه اگر صفر در نظر گرفته شود ( $\alpha_i = 0$ ) که در آن زاویه برخورد است) این رابطه‌ها را می‌توان استفاده نمود و در صورتی که زاویه برخورد انفجار بر سطح سازه را برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شود از لحاظ تئوری هیچ بازتابی وجود ندارد و سطح سازه با بیشینه بیش فشار بارگذاری می‌شود. مابین این دو

## ۲- مدل‌سازی

معادله حرکتی که در تشریح یک موج انفجار لازم است، به شکل ساده شده توسط پارامترهای جبهه موج انفجار اولین بار توسط رانکین و هاگونايت در مورد شوک‌های نرمال در گازهای ایده آل ارائه شد. انرژی شدیدی که از انفجار آغاز می‌شود، مواد منفجره را به گازی با دما و فشار بالا تبدیل می‌کند. نمودار فشار-زمان موج انفجاری در شکل ۱ به نمایش درآمده است.



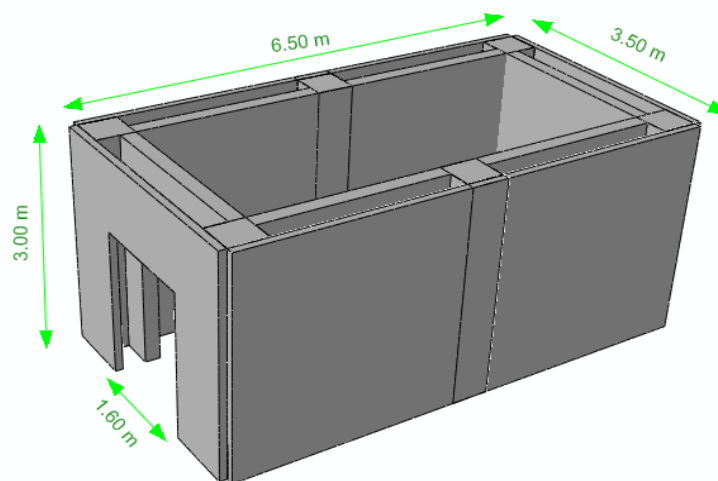
شکل ۱: نمودار فشار-زمان پدیده انفجار [۱۱]

انبار نگهداری چاشنی‌های الکتریکی، سیستم سازه در جهت محور X و Y دیوارهای برشی، شکل‌پذیری قاب خمشی بتنی و دیوارهای برشی متوسط و کلیه سقف‌ها از نوع دال بتنی هستند. شکل ۲ پلان ساختمان و دیوار برشی انتخابی جهت شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد. سپس بار وارد بر این دیوار نیز (بدون نیروی زلزله) برای وارد کردن در برنامه آباکوس استخراج شد. بار محوری به میزان ۳۷۱۵۷۶ نیوتن از ETABS استخراج گردید. در این پژوهش از سه ضخامت ۸، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر برای سپر محافظ استفاده شده که پلان مقطع آرماتور و ابعاد ضخامت‌های ۸ و ۱۵ سانتی‌متر همانند شکل ۳ است و فقط ضخامت آنها تفاوت دارد.

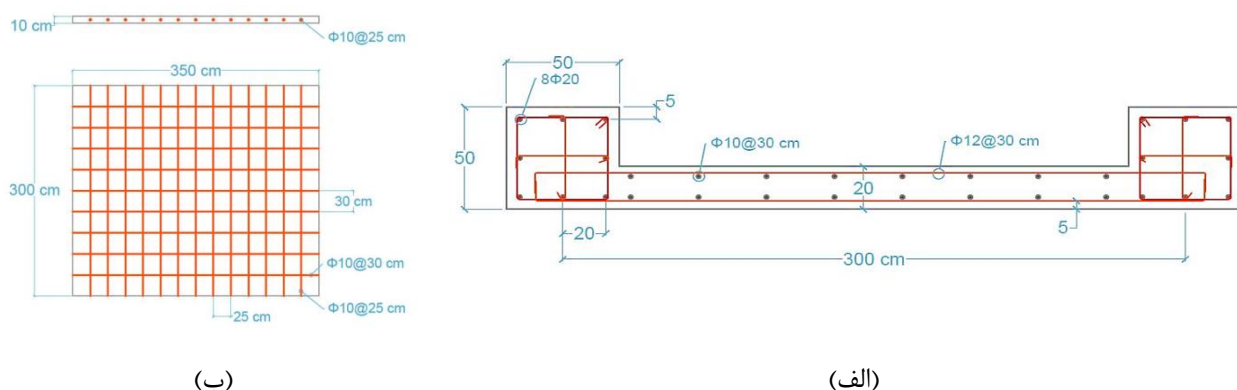
حد، بازتاب‌های ماخ اتفاق می‌افتد. موج اصابت شده و امواج منعکس شده تولید جبهه موج سومی می‌کند که آن را ستون ماخ می‌نامند. با افزایش فاصله از مرکز انفجار ارتفاع ستون ماخ افزایش می‌یابد [۱۱،۳۳].

## ۱-۲- طراحی و مدلسازی با نرم‌افزار

برای طراحی و کنترل مقطع دیوار برشی از نرم‌افزار ETABS استفاده گردید. بر این اساس یک انبار نگهداری چاشنی‌های انفجاری الکتریکی یک طبقه به طول ۶/۵ متر عرض ۳/۵ متر و ارتفاع خالص ۳ متر که در همه جهت‌ها از دیوار برشی بتنی استفاده شده است، جهت نگهداری خرج انفجاری معادن مدلسازی گردید. مشخصات ساختمان مورد تحلیل در ETABS شامل: ساختمان در خراسان شمالی،



شکل ۲: پلان ساختمان و دیوار هدف انتخابی برای شبیه‌سازی در ABAQUS



شکل ۳: (الف) ابعاد و آرماتورهای دیوار برشی مورد طراحی برای شبیه‌سازی در ABAQUS، (ب) پلان مقطع سپر محافظ ۱۰ سانتیمتری و نحوه آرایش آرماتورها

گردید ۰. برای معرفی ناحیه پلاستیک فولاد از داده‌های جدول ۲ استفاده گردید.

