

بررسی اثر انفجار بر عملکرد اتصالات تیر به ستون سپری پیچی با فرض خرابی دیوارهای آجری محصور کننده

سید امیرالدین صدرنژاد^۱، * مسعود ضیائی^۲

چکیده

با در نظر گرفتن تهدیدات تروریستی و خصمانه علیه کشور، بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر انفجار از اهمیت به سزایی برخوردار است. یکی از مهمترین اعضای سازه‌ای که عملکرد کلی سازه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند اتصالات تیر به ستون هستند. عملکرد نامطلوب و خرابی این اتصالات می‌تواند باعث خرابی موضعی و در گام بعد بروز خرابی پیش رونده در سازه و فروری آن گردد. در این مقاله اثر بارگذاری انفجار بر عملکرد اتصالات تیر به ستون سپری پیچی مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع اتصال به وفور در سازه‌های فولادی در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اطمینان از نتایج مدل‌سازی اجزای محدود، در ابتدا صحت سنجی مدل با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی انجام شده است. پس از اطمینان از دقت روش اجزای محدود در شبیه‌سازی رفتار اتصال، تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام گرفته است. به دلیل وجود تقارن تنها ۱/۸ از اتاق مورد مطالعه مدل‌سازی شده است. وزن ماده منفجره معادل ۱۵ کیلوگرم TNT در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که وقوع انفجار در داخل اتاق باعث بروز کماتش پیچشی در تیر می‌گردد. همچنین ملاحظه گردید که این نوع اتصال رفتار نسبتاً شکل‌پذیری در برابر بارگذاری انفجار دارد.

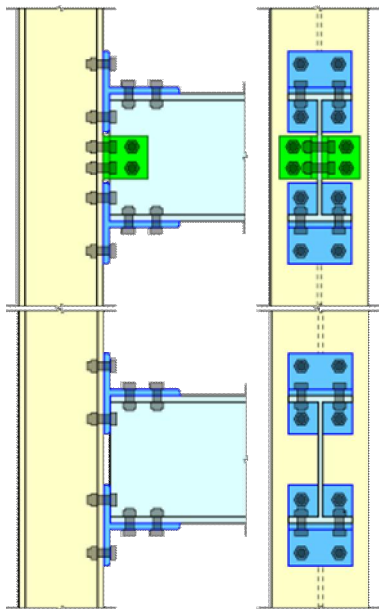
کلمات کلیدی

انفجار، اتصال تیر به ستون سپری پیچی، روش اجزای محدود، تحلیل دینامیکی غیرخطی

۱. استاد دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی sadrnejad@kntu.ac.ir

۲. * دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی mziaei@dena.kntu.ac.ir

نماید. این نوع اتصال در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: اتصال تیر به ستون سپری پیچی با و بدون استفاده از نبشی جان

نبشی‌ها می‌توانند با استفاده از تیر ورق و یا نصف کردن مقاطع I شکل ساخته شوند. این سپری‌ها با پیچ‌هایی با عملکرد برشی به بال تیر متصل می‌شوند. اتصال سپری به ستون با استفاده از پیچ‌هایی که در کشش عمل می‌کنند و به این انجام می‌پذیرد. معمولاً یک نوار برشی^۲ در کارخانه به بال ستون جوش داده می‌شود و این نوار برشی برای تقویت اتصال به جان تیر پیچ می‌شود.

۲ - مروری بر تحقیقات گذشته

بررسی اثر انفجار بر اتصالات سازه‌های فولادی در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. با این حال تعداد و نوع اتصالات بررسی شده، به دلیل هزینه بالای آزمایشات و نیز پیچیدگی‌های موجود در روش‌های عددی، بسیار محدود است.

در سال ۱۹۹۹ Krauthammer [۱] رفتار اتصالات تیر به ستون فولادی و بتنی را به صورت عددی مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی نشان داد که در نظر گرفتن

پدافند غیرعامل^۱ مجموعه اقداماتی است که انجام می‌شود تا در صورت بروز جنگ، خسارات احتمالی به حداقل میزان خود برسد. به بیان دیگر هر اقدام غیر مسلحانه‌ای که موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها، تاسیسات، تجهیزات، اسناد و شریان‌های کشور در مقابل عملیات خصمانه و مخرب دشمن گردد، پدافند غیرعامل گفته می‌شود. هدف از اجرای طرح‌های پدافند غیرعامل کاستن از آسیب‌پذیری نیروی انسانی و تاسیسات و تجهیزات حیاتی و حساس و مهم کشور علیرغم حملات خصمانه و مخرب دشمن و استمرار فعالیت‌ها و خدمات زیربنایی و تامین نیازهای حیاتی و تداوم اداره کشور در شرایط بحرانی ناشی از جنگ است.

