

بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی مرکب با ستون‌های پر شده با بتن تحت بار انفجار

حسین پروینی ثانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

شهرام محمدی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

hossein.parvini_sani@iauz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۰۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۰/۱۳

چکیده

با توجه به اهمیت موضوع انفجار در سازه‌های خاص دارای دیوار برشی فولادی مرکب به همراه ستون‌های باکس فولادی پر شده با بتن، در این پژوهش اثر بار انفجار برای این سیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه یک سازه فولادی ۸ طبقه همراه با دیوارهای برشی فولادی به عنوان سیستم باربر جانبی انتخاب شده و پس از طراحی سازه، سیستم دیوار برشی فولادی مرکب به همراه ستون‌های باکس فولادی پر شده با بتن در برابر بارگذاری انفجار تحت روش انفجار در هوا مدلسازی شده است. در این مقاله نشان داده شده است که با اضافه کردن یک لایه و سپس دولایه بتن به ورق برشی فولادی تحت مقدار ماده منفجره و فاصله ثابت میزان انرژی جنبشی و میانگین جابجائی خارج از صفحه ورق برشی بطور متوسط ۶۳٪ کاهش یافته و نوع خرابی از گسیختگی ورق به کماتش ورق تغییر پیدا کرده است. همچنین تمرکز تنش‌ها از محل اتصال ورق و المان‌های مرزی دیوار برشی به مرکز ورق انتقال یافته و مقدار انرژی جذب شده در ورق برشی فولادی ۳۸۰٪ افزایش یافته است.

کلید واژگان: دیوار برشی فولادی، دیوار برشی فولادی مرکب، بار انفجار، ستون CFT، جذب انرژی.

۱- مقدمه

دیوارهای برشی فولادی به عنوان سیستم باربر جانبی متشکل از اعضای المان مرزی افقی و عمودی و ورق‌های فولادی می‌باشند که با توجه به مزایای قابل توجه آن استفاده از آن‌ها در سازه‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است [۱]. در تحقیقات انجام شده ثابت شده است که ظرفیت دیوار برشی فولادی در مقابله با بارهای لرزه‌ای، طوفان و انفجار در مقایسه با سیستم‌های دیگر مثل قاب‌های ممان‌گیر ویژه حداقل ۲۵٪ بیشتر می‌باشد، همچنین سختی ۷۰٪ و مقاومت نهایی آن حدود ۱۵٪ بیشتر از سیستم مهاربندی X شکل می‌باشد [۲]. آزمایشات نشان می‌دهد که دیوارهای برشی فولادی دارای شکل‌پذیری بالایی می‌باشند و شبیه تیرورق طره‌ای عمل می‌کند [۳].

توصیه طراحی لرزه‌ای دیوارهای برشی مرکب که حاصل نتایج تحقیقات و آزمایشات [۴] بدین صورت می‌باشد که حالت‌های شکست اجزای مختلف دیوار برشی مرکب را شناسایی و به دو دسته "انعطاف‌پذیر" و "شکننده" طبقه‌بندی کرده‌اند، که شکست انعطاف‌پذیر شامل لغزش بولت‌ها، تسلیم برشی فولاد و تسلیم تیرها بوده و شکست ترد شامل تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها، شکست بتن دیوار، شکست اتصالات گیردار تیر، شکست ستون در کشش می‌باشد. پیشنهاد شده است که طراحی دیوار برشی مرکب به روشی انجام شود که رخداد حالت شکست انعطاف‌پذیر قبل از شکست ترد ممکن باشد.

دیوارهای برشی فولادی که ظرفیت اتلاف انرژی بالایی را داشته و عملکرد لرزه‌ای مناسب آن‌ها اثبات شده است می‌توانند یکی از گزینه‌های مورد استفاده در سازهایی باشند در آن‌ها احتمال انفجار و آتش سوزی وجود دارد [۵]. از این رو تحلیل خرابی‌های حاصل از انفجار در دیوار برشی فولادی دارای ضرورت و اهمیت ویژه می‌باشد. لذا این سازه‌ها باید علاوه بر تحمل بارهای لرزه‌ای، باد، برف، و ... در مقابل برخی بارهای دینامیکی دیگر همانند انفجار مقاومت داشته و به گونه‌ای که موجب خطرآفرینی برای کاربران در زمان حادثه نشود.

یکی از حالت‌های خاص دیوار برشی فولادی، جهت افزایش مقاومت در برابر انفجار استفاده از دیوار برشی فولادی مرکب همراه با ستون‌های باکس فولادی پر شده با بتن (CFT) می‌باشد.

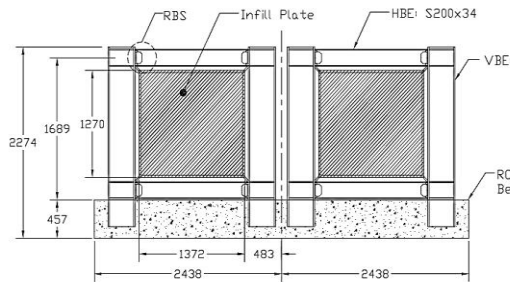
مهم‌ترین عامل موثر بر رفتار مقاطع ستون‌های باکس پر شده با بتن شامل عملکرد مرکب، لاغری ستون و فشردگی جدار فولادی، نوع بتن و فولاد مصرفی، خزش و افت بتن و چسبندگی بین دو مصالح می‌باشد [۶]. بر این اساس طی آزمایشات مختلف بر روی ستون‌های فولادی پر شده با بتن تحت انفجار مشخص شد که ستون‌های پر شده با بتن دارای مقاومت بالایی نسبت به ستون‌های فولادی در مقابل بار انفجار می‌باشند [۷-۸].

در پژوهش‌های دیگر نیز به بررسی تاثیر انفجار ناشی از وسیله نقلیه بر روی دیوار که ترکیبی از دیوار برشی فولادی و بتنی بود پرداخته شده

است. در این مطالعات نشان داده شده است که یکی از معایب دیوارهای بتنی تحت اثر انفجار، خرد شدن و حرکت با سرعت بسیار بالایی در محیط می‌باشد، که این ترکش‌ها می‌توانند باعث خسارات و تلفات شدیدی گردند که در دیوارهای مرکب فولاد و بتن، وجود صفحه فولادی در پشت دیوار مانع حرکت ذرات بتن شده و خطر ترکش قطعات بتنی را حذف می‌کند [۹،۱۰].