با توجه به فولاد مصرفی اس تی ۳۷، وزن مخصوص و مدول یانگ و ضریب پواسون فولاد به ترتیب برابر با ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۲۱۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ معرفی

برای مدلسازی بتن در ناحیه پلاستیک و بررسی تخریب از مدل خسارت (Concrete Damage Plasticity) استفاده شد. وزن مخصوص بتن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مدول یانگ بتن ۲۵ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۱۸ به برنامه آباکوس معرفی گردید. مشخصات مورد استفاده برای مدلسازی بتن در جدول ۳ ارائه شده است ۰.

جدول ۲: مقادیر رفتار ناحیه پلاستیک مصالح فولاد به ABAQUS

کرنش پلاستیک	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
۰	۳۰۰
۰/۰۲۵	۳۵۰
۰/۱	۳۷۵
۰/۲	۳۹۴
۰/۳۵	۴۰۰

جدول ۳: مقادیر تنش، کرنش و تخریب پلاستیک بتن در کشش و فشار

پارامتر تخریب در کشش	کرنش ترک خوردگی	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	پارامتر تخریب در فشار	کرنش غیر الاستیک	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)
۰/۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	۵/۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۷/۵
۰/۲۵	۰/۰۰۰۱۷۶	۵/۳۱	۰/۱۱۲	۰/۰۰۰۳۸	۲۵/۷
۰/۹۹	۰/۰۰۰۱۵۳۹	۰/۵۸	۰/۴۲۹	۰/۰۰۱۸۹	۳۴/۹
-	-	-	۰/۴۶۶	۰/۰۰۲۱۸	۳۵
-	-	-	۰/۷۰۱	۰/۰۰۴۵۶	۲۸

در هر فاصله به دست آمده و جهت مقایسه در مدل دیوار بدون سپر اعمال گردیدند.

مقدار اختلاف تنش حاصل شده در ناحیه پشت دیوار برشی تیپ U بین مدل‌های همراه با سپر و فاقد سپر این دیوارها در نمودار ۰ شکل ۴ آمده است. میزان درصد اختلاف این مدل از دیوارها نیز در جدول ۴ قابل مشاهده است.

نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که سپر محافظ توانسته به خوبی باعث کاهش میزان تنش پشت دیوار در اثر انفجار بر آن شود. با بررسی دقیق‌تر این میزان کاهش تنش در اثر وجود سپر محافظ از جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که تأثیر سپر در کاهش تنش دیوار در فواصل انفجاری دور (فواصل ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) بسیار بیشتر از تأثیر وجود سپرها در فواصل انفجاری نزدیک (که در این شبیه‌سازی ۱۰ سانتی‌متر است) بوده است.

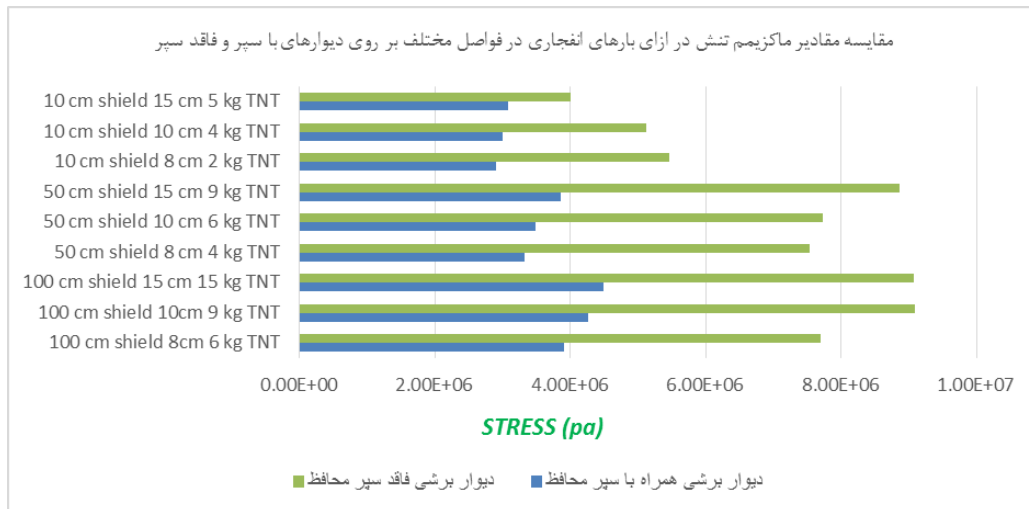
برای اینکه بتوان بررسی دقیق‌تری بر نحوه اعمال تنش بر روی دیوارهای فاقد سپر و همراه با سپر، در تیپ دیوارهای U شکل داشت، نمایشی از نحوه پخش تنش در دیوارهای همراه با سپر ۱۵ سانتی‌متری را بر اساس فواصل انفجاری مختلف در زمان ۱ میلی‌ثانیه، در شکل ۵ به تصویر درآمده است.

روش حل به صورت دینامیکی صریح در زمان ۰/۰۵ ثانیه در آباکوس تنظیم شد. بار انفجاری به صورت برخورد موجی در حالت CONWEP با خرج انفجاری TNT، معرفی گردید [۳۲، ۳۶]. فواصل انفجاری در فاصله ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری از مرکز سپر قرار گرفت.

بار فشاری بر روی وجه بالایی دیوار برشی به میزان ۱۴۸۶۰۳ نیوتن و همچنین نیروی جاذبه برای اعمال وزن مصالح به مدل وارد تخصیص داده شد. وجه پایینی دیوار برشی نیز به صورت گیردار تحت عنوان شرایط مرزی، معرفی گردید. آرماتورها به صورت مدفون در بتن وارد مدل گردیدند. در مش‌بندی از المان شش وجهی استفاده شد. در تعریف نوع المان‌ها، کتابخانه مش‌ها برحسب صریح و گروه مش‌ها برای مقاطع بتنی از دسته 3D Stress و برای آرماتورها از دسته Truss انتخاب گردید. کد معرفی مش‌ها برای آرماتورها T3D2 و برای مقاطع دیوار برشی و سپر بتنی C3D8R در آباکوس وارد گردید.