یکی از روش‌های در نظر گرفتن پدافند غیرعامل، مقاوم سازی سازه‌های موجود در برابر بارگذاری انفجار و طراحی سازه‌های جدید با در نظر گرفتن اصول طراحی مقاوم در برابر انفجار است. یکی از مهمترین اجزای سازه‌ای که می‌تواند عملکرد کلی سازه را به شدت تحت تاثیر قرار دهد اتصالات تیر به ستون می‌باشد. عملکرد نادرست و خرابی اتصالات در اثر بارگذاری غیرعادی انفجار می‌تواند منجر به قطع مسیر انتقال بار گشته و در گام بعد با ایجاد خرابی پیش‌رونده باعث خرابی بخش بزرگی از سازه و یا حتی فروریزش کلی سازه گردد. بنابراین واضح است که بررسی عملکرد این اتصالات در برابر انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اتصالات تیر به ستون پیچی یکی از کاربردی ترین نوع اتصالات در کشور می‌باشند. در بین اتصالات پیچی نیز اتصال ساخته شده با استفاده از سپری به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع اتصال دارای سختی اولیه قابل ملاحظه‌ای است. همچنین استفاده از پیچ به دلیل شکل پذیری بیشتر در مقایسه با جوش، می‌تواند عملکرد مناسبتری از دیدگاه جذب انرژی انفجار برای اتصال فراهم

^۲ Shear tab

^۱ Passive Defense

جزئیات ویژه برای تامین ایمنی اتصالات در برابر بارگذاری انفجار ضروری است. همچنین نشان داده شد که اتصالات جوشی که مطابق آیین نامه TM5-1300 [۲] ایمن در نظر گرفته شده‌اند ممکن است در اثر مقدار ماده منفجره مجاز به دلیل شکست جوش‌ها دچار خرابی گردند. بعلاوه ملاحظه گردید که تغییر رفتار مکانیکی فولاد در کرنش های با نرخ بالا از اهمیت زیادی برخوردار است.

در سال ۲۰۰۵ Sabuwala و همکاران [۳] با استفاده از روش جزای محدود عملکرد اتصالات تیر به ستون صلب را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. مدل سازی با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS [۴] انجام گرفت. کفایت معیارهای ذکر شده در TM5-1300 مورد بررسی قرار گرفت و نقاط بحرانی اتصال مشخص گردید. نتایج مدل های اجزای محدود نشان می‌دهد که معیارهای آیین نامه ذکر شده براب مقاومت در برابر بارگذاری انفجار کفایت نمی‌کند. به‌علاوه، اتصالات صلب تقویت نشده مورد بررسی عملکرد ضعیفی در برابر بارگذاری انفجار دارند و خیز بالا و تنشهایی بالاتر از تنش جاری شدن در اتصال به وجود می‌آید.

در سال ۲۰۰۸ Hyun و Krauthammer [۵] رفتار اتصالات تحت بارگذاری انفجار و ضربه را مورد بررسی قرار دادند. سختی، مقاومت نهایی و شکل پذیری پارامترهایی بودند که در این تحقیق به صورت نمودارهای بار-ضربه مورد بررسی قرار گرفتند. در گام بعد نمودارهای حاصله برای اتصالات تیر به ستون در قاب‌های ساده سازی شده مورد استفاده قرار گرفتند. در این تحقیق تنها اتصال صلب تیر به ستون با استفاده از ورق اتصال بال تیر مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه گرفته شد که استفاده از نمودارهای بار-ضربه می‌تواند در شبیه سازی رفتار قاب‌های فولادی ساده سازی شده بطور موثری مورد استفاده قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۱ Arciszewski Urgessa [۶] عملکرد سه نوع اتصال تیر به ستون در برابر بارگذاری انفجاری ناشی از کامیون حامل مواد منفجره را مورد بررسی قرار دادند. اتصالات در دو حالت معمولی و مقاوم سازی شده با

استفاده از صفحه جانبی مورد بررسی قرار گرفتند. منحنی های تاریخچه زمانی با استفاده از نرم افزار FEFLO [۷] که یک نرم افزار دینامیک سیال محاسباتی است بدست آمد. ملاحظه گردید که رفتار اتصالات تقویت شده با صفحه کناری بهتر از اتصالات بدون تقویت بوده است.

در سال ۲۰۱۱ ساعدی و ضیائی [۸] رفتار اتصالات نیمه گیردار نبشی بالا و پایین به همراه نبشی بال را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. برای انجام تحقیق نرم افزار اجزای محدود ANSYS [۹] مورد استفاده قرار گرفت. کفایت معیارهای ذکر شده در آیین نامه و نیز موهای خرابی اتصالات ذکر شده در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت.

۳- بارگذاری انفجار

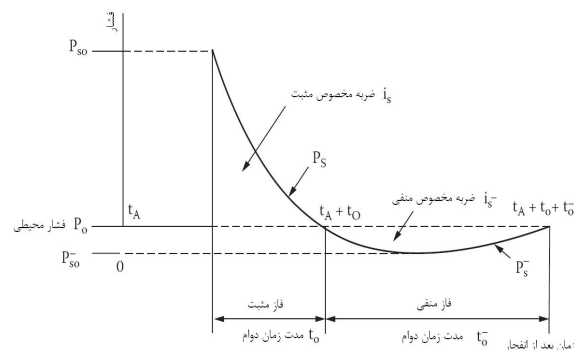
۳-۱- انفجار خارج از سازه

شکل عمومی تاریخچه فشار-زمان مربوط به موج شوک یک انفجار هوایی در هوای آزاد در شکل ۲ نشان داده شده است. جبهه موج به دلیل افزایش ناگهانی فشار ناشی از وقوع انفجار لزوماً عمودی است. فشار حداکثر ناشی از انفجار P_{so} در انتهای این فاز اولیه (زمان افزایش) قرار دارد. فشار ناشی از وقوع انفجار فشاری است که بر سطح موازی با جهت انتشار وارد می‌شود. سرعت انتشار V با زمان و فاصله کاهش می‌یابد ولی معمولاً از مقدار سرعت صوت در محیط بیشتر است.