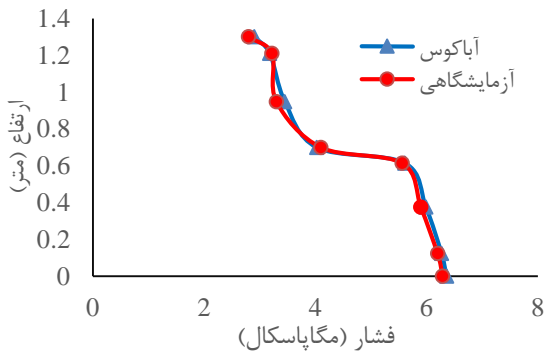
در مطالعه وارن و برانو [۱۱]، آزمایشی برای ارزیابی پاسخ ناشی از انفجار روی دیوار برشی فولادی انجام دادند. در شکل (۱) مشاهده می‌شود که دیوار برشی تغییر شکل‌های قابل توجهی را تحمل و بدون خرابی عمده و چسبیده به قاب باقی می‌ماند و به دلیل فشار موج انعکاسی برخورد به سطح خاک در قسمت پایینی ورق برشی، شاهد تغییر شکل‌های بزرگ بوده و ترک در تمام طول جوش‌های اتصال بال بالایی تیر تحتانی مشاهده شده است. بر اساس آیین‌نامه‌ی FEMA 453 [۱۲] در انفجار خارج از ساختمان موج فشاری به سطوح خارجی اعمال شده و باعث شکست عناصر باربر مجاور، نما و شیشه‌ها می‌شود. بر اساس همین آیین‌نامه‌ی در انفجار خارج از ساختمان موج فشاری به سطوح خارجی اعمال شده و باعث شکست عناصر باربر مجاور آن، عناصر نما و شیشه‌ها می‌شود. چنانچه موج تابشی در جهت بازشوها ادامه یابد، وارد ساختمان شده و باعث تخریب سقف و طبقات می‌شود. با ورود موج تابشی به داخل ساختمان فشار رو به بالا در سقف‌ها و طبقات ایجاد شده و باعث تخریب آنها می‌شود و در مرحله آخر موجب فشار همه جانبه رو به داخل در تمام محیط ساختمان می‌شود.

معیار تغییر شکل برای قاب طبق آیین‌نامه UFC 3-340-02-5 [۱۳] شامل تغییر مکان جانبی طبقات و دوران‌های اعضاء می‌باشد، محدودیت‌های تغییر شکل‌های غیر الاستیک و نسبت شکل‌پذیری مختص اعضاء می‌باشد. برای اعضایی که بین دو انتهای خود بارگذاری نمی‌شوند مانند ستون‌های داخلی، پیچش صفر است و تنها معیار تغییر مکان جانبی باید بررسی گردد، ماکزیمم دوران اعضاء ۲ درجه و ماکزیمم تغییر مکان جانبی ۱،۲۵ برابر ارتفاع طبقه می‌باشد. محدودیت تغییر شکل ورق‌ها طبق آیین‌نامه بدین صورت است که تنها ورق‌ها و سازه‌های ورق‌گونه می‌توانند متحمل تغییر شکل‌های بزرگ شوند.



شکل ۲- ابعاد و اندازه مدل آزمایشگاهی وارن و برانو [۱۱]

در این مدل آزمایشگاهی موارد منفجره در ارتفاع ۰٫۹ متر در فاصله ۲٫۴ متر و میزان مشخص وزن TNT به مقدار 3W لحاظ شده است. جهت مدلسازی از نرم افزار آباکوس استفاده شده است که مدلسازی بتن با المان Solid، فولاد با المان Shell انجام شده است. شکل (۳) تغییرات حداکثر فشار در محور مرکزی دیوار برشی فولادی را در حالت آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که مدلسازی انفجار در دیوار برشی فولادی در حالت عددی تفاوت ناچیزی با حالت آزمایشگاهی داشته و بنابراین صحت مدلسازی مورد تایید می‌باشد.



شکل ۳- تغییرات حداکثر فشار در دیوار برشی فولادی در حالت آزمایشگاهی و عددی

با توجه به عدم وجود مدل آزمایشگاهی با اطلاعات کامل دیوار برشی فولادی مرکب در برابر انفجار، جهت اطمینان از نحوه و سازوکار مدلسازی دیوار برشی فولادی مرکب از مطالعه عرب زاده و همکاران [۱۵] تحت پروتکل بارگذاری شبه استاتیکی چرخه‌ای ATC-24 استفاده شده است (شکل (۴)). جهت مدلسازی و اتصال لایه بتنی به ورق برشی فولادی دیوار برشی مرکب از قید Tie و اندرکنش بین آرماتورها و بتن از نوع Embedded در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدلسازی بتن با المان Solid، فولاد با المان Shell و آرماتور با المان Wire انجام شده است. شکل (۵) توزیع تنش‌ها را در نرم‌افزار آباکوس نمایش می‌دهد. شکل (۶) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مدل آزمایشگاهی و مدل آباکوس را نمایش می‌دهد که تطابق نسبتاً خوبی با یکدیگر دارند و در نتیجه جزئیات مدلسازی دیوار برشی کامپوزیت به درستی انجام شده است.



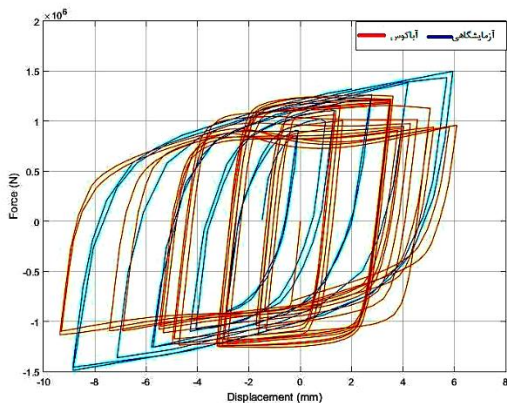
شکل ۱- مدل آزمایشگاهی وارن و برانو پس از انفجار [۱۱]

با توجه به مطالب ارائه شده طی پژوهش‌های گذشته، هدف از این پژوهش بررسی عملکرد و خرابی‌های دیوار برشی فولادی به عنوان عضو باربر لرزه‌ای سازه در مقابل بارهای انفجاری و در نهایت بررسی راهکارهای کاهش خسارات با استفاده از دیوارهای برشی فولادی مرکب تحت بارهای انفجار می‌باشد. نوآوری مطالعه حاضر از این جنبه می‌باشد که مطالعات عددی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی به همراه ستون‌ها CFT در برابر بارهای لرزه‌ای انجام شده است [۱۴] ولی تا کنون مطالعه این سیستم در برابر بار انفجار انجام نشده است. مطالعات انجام شده در این زمینه برای دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت در برابر انفجار و حریق بوده است ولی تاثیر ستون CFT در مطالعات گذشته انجام نشده است. عملاً پیشنهاد این مقاله برای افزایش مقاومت در برابر انفجار استفاده از دیوار برشی فولادی کامپوزیت و ترکیب آن با ستون CFT می‌باشد.

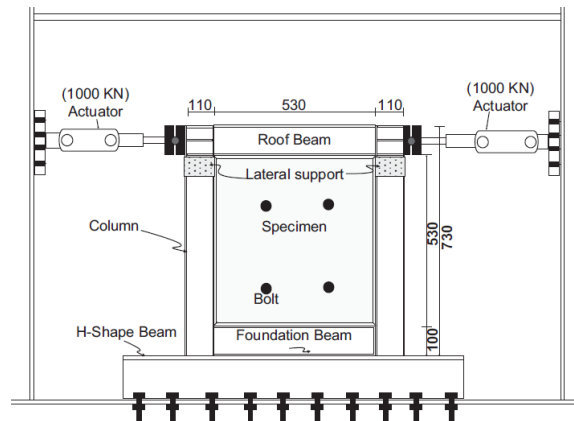
۲- صحت سنجی و جزئیات مدل‌سازی

۲-۱- صحت سنجی

علی‌رغم وجود مطالعات متعدد در زمینه لرزه‌ای، با توجه به عدم وجود مدل آزمایشگاهی کامل در زمینه دیوارهای برشی مرکب به همراه ستون‌های CFT در برابر بار انفجار، به منظور صحت سنجی از مطالعه وارن و برانو [۱۱] استفاده شده که رفتار دیوار برشی فولادی در برابر انفجار (شکل (۱) و شکل (۲)) را بررسی نموده است.