## ۲-۲- خروجی آنالیز برنامه ABAQUS

برای انتخاب بارهای انفجاری هر فاصله، ابتدا در مدل‌های دیوار برشی همراه با سپر بارهای انفجاری مختلف برحسب TNT اعمال گردید، تا مشخص گردد با چه میزان بار انفجاری سپر محافظ جابجایی تا حد ۱۵ سانتی‌متر (حد تحمل جابجایی بتن سپر) را خواهد داشت، سپس این بارها



شکل ۴: مقایسه بیشینه تنش در انفجار فواصل مختلف بر روی دیوارهای تیپ U با سپر و فاقد سپر محافظ

جدول ۴: میزان درصد اختلاف تنش پشت دیوار بین حالات دیوار U همراه با سپر و فاقد سپر

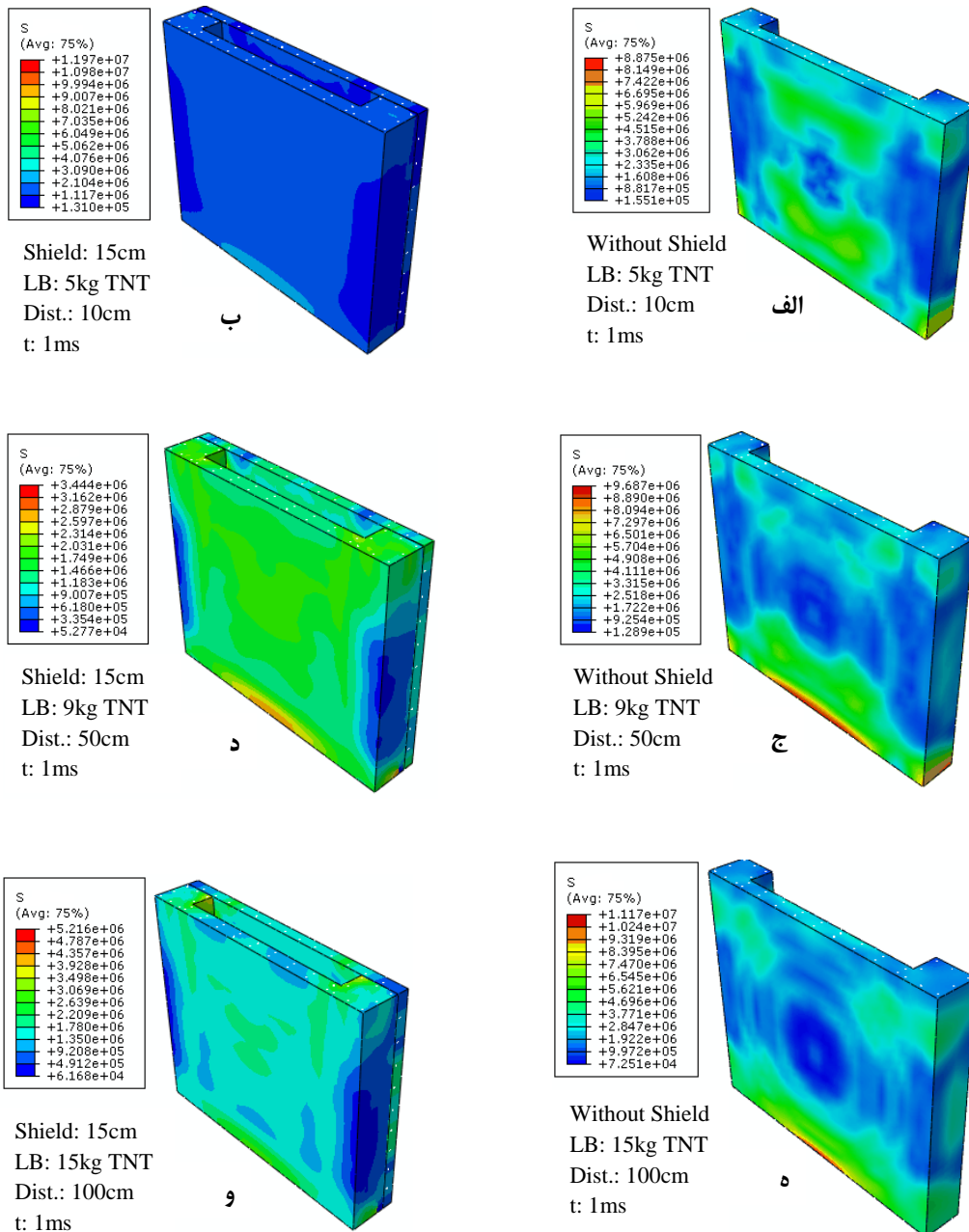
میزان درصد اختلاف تنش دیوار U شکل درازای وجود سپر نسبت به حالت بدون سپر	موقعیت و میزان بار اعمالی به هر سپر		
	فاصله انفجار (cm)	مقدار TNT (kg)	ضخامت سپر (cm)
کاهش ۴۹/۱٪	۱۰۰	۶	۸
کاهش ۵۳٪	۱۰۰	۹	۱۰
کاهش ۵۰/۴٪	۱۰۰	۱۵	۱۵
کاهش ۵۵/۹٪	۵۰	۴	۸
کاهش ۵۴/۸٪	۵۰	۶	۱۰
کاهش ۵۶/۴٪	۵۰	۹	۱۵
کاهش ۴۶/۸٪	۱۰	۲	۸
کاهش ۴۱/۲٪	۱۰	۴	۱۰
کاهش ۲۲/۹٪	۱۰	۵	۱۵

تنش را کاهش می‌دهد به نحوی که در انفجار ۱۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری ۶۵ درصد کاهش مقدار تنش در پای دیوار به دست آمده است.

نمودار مقایسه میزان جابجایی سطح پشتی دیوار تیپ U بین مدل‌های بدون سپر و همراه با سپر محافظ در شکل ۶ را مشاهده نمود. این نمودار به وضوح تأثیر سپر را در کاهش میزان جابجایی در مرکز دیوار برشی نشان می‌دهد. در فاصله انفجاری ۱۰۰ سانتی‌متری با سپرهای ۸، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر، کاهش به ترتیب ۱۲، ۱۶ و ۱۷ برابری میزان جابجایی دیوار حاصل شده است. این میزان کاهش جابجایی برای انفجار در فاصله ۵۰ سانتی‌متری در ازای ضخامت‌های نام‌برده شده به ترتیب ۱۶، ۲۲ و ۲۶ برابر و برای فاصله ۱۰ سانتی‌متری نیز به ترتیب ۱۴، ۲۷ و ۳۹ برابری بود.

با مقایسه بخش الف و ب شکل ۵ که متعلق به بار انفجاری ۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰ سانتی‌متر است، می‌توان دریافت که، طبق جدول، وجود سپر محافظ توانسته باعث کاهش ۲۲/۹ درصدی تنش در نقطه مرکز دیوار شود، ولی پخش تنشی که در کل دیوار بدون سپر اتفاق می‌افتد را تقریباً از بین می‌برد که این روند را در انفجار ۹ کیلوگرم TNT در فاصله ۵۰ سانتی‌متری نیز، عیناً قابل ملاحظه است و در قسمت ج و د شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

موضوع مهم دیگری که در بررسی شکل ۵ جلب توجه می‌کند آن است که در لحظه انفجار تنش زیادی در قسمت پایین دیوار برشی که در واقع اتصال دیوار برشی به پی سازه است، رخ می‌دهد که در قسمت ج و ه شکل ۵ مشخص است. وجود سپر محافظ به نحو چشمگیری این

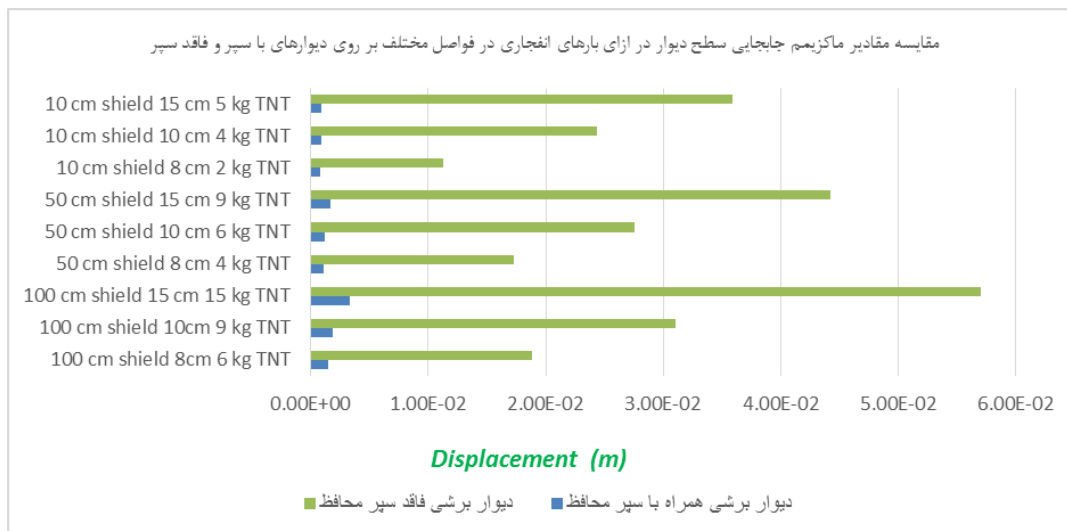


شکل ۵: نمایش خروجی برنامه ABAQUS از نحوه پخش تنش در سطح پشتی دیوارهای U شکل تحت بار انفجار

و ۱۰۰ سانتی‌متری و در زمان ۴۰ میلی‌ثانیه میزان جابجایی دیوار بررسی شده است.

از بررسی شکل ۷ مشاهده گردید که دیوار برشی U فاقد سپر در ازای انفجار ۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰ سانتی‌متری میزان حدوداً ۳/۵ سانتی‌متر جابجایی را در بالای خود تجربه کرد، ولی همین دیوار با سپر محافظ ۱۵ سانتی‌متری تنها ۲ میلی‌متر جابجایی در قسمت بالای دیوار داشت، یعنی وجود دیوار برشی برای این فاصله انفجاری باعث کاهش ۱۷/۵ برابری جابجایی گردید.

با بررسی نمایش تغییر شکل کلی مدل از خروجی برنامه آباکوس مشاهده گردید که جابجایی در قسمت بالای دیوار برشی (قسمت اتصال دیوار به تیر بالایی آن) بیشتر از ناحیه مرکز آن در مدل‌های بدون سپر اتفاق می‌افتد که وجود سپر در کاهش این جابجایی نیز به خوبی عمل می‌کند. این میزان جابجایی در قسمت بالای دیوار در انفجار فواصل دور بزرگ‌تر است. برای نمونه در شکل ۷ برای دو مدل دیوار U یک بار همراه با سپر ۱۵ سانتی‌متری و یک بار بدون سپر محافظ، درازای بارهای فواصل ۱۰، ۵۰



شکل ۶: مقایسه بیشینه جابجایی سطح دیوار U شکل درازای انفجار در فواصل مختلف بر روی دیوارهای با سپر و فاقد سپر

جدول ۵ مقادیر دقیق درصد اختلاف برای تنش پای ستون برای دو مدل دیوار برشی U همراه و فاقد سپر محافظ را ارائه می‌نماید. برای بررسی دقیق‌تر نحوه پخش تنش در پای ستون مشاهده گردید که وجود سپر محافظ در انفجار ۹ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از سپر محافظ ۱۰ سانتی‌متری، باعث افزایش تنش به میزان ۱۵/۸ درصد شد. چون تنش پای ستون در دیوار فوق در حالت همراه با سپر در زمان ۶ میلی‌ثانیه و در حالت بدون سپر در زمان ۲۲ میلی‌ثانیه به حد بیشینه خود می‌رسد، لذا خروجی ABAQUS در این دو زمان گرفته شد که در شکل ۹ آمده است.