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی مدل آزمایشگاهی [۱۵] و مدل آباکوس

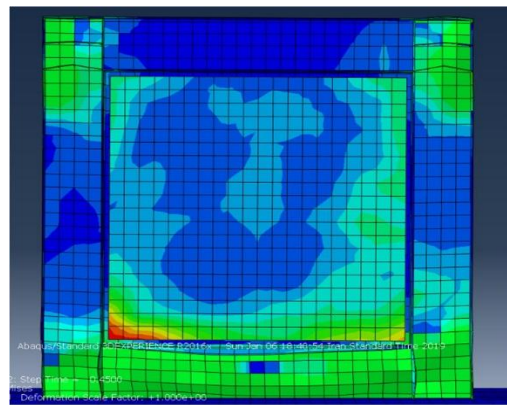
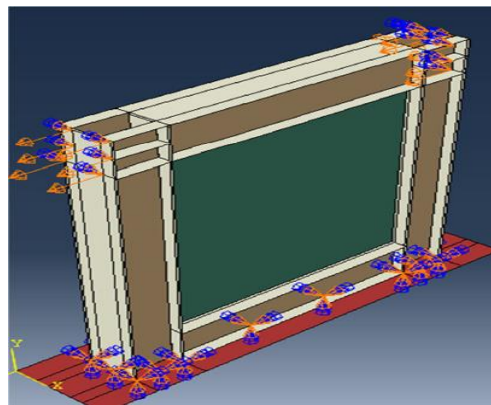


شکل ۴- ابعاد و اندازه مدل آزمایشگاهی عرب زاده و همکاران [۱۵]

۲-۲- جزئیات مدل مورد مطالعه

برای مدل‌سازی ابتدا مدل قاب دیوار برشی فولادی به همراه ستون‌های باکس فولادی برای سازه هشت طبقه، محل ساختگاه تهران و نوع زمین III در نرم افزار ETABS 2017 با استفاده از مدل نواری دو طرفه [۱۶] طراحی شده است. پلان ساختمان مورد مطالعه در شکل (۷) نمایش داده شده است. در ضمن جداول (۱) و (۲) بترتیب ابعاد و اندازه-های اعضای قاب دیوار برشی و ابعاد و اندازه‌های اعضای ورق برشی دیوار برشی را نمایش می‌دهند.

با توجه به این که در این مدل اتصالات تیرها به ستون‌ها مفصلی در نظر گرفته شده و سیستم باربر جانبی فقط شامل دیوار برشی فولادی و المان‌های مرزی آن است یکی از دیوارهای انتخاب شده و مدل‌های بعدی به صورت ۲-بعدی تهیه شده‌اند. در ادامه مطالعات روی سه نوع مدل مختلف بررسی شده است. ابتدا مدل ۳ بعدی دیوار برشی فولادی همراه با ستون‌های باکس فولادی با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. در مدل دوم قاب دیوار برشی فولادی همراه با ستون‌های باکس فولادی پر شده با بتن و یک لایه بتن مسلح به ضخامت ۷ سانتی متر بر روی ورق فولادی مدل‌سازی شده است و در مدل سوم به عنوان مدل اصلی و هدف، دیوار برشی همراه با ستون‌های فولادی باکس پر شده با بتن به همراه ورق برشی فولادی شامل دو لایه بتن مسلح هر کدام به ضخامت ۷ سانتی متر در دو سمت ورق فولادی به صورت ساندویچی مدل‌سازی شده و تحت بارگذاری انفجار در طبقات اول و چهارم قرار گرفته است. شکل (۸) جزئیات مدل‌سازی در آباکوس را نمایش می‌دهد.

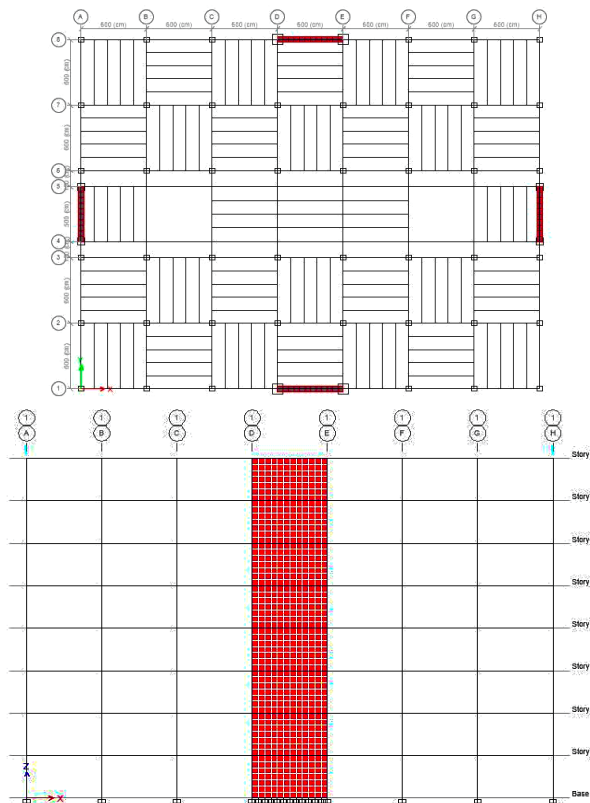


شکل ۵- نحوه مدل‌سازی و توزیع تنش در نرم‌افزار آباکوس

است. بتن مصرفی در ستون‌ها و قسمت بتنی دیوار برشی دارای مقاومت ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد و ضخامت هر لایه بتن دیوار برشی هفتاد میلی متر بوده و دارای فاصله و گپ با المان‌های مرزی تیر و ستون، به مقدار ۵۰ میلی متر می‌باشد. جهت مدلسازی و اتصال لایه بتنی به ورق برشی فولادی دیوار برشی مرکب از قید Tie و اندرکنش بین آرماتورها و بتن از نوع Embedded در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدلسازی بتن با المان Solid، فولاد با المان Shell و آرماتور با المان Wire انجام شده است.

مواد بکار برده شده برای فولاد دارای ویژگی‌های چگالی، خواص الاستیک، خواص پلاستیک می‌باشد و از ویژگی خرابی کششی و فشاری و Ductility Damage و Shear Damage استفاده شده است. همچنین برای بتن از ویژگی مواد Brittle Cracking به همراه خواص خرابی کششی و فشاری و ویژگی‌های الاستیک و پلاستیک بتن استفاده شده است. خواص کششی و فشاری بکار برده شده برای ماده بتن در جدول (۳) مشاهده می‌شود. همچنین که خواص کششی و فشاری و خواص خرابی بکار برده شده برای فولاد ST37 شرح جدول ۴ می‌باشد.