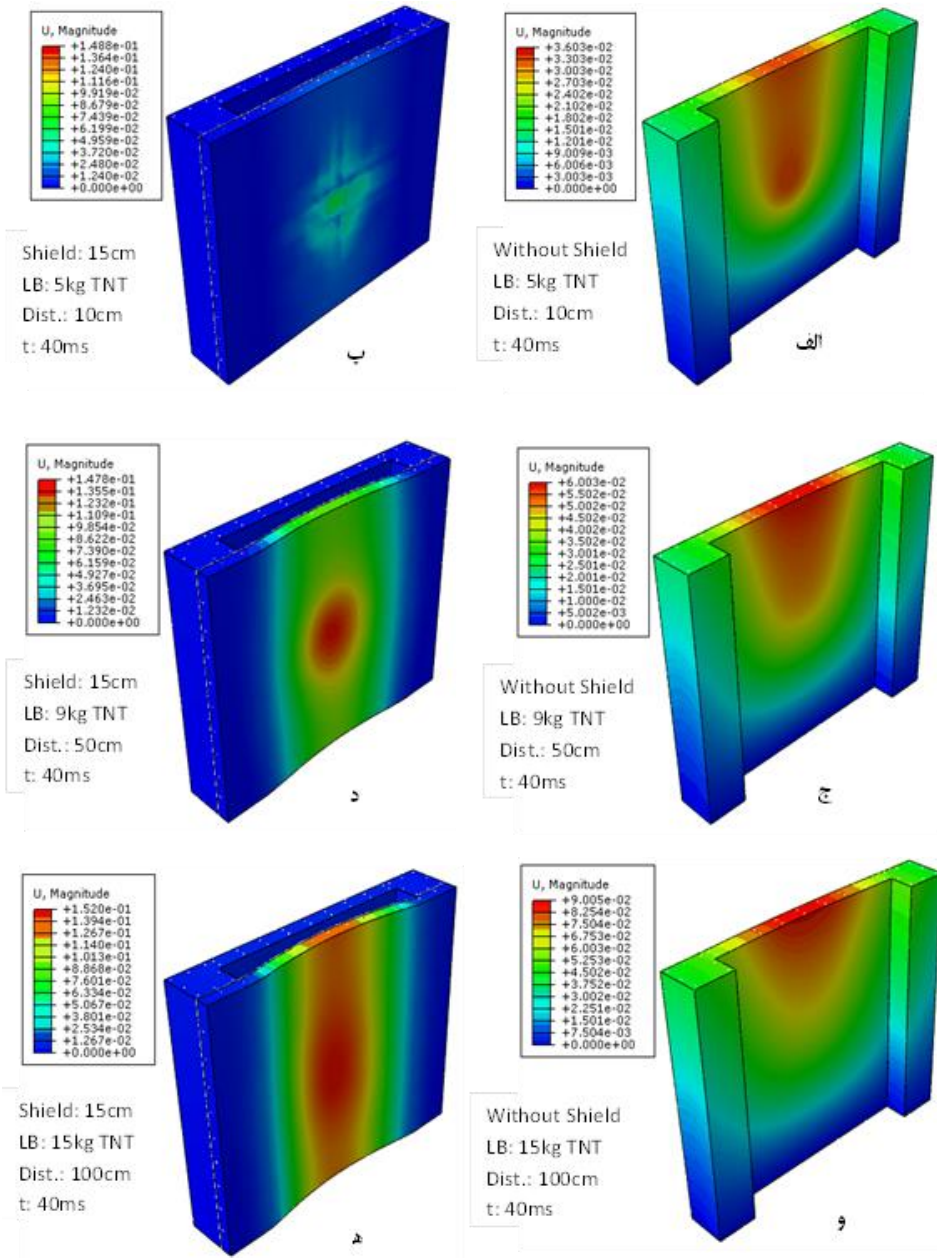
با مقایسه قسمت الف و ب شکل ۹ که در زمان ۶ میلی‌ثانیه است، می‌توان مشاهده نمود که در دیوار فاقد سپر بخشی از تنش به پایین دیوار برشی وارد می‌شود که با مقایسه دیوارهای فوق در زمان ۲۲ میلی‌ثانیه که در بخش ج و د شکل ۹ آمده است، مشاهده گردید که در دیوار همراه با سپر، پخش تنش تقریباً در کل سطح ستون و دیوار انجام می‌شود که به طور میانگین چهار مگاپاسکال است ولی در مدل بدون سپر تنش بزرگی در پای ستون و پای دیوار برشی ایجاد می‌گردد که در پای دیوار برشی این مقدار به طور متوسط ۹ مگاپاسکال است.

دیوار تیپ U در حالت بدون سپر در ازای انفجار بار ۹ کیلوگرم TNT در فاصله ۵۰ سانتی‌متری، ۶ سانتی‌متر جابجایی در بالای دیوار داشت و در حال محافظت با سپر ۱۵ سانتی‌متر، تنها ۳/۵ میلی‌متر جابجایی داشت، به عبارت دیگر کاهش حدوداً ۱۷ برابری جابجایی در بالای دیوار را به ثبت رسانده است.

برای انفجار ۱۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از این دیوار نیز جابجایی ۹ سانتی‌متری به ثبت رسیده است و در حالت محافظت با سپر ۱۵ سانتی‌متری، جابجایی ۷/۵ میلی‌متری در بالای دیوار به دست آمد و این یعنی کاهش ۱۲ برابری جابجایی بالای دیوار برشی تیپ U، پس در نتیجه وجود سپر محافظ می‌تواند جابجایی سطح بالایی دیوار را نیز به خوبی کنترل نماید و به صورت چشمگیری میزان آن را کاهش دهد.

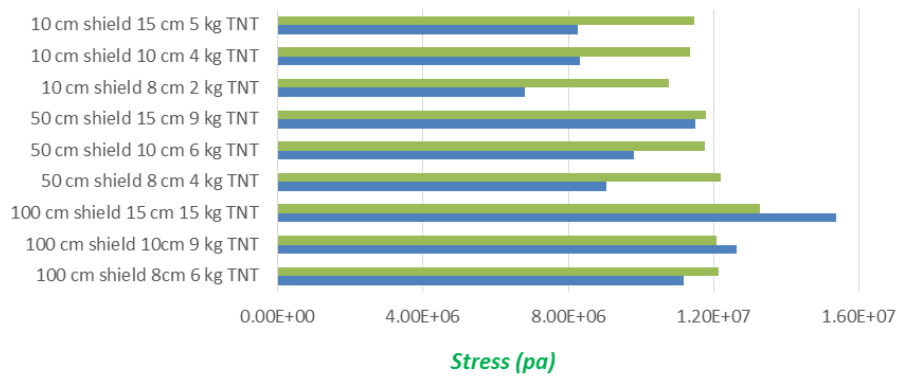
با بررسی مقادیر بیشینه تنش ایجاد شده در پای ستون در شکل ۸، ملاحظه گردید که تأثیر وجود سپر محافظ نه‌تنها در بارهای انفجاری فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری بسیار کم بود، حتی در ازای بارهای ۱۵ و ۹ کیلوگرم TNT نیز باعث افزایش تنش در پای ستون گردید که این امر می‌تواند به علت برگشتن سپر به روی دیوار بر اثر انفجار و اضافه بار وزنی جابجایی سپر بر روی دیوار باشد که در نتیجه باعث افزایش تنش در پای ستون گردد.





شکل ۷: نمایش برنامه ABAQUS از نحوه جایابی مدل دیوار برشی تیپ U تحت بارگذاری انفجار

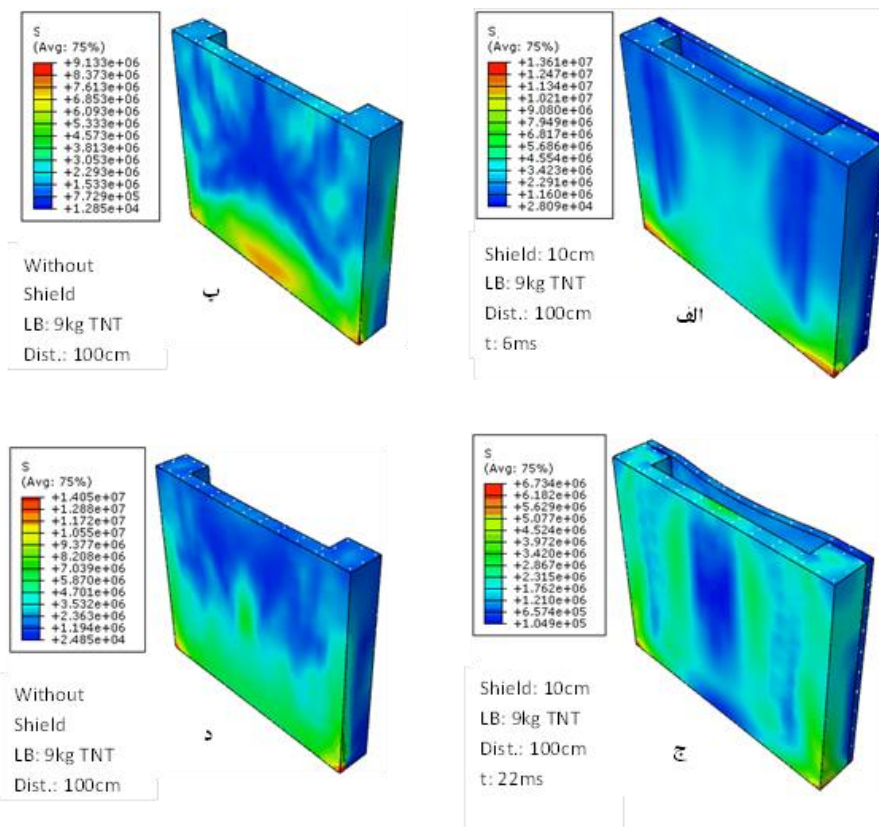
مقایسه مقادیر تنش در پای ستون در ازای بارهای انفجاری در فواصل مختلف بر روی دیوارهای با سپر و فاقد سپر U شکل



شکل ۸: مقایسه بیشینه تنش در پای ستون در ازای انفجار در فواصل مختلف بر روی دیوارهای تیپ U با سپر و فاقد سپر محافظ

جدول ۵: میزان درصد اختلاف تنش پای ستون بین حالات دیوار U همراه با سپر و فاقد سپر

درصد اختلاف تنش پای ستون بین حالات دیوار U همراه با سپر و فاقد سپر	موقعیت و میزان بار اعمالی به هر سپر		
	فاصله انفجار (cm)	مقدار TNT (kg)	ضخامت سپر (cm)
کاهش ۸/۱٪	۱۰۰	۶	۸
افزایش ۴/۴٪	۱۰۰	۹	۱۰
افزایش ۱۵/۸٪	۱۰۰	۱۵	۱۵
کاهش ۲۵/۸٪	۵۰	۴	۸
کاهش ۱۶/۶۹٪	۵۰	۶	۱۰
کاهش ۲/۴۳٪	۵۰	۹	۱۵
کاهش ۳۶/۷۷٪	۱۰	۲	۸
کاهش ۲۶/۵۶٪	۱۰	۴	۱۰
کاهش ۲۷/۹٪	۱۰	۵	۱۵



شکل ۹: نمایش برنامه ABAQUS از نحوه پخش تنش در پای ستون در مدل دیوار برشی U تحت بار انفجار

وجود سپر می‌تواند باعث پخش تنش در سطح مدل گردد و از ازدیاد تنش در پای دیوار (نقطه اتصال دیوار به پی سازه) جلوگیری نماید.