میلگرد مصرفی قسمت بتنی دیوار برشی از نوع S400 و قطر ۱۲ میلی متر به فواصل ۱۵۰ میلی متر مش بندی آرماتورها انجام شده



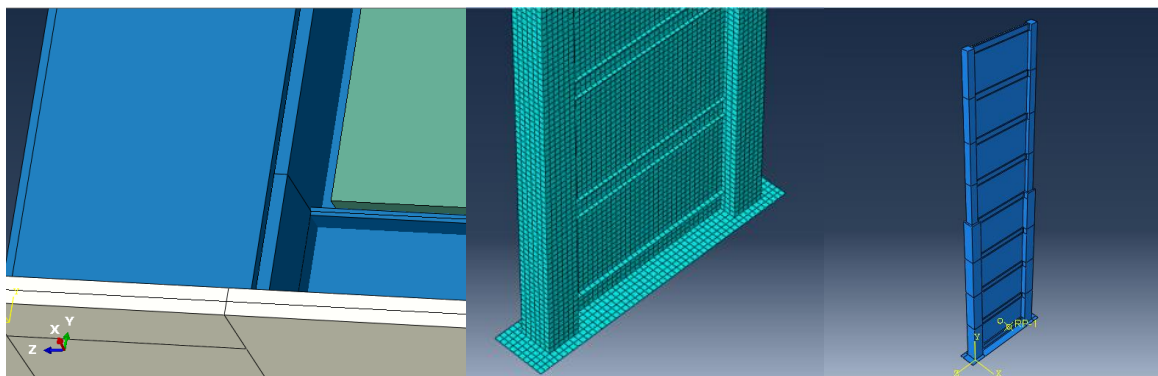
شکل ۷- پلان و مقطع ساختمان ۸ طبقه مورد مطالعه در نرم افزار Etabs

جدول ۱- ابعاد و اندازه‌های اعضای قاب دیوار برشی

عضو	ستون‌های باکس طبقات ۵-۸ (mm)	ستون‌های باکس طبقات ۴-۱ (mm)	تیر طبقات ۴-۸ (mm)	تیر طبقات ۱-۴ (mm)	تیر فونداسیون (mm)
طول عضو	۳۵۰۰	۳۵۰۰	۵۵۵۰	۵۱۰۰	۵۱۰۰
ضخامت بال	۵۰	۵۰	۳۰	۳۰	۳۰
عرض بال	۶۰۰	۶۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰
ضخامت جان	۵۰	۵۰	۲۵	۲۵	۳۰
عرض جان	۶۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۶۰۰
نوع فولاد مصرفی	ST37	ST37	ST37	ST37	ST37

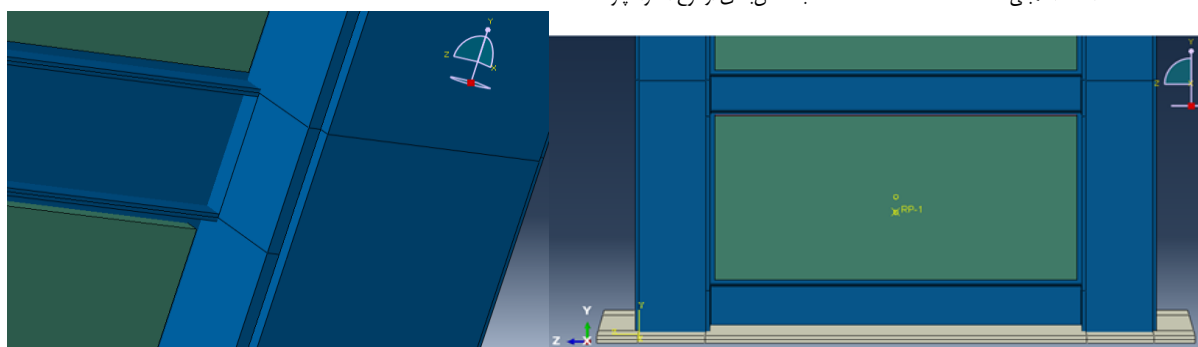
جدول ۲- ابعاد و اندازه‌های اعضای ورق برشی دیوار برشی

عضو	ورق برشی طبقه ۵-۸ (mm)	ورق برشی طبقه ۲-۴ (mm)	ورق برشی طبقه ۱ (mm)
عرض	۵۴۰۰	۵۱۰۰	۵۱۰۰
ارتفاع	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۲۴۰۰
ضخامت	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
نوع فولاد مصرفی	ST37	ST37	ST37



ب- مش بندی از نوع استراکچر

الف- اسمبلی



پ - دیوار برشی فولادی

ت - گپ بین بتن و فریم فولادی

شکل ۸- جزئیات کلی مدل‌ها در نرم‌افزار آباکوس

جدول ۳- خواص کششی و فشاری بتن

شکست ترد	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته Mpa	وزن مخصوص kg/m ³
کرنش ترک خوردگی مستقیم	کرنش ترک خوردگی مستقیم	تنش مستقیم پس از ترک خوردگی Mpa	
0	0.15	23400	2500
0.001			

ترک خوردگی مستقیم	کرنش حد بازشدگی ترک‌ها	فاکتور محبوس شونده برش
0.001	0	0
	0.001	1

جدول ۴- خواص کششی و فشاری فولاد ST-37

وزن مخصوص kg/m ³	مدول الاستیسیته Mpa	نسبت پواسون	تنش تسلیم Mpa	کرنش حد خرابی برشی	کرنش حد خرابی شکل پذیر
7850	210000	0.3	240	0.64	0.2

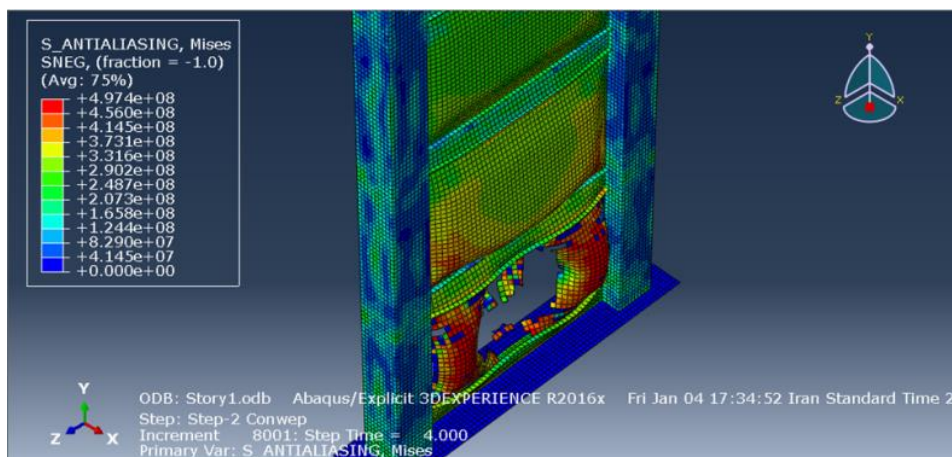
فولادی انجام می‌شود، در صورتی که در مدل دیوار برشی فولادی بدون لایه بتنی تمرکز تنش‌ها و خرابی‌ها در محل اتصال ورق به المان‌های مرزی اتفاق افتاده و این امر موجب خسارات وارده جبران ناپذیر به سازه خواهد شد، ولی در مدل دیوار برشی فولادی به همراه لایه بتنی تنش‌ها در ورق برشی فولادی مستهلک می‌شود و کماتش در ورق برشی فولادی اتفاق می‌افتد و المان‌های مرزی ستون آسیب نمی‌بینند و در نتیجه سازه قابل بازسازی خواهد بود. قابل ذکر است که مقاوم‌سازی دیواربرشی با ارزان‌ترین مصالح انجام شده و با توجه به اینکه، در این نوع مقاوم‌سازی ظرفیت باربری ورق برشی به طور قابل توجهی افزایش یافته و از کماتش ورق برشی فولادی جلوگیری به عمل آمده است. که این امر موجب کاهش قابل توجه مصرف فولاد می‌گردد.

همچنین با توجه به شکل‌های (۱۲) الی (۱۴) نتیجه منحصر به فرد این پژوهش را می‌توان خرابی و کماتش ورق برشی دیوار برشی و ستون‌های طبقه هفتم سازه را در انفجار مربوط به طبقه اول ذکر کرد، که در توضیح این نوع خرابی می‌توان با اشاره و توجه به مقدار و فاصله‌ی ماده منفجره که موج حاصل از آن در فواصل منحصر به فردی دارای قدرت زیادی می‌باشد و در این فواصل دچار تشدید می‌شود، که در صورت برخورد به سازه در فاصله‌ی دور از انفجار باعث خرابی در سازه می‌گردد، که این فاصله‌ی تشدید موج انفجار برای هر مقدار و هر فاصله‌ی ماده منفجره TNT از سازه، منحصر به فرد می‌باشد و با تغییر محل انفجار نیز محل این نوع خرابی‌ها تغییر پیدا خواهد کرد. بر اساس شکل (۱۳) اضافه کردن بتن به ستون‌های باکس فولادی و ورق برشی دیوار برشی موجب کاهش قابل توجه خرابی‌های ستون طبقه هفتم شده است

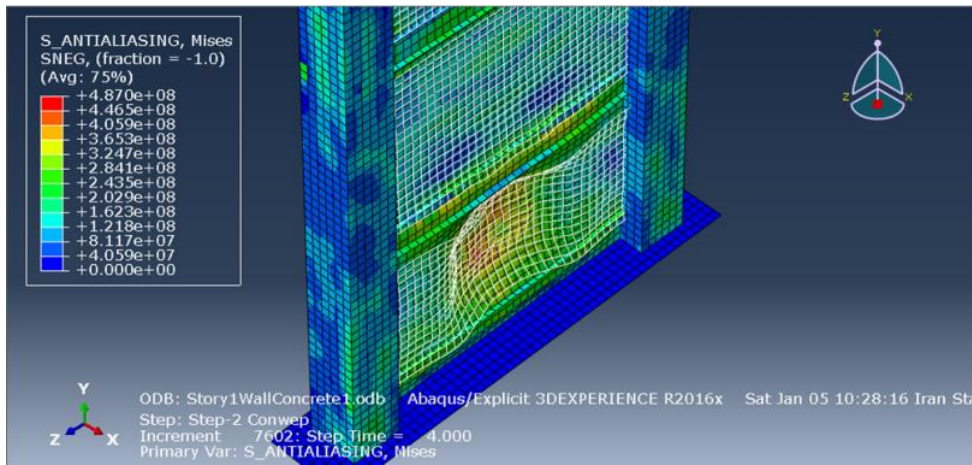
در مدلسازی در آباکوس از مش‌بندی نوع استراکچر و گلگر صریح Explicit استفاده شده است، به طوری که بارهای استاتیکی به صورت Smooth Step و شبه استاتیکی در طول زمان بزرگتر به دیوار برشی اعمال شده و سپس بارهای دینامیکی انفجار به دیوار برشی اعمال گردیده است. لازم به ذکر است که مقدار ماده منفجره TNT مورد استفاده در بارگذاری انفجاری در همه مدل‌ها دارای مقدار و فاصله‌ای ثابت از دیوار برشی می‌باشند. بارگذاری انفجاری به صورت انفجار در هوا مدلسازی شده و دارای مقدار مشخص وزن TNT و فاصله‌ی معین با سازه مورد نظر و ارتفاع معینی از سطح زمین می‌باشد. مقدار کل بار استاتیکی حاصل از بار مرده و زنده اعمال شده به سازه برابر 750 kg/m^2 می‌باشد، که مقدار بار وارده به هر کدام از تیرهای دیوار برشی 2250 kg/m به صورت استاتیکی اعمال شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

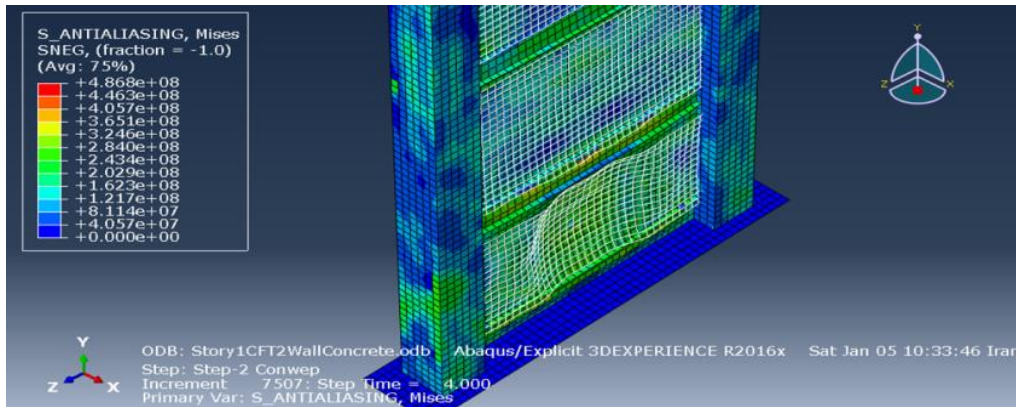
اشکال (۹) الی (۱۴) نوع تخریب، گسیختگی و توزیع تنش‌ها را در ۳ مدل تشریح شده نمایش می‌دهند. بر اساس این اشکال و با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مشاهده می‌شود که با اضافه کردن هر لایه بتن به ورق برشی دیوار برشی از تخریب و گسیختگی کامل ورق برشی جلوگیری به عمل آمده و خرابی‌ها از نوع پانچ شدن ورق برشی تحت بار انفجار، به شکل کماتش، به صورت گنبدی شکل ارتقاء یافته است و این نوع خرابی به معنی استفاده متقارن از ظرفیت کششی ورق فولادی می‌باشد و تمرکز تنش‌ها از محل اتصال ورق با المان‌های مرزی به مرکز ورق انتقال یافته است که این امر موجب کاهش خسارات به اعضای مرزی مهم مثل تیر و ستون می‌شود، لذا جذب انرژی در ورق برشی