### ۳- نتیجه‌گیری

بر اساس خروجی‌های به دست آمده برای هر مدل از برنامه ABAQUS می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

در نهایت برای مقایسه تنش پای ستون در دیوارهای U همراه با سپر و فاقد سپر، می‌توان این نتیجه را گرفت که در ازای بارهای انفجاری نزدیک (۱۰ سانتی‌متر) به دیوار، سپر محافظ می‌تواند باعث کاهش تنش پای ستون گردد. در بارهای فواصل دورتر (در این پژوهش) ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر، وجود سپر کمک زیادی به کاهش تنش پای ستون نمی‌کند و در بعضی بارهای انفجاری بزرگ حتی باعث افزایش مقدار تنش در پای ستون نیز می‌گردد ولی

را تا ۲۵/۸ درصد کاهش دهد. ولی وجود سپر محافظ باعث شد تا تنش پای ستون برای بارهای انفجاری ۱۰۰ سانتی‌متری تا ۱۵/۸ درصد افزایش یابد.

### مراجع

[1] Anandavalli, N., Lakshmanan, N., Iyer, N. R., Knight, G. S., & Rajasankar, J. (2011). A novel modelling technique for blast analysis of steel-concrete composite panels. *Procedia Engineering*, 14, 2429-2437.

[2] Razaqpur, A. G., Tolba, A., & Contestabile, E. (2007). Blast loading response of reinforced concrete panels reinforced with externally bonded GFRP laminates. *Composites Part B: Engineering*, 38(5), 535-546 (In Persian).

[3] Garfield, T. T., Richins, W. D., Larson, T. K., Pantelides, C. P., & Blakeley, J. E. (2011). Performance of RC and FRC wall panels reinforced with mild steel and GFRP composites in blast events. *Procedia Engineering*, 10, 3534-3539.

[4] Pantelides, C. P., Garfield, T. T., Richins, W. D., Larson, T. K., & Blakeley, J. E. (2014). Reinforced concrete and fiber reinforced concrete panels subjected to blast detonations and post-blast static tests. *Engineering structures*, 76, 24-33.

[5] Zhang, F., Wu, C., Zhao, X. L., Heidarpour, A., & Li, Z. (2016). Experimental and numerical study of blast resistance of square CFDST columns with steel-fibre reinforced concrete. *Engineering Structures*.

[6] Coughlin, A. M., Musselman, E. S., Schokker, A. J., & Linzell, D. G. (2010). Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges. *International Journal of Impact Engineering*, 37(5), 521-529.

[7] Ha, J. H., Yi, N. H., Choi, J. K., & Kim, J. H. J. (2011). Experimental study on hybrid CFRP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading. *Composite Structures*, 93(8), 2070-2082.

[8] Wang, J., Ren, H., Wu, X., & Cai, C. (2016). Blast response of polymer-retrofitted masonry unit walls. *Composites Part B: Engineering*.

[9] Yamaguchi, M., Murakami, K., Takeda, K., & Mitsui, Y. (2011). Blast resistance of double-layered reinforced concrete slabs composed of precast thin plates. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(2), 177-191.

- ترکیب دیوار برشی بتنی به همراه سپر محافظ بتنی در جلوی آن، گزینه بسیار مناسبی برای انبارهای نگهداری چاشنی‌های انفجاری معادن است.
- وجود سپر محافظ در کاهش میزان تنش دیوار در بارهای انفجاری فواصلی که شعاع کره انفجاری اندازه سطح دیوار ایجاد می‌شود، تأثیر بیشتری دارد.
- در مدل‌های همراه با سپر محافظ، تنش در سطح بسیار کمتری از دیوار و ستون اطراف آن ایجاد می‌شود.
- تأثیر وجود سپر محافظ در جابجایی وسط دیوار در فواصل انفجاری نزدیک به دیوار بیشتر است.
- تأثیر وجود سپر محافظ در جابجایی قسمت بالایی دیوار در فواصل انفجاری دورتر از دیوار بیشتر است.
- سپر محافظ می‌تواند با جذب انرژی انفجار، تنش در کل سطح دیوار را تا یک‌سوم تنش در حالت بدون سپر کاهش دهد.
- با مقایسه دیوارهای همراه با سپر با دیوارهای فاقد سپر مشاهده گردید که وجود سپر محافظ می‌تواند تنش ایجاد شده در اتصال دیوار به پی را تا ۶۵ درصد کاهش دهد.
- با دورتر شدن بار انفجاری، شعاع کره انفجاری افزایش می‌یابد، در نتیجه به سطح بالایی دیوار نیروی بیشتری را وارد می‌نماید و این افزایش نیرو باعث افزایش لنگر و تنش در پای ستون می‌گردد.
- در دیوار تیپ U وجود سپر محافظ باعث کاهش بسیار زیاد تنش در سطح دیوار شد، به نحوی که در فاصله انفجار ۱۰۰ سانتی‌متری تا ۵۳ درصد، در فاصله انفجار ۵۰ سانتی‌متری تا ۵۶/۴ درصد و در فاصله انفجار ۱۰ سانتی‌متری تا ۴۶ درصد کاهش تنش در سطح دیوار گزارش شد.
- در دیوارهای تیپ U وجود سپر محافظ توانست شدیداً جابجایی دیوار را کاهش دهد به نحوی که در فاصله انفجاری ۱۰۰ سانتی‌متر تا ۹۴/۲ درصد، در فاصله انفجاری ۵۰ سانتی‌متر تا ۹۶/۲ درصد و در فاصله انفجاری ۱۰ سانتی‌متر تا ۹۷/۴ درصد جابجایی دیوار کاهش یافت.
- وجود سپر محافظ در دیوار تیپ U توانست تنش پای ستون را برای بارهای انفجاری فواصل ۱۰ سانتی‌متر تا ۳۶/۷ درصد، بارهای انفجاری فاصله ۵۰ سانتی‌متر