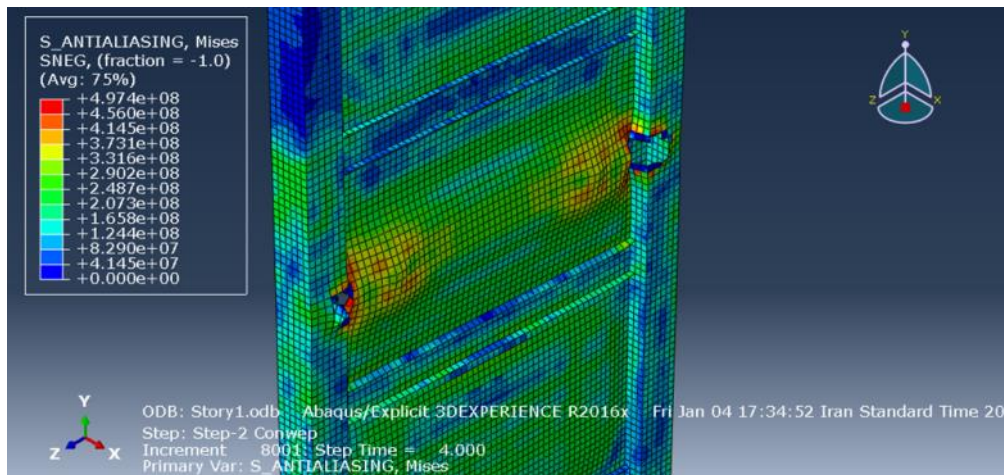
شکل ۹ - دیوار برشی فولادی و ستون‌های باکس فولادی (مدل اول)



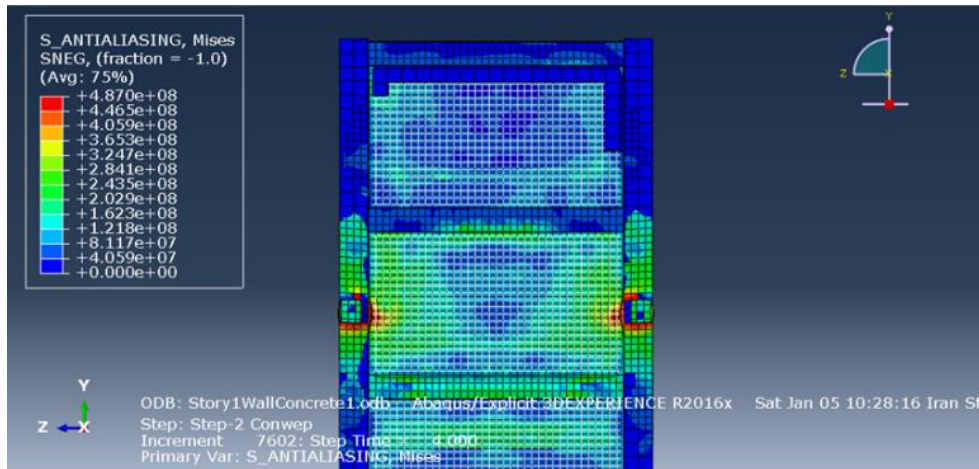
شکل ۱۰ - دیوار برشی فولادی مرکب با یک لایه بتن و ستون‌های فولادی باکس پر شده با بتن (مدل دوم)



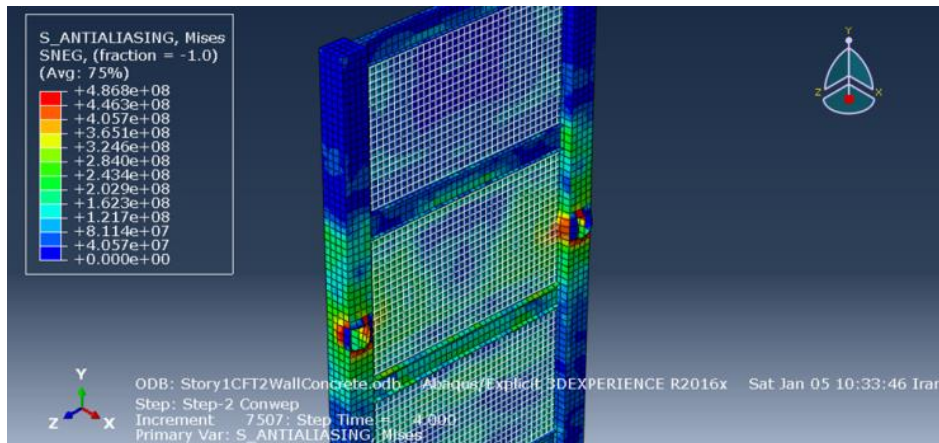
شکل ۱۱ - دیوار برشی فولادی مرکب با دو لایه بتن و ستون‌های فولادی باکس پر شده با بتن (مدل سوم)



شکل ۱۲ - خرابی طبقه هفتم مدل دیوار برشی فولادی با ستون‌های فولادی در انفجار طبقه اول (مدل اول)



شکل ۱۳ - خرابی طبقه هفتم مدل دیوار برشی مرکب با یک لایه بتن و ستون‌های CFT در انفجار طبقه اول (مدل دوم)

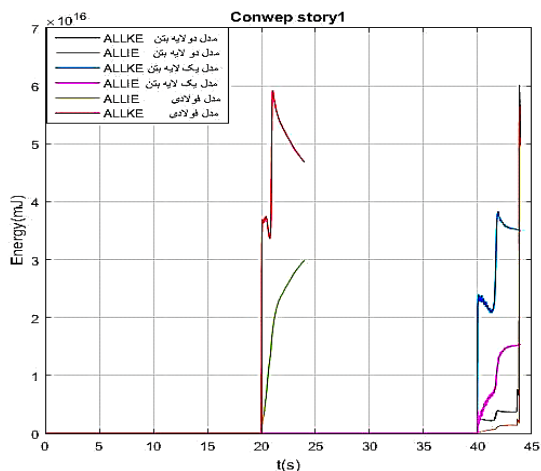


شکل ۱۴ - خرابی طبقه هفتم مدل دیوار برشی مرکب با دو لایه بتن و ستون‌های CFT در انفجار طبقه اول (مدل سوم)

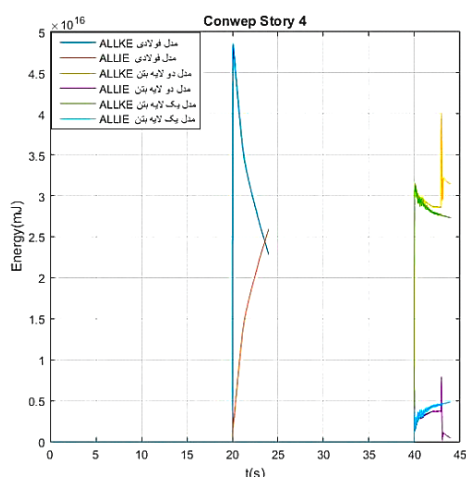
مدل دیوار برشی فولادی دو لایه بتن شامل ستون‌های باکس پر شده با بتن به مقدار $(mj) 6 * 10^{16}$ می‌توان نتیجه گرفت که تبدیل ستون‌ها به CFT موجب کاهش انرژی جنبشی شده، ولی اضافه کردن لایه های بتن به ورق برشی موجب افزایش انرژی جنبشی شده است. همچنین با مقایسه این دو نمودار مشخص می‌شود که انرژی جنبشی مدل دیوار برشی شامل دو لایه بتن، در انفجار طبقه اول برابر با $(mj) 6 * 10^{16}$ و در انفجار طبقه چهارم $4 * 10^{16} (mj)$ می‌باشد و در نتیجه با افزایش ارتفاع انرژی جنبشی کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل‌های (۹) الی (۱۴) و نوع خرابی‌های مدل دیوار برشی فولادی و مدل‌های دیوار برشی با یک لایه بتن و دو لایه بتن و نمودارهای اشکال (۱۵) و (۱۶) انرژی جذب شده می‌توان نتیجه گرفت که دیوار برشی فولادی در زمان

نمودارهای اشکال (۱۵) و (۱۶) میزان انرژی جذب شده سیستم در ۳ مدل را نمایش می‌دهند. بر اساس این نمودارها با تغییر مدل دیوار برشی دارای یک لایه بتن به مدل دیوار برشی دو لایه بتن انرژی جذب شده سیستم از $(mj) 1.5 * 10^{16}$ به مقدار $5.7 * 10^{16} (mj)$ افزایش می‌یابد (۳۸٪ افزایش) و همین‌طور انرژی جنبشی نیز از مقدار $(mj) 3.9 * 10^{16}$ به مقدار $6 * 10^{16} (mj)$ افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با تبدیل ستون‌ها به CFT، نتایج مدل فولادی که شامل ستون‌های باکس فولادی و دیوار برشی فولادی می‌باشد در مقایسه با مدل دیوار برشی فولادی با یک لایه بتن و ستون‌های باکس پر شده با بتن (CFT)، انرژی جنبشی از مقدار $(mj) 5.95 * 10^{16}$ به مقدار $(mj) 3.9 * 10^{16}$ برای مدل یک لایه بتن رسیده و برای



شکل ۱۵- نمودارهای انرژی جذب شده (ورودی) سیستم (ALLIE)-انرژی جنبشی سیستم (ALLKE) برای طبقه اول



شکل ۱۶- نمودارهای انرژی جذب شده (ورودی) سیستم (ALLIE)-انرژی جنبشی سیستم (ALLKE) برای طبقه چهارم

تعیین شده به حداکثر مقدار تنش خود رسیده است و دچار حذف المان شده است، در نتیجه حداکثر انرژی جذب شده سیستم در زمان تعیین شده، به مقدار 3×10^{16} (mj) می‌باشد و در مقایسه با مدل‌های دیگر، شکل‌های (۱۳) و (۱۴) که دچار حذف المان نشده‌اند و به مقدار ماکزیمم مقدار تنش خود نرسیده‌اند، برای مدل دیوار برشی دارای یک لایه بتن و سپس دیوار برشی دارای دو لایه بتن، به ترتیب مقادیر جذب انرژی 1.5×10^{16} (mj) و 5.6×10^{16} (mj) می‌باشد، و با توجه به توزیع تنش‌ها که به ماکزیمم مقدار خود نرسیده‌اند، اگر مدل تحت بارهای بسیار بیشتر انفجاری قرار داده شود نمودارهای جذب انرژی قابلیت افزایش را خواهند داشت، ولی در مدل دیوار برشی فولادی بدون لایه بتنی به دلیل حصول ماکزیمم مقدار تنش‌ها و رخداد حذف المان، ورق برشی فولادی قادر به تحمل تنش بیشتر نخواهد بود.

در بررسی نمودارهای اشکال (۱۵) و (۱۶) انرژی جذب شده در موقعیت‌های انفجار طبقه اول و چهارم در مدل دیوار برشی فولادی به همراه دو لایه بتن به ترتیب از مقدار 5.7×10^{16} (mj) به مقدار 0.8×10^{16} (mj) رسیده است که روند کاهشی شدید انرژی جذب شده با تغییر محل انفجار از طبقه اول به سمت بام را مشاهده می‌شود و هرچه محل انفجار در طبقات بالاتر از تراز پایه رخ دهد انرژی جذب شده سیستم کاهش پیدا خواهد کرد.

در بررسی شیب نمودارهای اشکال (۱۵) و (۱۶) انرژی جنبشی و انرژی جذب شده در طبقات اول و چهارم مشاهده می‌شود که هر چه، محل انفجار از تراز بام به طرف تراز پایه جابه‌جا شود ارتعاش سازه در زمان طولانی‌تر میرا می‌شود و هر چه محل انفجار از تراز پایه به تراز بام نزدیک‌تر شود، پریود ارتعاش سازه کوتاه‌تر می‌شود و در انفجارهای طبقات پایین، سازه دارای پریودهای ارتعاشی بزرگتری خواهد بود و دارای تغییر مکان جانبی بیشتر می‌باشد و احتمال خرابی سازه در اثر جابجایی بزرگتر، زیاد است. و با اضافه کردن بتن به ستون‌های باکس فولادی پریود ارتعاشی سازه در اثر انفجار در طبقات پایین‌تر افزایش می‌یابد.

با

۴- نتایج

در این پژوهش یک مطالعه جامع بر روی دیوار برشی فولادی مرکب به همراه ستون‌های باکس فولادی پر شده با بتن در یک سازه ۸ طبقه تحت بارگذاری انفجار در هوا انجام شده است و پارامترهای اصلی در مدل‌سازی، تعداد لایه بتنی دیوار برشی فولادی مرکب، بارگذاری انفجار در هوا، مقدار و فاصله ماده منفجره TNT، بوده و بر اساس این پارامترها، نتایج و مشاهدات زیر بدست آمده است:

۱- با توجه به مقدار و فاصله ماده منفجره TNT از سازه، بحرانی‌ترین طبقه برای انفجار در طبقه اول، خرابی طبقه هفتم می‌باشد.

۲- با اضافه کردن یک لایه بتن به دیوار برشی فولادی در مرحله اول و سپس دو لایه بتن در مرحله دوم از تخریب کامل ورق برشی جلوگیری شده و تغییر شکل‌ها از پانچ شدن ورق برشی تحت بار انفجار به شکل کماتش گنبدی شکل ارتقاء می‌یابد. همین امر موجب کاهش خسارات به اعضای مرزی مهم از جمله ستون و تیرها می‌شود و جذب انرژی انفجار در ورق برشی فولادی انجام می‌شود.

۳- با توجه به نمودارهای انرژی جذب شده و انرژی جنبشی در انفجار طبقه اول دیوار برشی می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه کردن دو لایه بتن به دیوار برشی مرکب نسبت به یک لایه انرژی جذب شده سیستم ۳۸٪ افزایش یافته است.

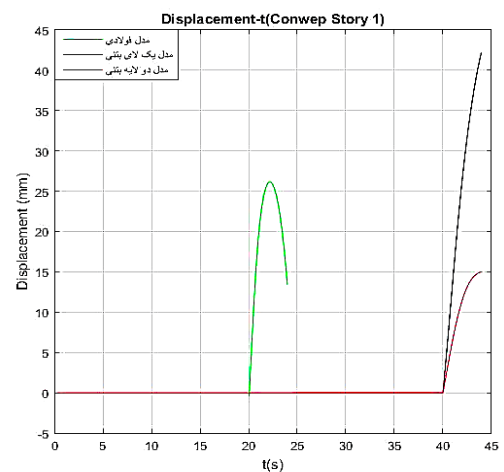
۴- با اضافه کردن لایه بتنی به ورق برشی فولادی، میزان جذب انرژی در بارهای انفجاری بزرگتر بسیار زیاد می‌شود و به عبارت دیگر در مدل مقاوم‌سازی شده سازه عملکرد مناسبی در برابر بارهای انفجاری بزرگتر، نشان می‌دهد.