- [20] Campidelli, M., Tait, M. J., El-Dakhkhni, W. W., & Mekky, W. (2016). Numerical strategies for damage assessment of reinforced concrete block walls subjected to blast risk. *Engineering Structures*, 127, 559-582.
- [21] Li, J., Wu, C., & Hao, H. (2016, January). Spallation of reinforced concrete slabs under contact explosion. In *Defence Technology (ACDT), 2016 Second Asian Conference on* (pp. 42-45). IEEE.
- [22] Furqan, A., Santosa, S. P., Putra, A. S., Widagdo, D., Gunawan, L., & Arifurrahman, F. (2017). Blast Impact Analysis of Stiffened and Curved Panel Structures. *Procedia Engineering*, 173, 487-494.
- [23] Dear, J. P., Rolfe, E., Kelly, M., Arora, H., & Hooper, P. A. (2017). Blast Performance of Composite Sandwich Structures. *Procedia Engineering*, 173, 471-478.
- [24] Gargano, A., Pingkarawat, K., Blacklock, M., Pickerd, V., & Mouritz, A. P. (2017). Comparative assessment of the explosive blast performance of carbon and glass fibre-polymer composites used in naval ship structures. *Composite Structures*, 171, 306-316.
- [25] Wang, S. (2017). Evaluation of underground pipe-structure interface for surface impact load. *Nuclear Engineering and Design*, 317, 59-68.
- [26] Yu, Z. L., Xue, P., & Chen, Z. (2017). Reprint of: Nested tube system applicable to protective structures against blast shock. *International Journal of Impact Engineering*, 105, 13-23.
- [27] Guo, Z., Chen, W., Zhang, Y., & Zou, H. (2017). Post fire blast-resistances of RPC-FST columns using improved Grigorian model. *International Journal of Impact Engineering*, 107, 80-95.
- [28] Ding, Y., Song, X., & Zhu, H. T. (2017). Probabilistic progressive collapse analysis of steel frame structures against blast loads. *Engineering Structures*, 147, 679-691.
- [29] Ibrahim, Y. E., Ismail, M. A., & Nabil, M. (2017). Response of Reinforced Concrete Frame Structures under Blast Loading. *Procedia Engineering*, 171, 890-898.
- [30] Li, Z., Chen, L., Fang, Q., Hao, H., Zhang, Y., Chen, W., & Bao, Q. (2017). Study of autoclaved aerated concrete masonry walls under vented gas explosions. *Engineering Structures*, 141, 444-460.
- [31] Markose, A., & Rao, C. L. (2017). Mechanical response of V shaped plates under blast loading. *Thin-Walled Structures*, 115, 12-20.
- [10] Rafiei, S., Hossain, K. M. A., Lachemi, M., Behdinan, K., & Anwar, M. S. (2013). Finite element modeling of double skin profiled composite shear wall system under in-plane loadings. *Engineering Structures*, 56, 46-57.
- [11] Goel, M. D., & Matsagar, V. A. (2013). Blast-resistant design of structures. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 19(2), 04014007.
- [12] Akers, S., Ehgott, J., & Rickman, D. (2006, June). Numerical simulations of explosive blast pressures during wall breaching. In *HPCMP Users Group Conference, 2006* (pp. 3-3). IEEE.
- [13] Yusof, M. A., Nor, N. M., Ismail, A., Sohaimy, R., Daud, N. G. N., Peng, N. C., ... & Zain, M. (2011, August). Measurement of field blast testing data using high speed data acquisition system for steel fiber reinforced concrete. In *Defense Science Research Conference and Expo (DSR), 2011* (pp. 1-4). IEEE.
- [14] Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alharbi, Y. R., Al-Salloum, Y. A., & Abbas, H. (2014). Progressive collapse potential of a typical steel building due to blast attacks. *Journal of Constructional Steel Research*, 101, 143-157.
- [15] Fatt, M. S. H., & Sirivolu, D. (2015). Blast response of double curvature, composite sandwich shallow shells. *Engineering Structures*, 100, 696-706.
- [16] Zhang, F., Wu, C., Wang, H., & Zhou, Y. (2015). Numerical simulation of concrete filled steel tube columns against BLAST loads. *Thin-Walled Structures*, 92, 82-92.
- [17] Štoller, M. E. J., & Zezulová, E. (2015, May). The field testing of high performance fiber reinforced concrete slabs under the TNT load explosion together with the analytical solution and the numerical modelling of those tests results. In *Military Technologies (ICMT), 2015 International Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
- [18] Qing, J. Y., Bing, W. J., Chao, L. T., & Hai, L. C. (2015, September). The Simulation Analysis on the Numerical Destructiveness of Different Wall Materials under the Explosion Overpressure Shock Wave. In *Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015 Fifth International Conference on* (pp. 20-24). IEEE.
- [19] Parisi, F., Balestrieri, C., & Asprone, D. (2016). Blast resistance of tuff stone masonry walls. *Engineering Structures*, 113, 233-244.

- [32] Arora, H., Del Linz, P., & Dear, J. P. (2017). Damage and deformation in composite sandwich panels exposed to multiple and single explosive blasts. *International Journal of Impact Engineering*, 104, 95-106.
- [33] Davison, L., Horie, Y., & Graham, R. A. (2006). Shock Wave and High Pressure Phenomena. *High-Energy-Density Physics*.
- [34] Hao, Y., & Hao, H. (2014). Influence of the concrete DIF model on the numerical predictions of RC wall responses to blast loadings. *Engineering Structures*, 73, 24-38.
- [35] Bozorgvar, M. and Shoshtari, A. (2011). "Blast Effects on Concrete Buildings Earthquake Resistant". The sixth National Congress of Civil Engineering (In Persian).
- [36] Sahoo, D. K., Guha, A., Tewari, A., & Singh, R. K. (2017). Performance of Monolithic Plate and Layered Plates Under Blast Load. *Procedia Engineering*, 173, 1909-1917.
- [37] Zhai, C., Chen, L., Xiang, H., & Fang, Q. (2016). Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire. *International Journal of Impact Engineering*, 97, 29-45