۵- تبدیل ستون‌ها به CFT، در کاهش انرژی جنبشی موثر می‌باشد ولی اضافه کردن لایه‌های بتن به دیوار برشی موجب افزایش انرژی جنبشی تحت بارگذاری مورد نظر می‌شود.

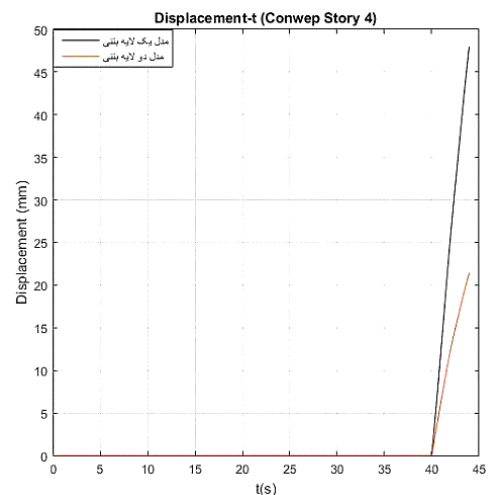
۶- با افزایش ارتفاع محل انفجار در سازه، انرژی جنبشی سیستم روند کاهشی داشته است.

۷- میانگین جابجایی خارج از صفحه ورق برشی، دیوار برشی شامل دو لایه بتن در مقایسه با دیوار برشی شامل یک لایه بتن به میزان ۶۳٪ کاهش یافته است و نوع خرابی‌ها از گسیختگی ورق برشی به کماتش ورق برشی تغییر پیدا کرده‌اند.

با توجه به نمودارهای اشکال (۱۷) و (۱۸) (نمودارهای جابجایی-زمان) که میمیانگین جابجایی المان‌های ورق برشی در نظر گرفته شده است، و با توجه به تصاویر توزیع تنش‌ها نتیجه گیری می‌شود که، تاثیر بسیار زیاد اضافه کردن لایه‌های بتنی به ورق برشی، زمانی از جنبه جابجایی یا کماتش ورق برشی فولادی ملموس‌تر خواهد بود، که سازه تحت بارهای بزرگ انفجاری قرار داده شود تا حداکثر باربری و حداکثر مقدار جابجایی‌ها را در دیوارهای برشی مقاوم‌سازی شده مشاهده گردد. همچنین بر اساس این نمودارها میانگین جابجایی خارج از صفحه ورق برشی، دیوار برشی شامل دو لایه بتن در مقایسه با دیوار برشی شامل یک لایه بتن به میزان ۶۳٪ کاهش یافته است، و نوع خرابی‌ها از گسیختگی ورق برشی به کماتش ورق برشی تغییر پیدا کرده‌اند.



شکل ۱۷- نمودار جابجایی- زمان برای طبقه اول



شکل ۱۸- نمودار جابجایی- زمان برای طبقه چهارم

Conference on Our World in Concrete & Structures; 2009; Hotel Park Royal, Singapore.

[10] Luccioni B-M, Luege M. Concrete Pavement Slab Under Blast Loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2006; 32(8): 1248–1266.

[11] Warn GP, Bruneau M. Blast Resistance of Steel Plate Shear Walls Designed for Seismic Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2009; 135(10): 1222–1230.

[12] FEMA 453. Design guidance for shelters and safe rooms, Federal Emergency Management Agency (FEMA). 2006; Document No (2006), FEMA.

[13] UFC 3-340-02-5. Structures to resist the effects of accidental explosions, Unified facilities criteria (UFC), 2008.

[14] Hu Y, Zhao J, Zhang D, Zhang H. Cyclic tests of fully prefabricated concrete-filled double-skin steel tube/moment-resisting frames with beam-only-connected steel plate shear walls. *Thin-Walled Structures*. 2020; 146: 106272.

[15] Arabzadeh A, Soltani M, Ayazi A. Experimental investigation of composite shear walls under shear loadings. *Thin-Walled Structures*. 2011; 49(7): 842–854.

[16] CEE. 09.4. Steel plate shear wall research and design, Seattle University Engineering Design Team, Department of civil and environmental engineering, University of Washington, 2009

۵- مراجع

[1] Zhang Z, Jingfeng W, Beibei Li, Chunfeng Z. Seismic Tests and Numerical Investigation of Blind-Bolted Moment CFST Frames Infilled with Thin-Walled SPSWs. *Thin-Walled Structures*. 2019; 134: 347–362.

[2] Sabouri-Ghomi S, Ventura C, Kharrazi M. Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls. *Journal of Structural Engineering*. 2005; 131(6): 878–889.

[3] Yu J-G, Xiao-Tian F, Bo Li, Ji-Ping H. Cyclic Performance of Cross Restrained Steel Plate Shear Walls with Transverse Braces. *Thin-Walled Structures*. 2018; 132: 250–264.

[4] Astaneh-Asl A, Heydari C, Zhao Q. Analysis of car-bomb effects on buildings using MSC-dytran software and protective measures. *Proceeding of the MSC Software Virtual Product Development Conference*; 2003; Dearborn, Michigan.

[5] Moghimi H, Driver R-G. Performance Assessment of Steel Plate Shear Walls Under Accidental Blast Loads. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 106: 44–56.

[6] Tao Z, Wei Li, Bo-Lin S, Han L-H. Behaviour of Bolted End-Plate Connections to Concrete-Filled Steel Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017; 134: 194–208.

[7] Zhang F, Chengqing W, Hongwei W, Zhou Y. Numerical Simulation of Concrete Filled Steel Tube Columns Against BLAST Loads. *Thin-Walled Structures*. 2015; 92: 82–92.

[8] Xue J, Yunshan H, Tiansheng L, Liu Y. Study on the Dynamic Response of the Concrete-Filled Steel Tube Under Blast Load. *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*; 2011; Xianning, China.

[9] Jayasooriya R, Thambiratnam D, Perera N, Kosse V. Response and damage evaluation of reinforced concrete frames subjected to blast loading, In *Proceedings of the 34th*

Investigation on the Behavior of Composite Steel Plate Shear Walls with CFT Columns under Blast Load

Hossein Parvini Sani

Department of Civil Engineering, College of Engineering, Zanzan Branch, Islamic Azad University, Zanzan, Iran

Shahram Mohammadi

Department of Civil Engineering, College of Engineering, Zanzan Branch, Islamic Azad University, Zanzan, Iran

Abstract

Based on the importance of explosion of the specific structures with composite steel shear wall and concrete-filled steel box columns (CFT), this study investigates the effect of explosion on such a structures. An 8-story steel structure with steel shear wall as a lateral resisting system and CFT columns was designed, then was modeled under blast loading in the air. This study presents that by addition of two concrete layers to the composite shear wall, with respect to the case with one layer, considering the constant amount and distance of the explosive material TNT from the structure the average out-of-plane displacement of the shear plate is decreased by 63% and also the type of damage has changed from the failure of the shear plate to buckling of the shear plate. As well the stress concentration is transferred from the plate and boundary elements connection to the center of the plate and the absorbed energy has increased by 380%.

Keywords

Steel plate shear wall, Composite steel plate shear wall, Blast load, CFT columns, Energy absorption