جبهه شوک در زمان t_a به هدف می‌رسد. بعد از گذشت t_r ثانیه از زمان رسیدن به هدف یعنی t_a ، فشار به میزان حداکثر خود یعنی P_{so} خواهد رسید. از آنجایی که فاصله زمانی مابین رسیدن جبهه شوک به هدف و وقوع فشار حداکثر، t_r ، بسیار کوتاه است، می‌توان فرض کرد که رسیدن به مقدار فشار حداکثر بصورت آنی بعد از رسیدن جبهه شوک اتفاق می‌افتد. فشار حداکثر P_{so} در مدت زمان t_0 افت نموده و برابر با فشار اولیه محیط می‌شود که این فاصله به عنوان فاز مثبت ضربه فشار تعریف می‌گردد.



بعد از این مرحله، فاز منفی اتفاق می افتد که به مدت t_0^- ادامه خواهد داشت و در این فاصله میزان فشار از میزان فشار اولیه محیط کمتر خواهد بود و مسیر باد (حرکت ذرات) معکوس خواهد شد. فاز منفی در طراحی اهمیت چندانی ندارد و معمولاً از آن صرف نظر می شود. مقدار ضربه ای که در اثر موج انفجار به هدف وارد میگردد برابر مساحت زیر منحنی فاز مثبت منحنی فشار- زمان است و با i_s نمایش داده می شود.



شکل ۲: منحنی تاریخچه زمانی زمان-فشار ناشی از انفجار

۲-۳- انفجار داخل سازه

حالت پیچیده تری از شرایط انفجار وقتی به وجود می آید که انفجار در داخل یک فضای محدود شده اتفاق بیفتد. پدیده انفجار-زمان در این حالت در ابتدا بسیار شبیه شرایط کروی و نیم کروی است که مشخصه آن یک افزایش فشار ناگهانی است که به عنوان فاز فشار شوک تعریف می شود. فاز شوک به سطوحی که فضای بسته را ایجاد نموده اند برخورد نموده و آنها را بارگذاری می کند و همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در نتیجه این برخورد امواج شوک انعکاسی تولید می شود. مدت زمان دوام فاز فشار شوک بسیار کوتاه است و می توان آن را از روی سرعت جبهه شوک و فاصله بین ماده منفجره و سطوح مختلف تخمین زد. بعد از فاز شوک، محیط انفجاری بسیار پیچیده می شود و تعریف آن بسیار دشوار خواهد بود. امواج شوک انعکاس یافته منتشر شده و با سطوح مختلف موجود در محیط اندرکنش انجام می دهد. هر کدام از این اندرکنش ها امواج شوک انعکاسی جدیدی

تولید می کند و این پروسه برای مدت زمان قابل توجهی ادامه خواهد داشت. در همین زمان، گازهای با فشار و دمای بالا که از انفجار تولید شده است در داخل فضای بسته انبساط پیدا می کند. این فاز محیط انفجار را فاز فشار گاز^۳ می گویند که در اثر نشت گاز از فضای بسته و نیز سرد شدن دمای گازها، فشار به فشار محیط خواهد رسید. مدت زمان دوام فاز فشار گاز بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از مدت زمان دوام فاز فشار شوک است. به دلیل این مدت دوام طولانی، این فاز را شبه استاتیک^۴ نیز می گویند.

تاریخچه فشار-زمان در انفجار داخلی به میزان زیادی وابسته به عملکرد دیوارهای محصور کننده سازه بستگی دارد. در صورتی که این دیوارها تا پایان بارگذاری انفجار باقی بمانند اثرات انعکاس فشار قابل توجه است. در این مقاله فرض شده است که دیوارهای آجری اطراف اتاق در ابتدای بارگذاری انفجار از بین می روند و از آنجایی که دیگر سطح قابل توجهی برای انعکاس موج فشار باقی نمی ماند می توان از انعکاس های ثانویه صرف نظر نمود.

۴- مدل سازی اجزای محدود

۴-۱- صحت سنجی مدل اجزای محدود

قبل از مدل سازی اتصال برای بررسی رفتار آن باید از صحت و دقت نتایج پیش بینی شده توسط روش اجزای محدود اطمینان حاصل نمود. برای این کار نتایج اندازه گیری شده در یک آزمایش معتبر باید با مقادیر حاصل از مدل اجزای محدود متناظر با نمونه آزمایش شده مقایسه شوند و در صورت انطباق نتایج می توان به نتایج حاصل از مدل سازی اتصال اطمینان نمود.

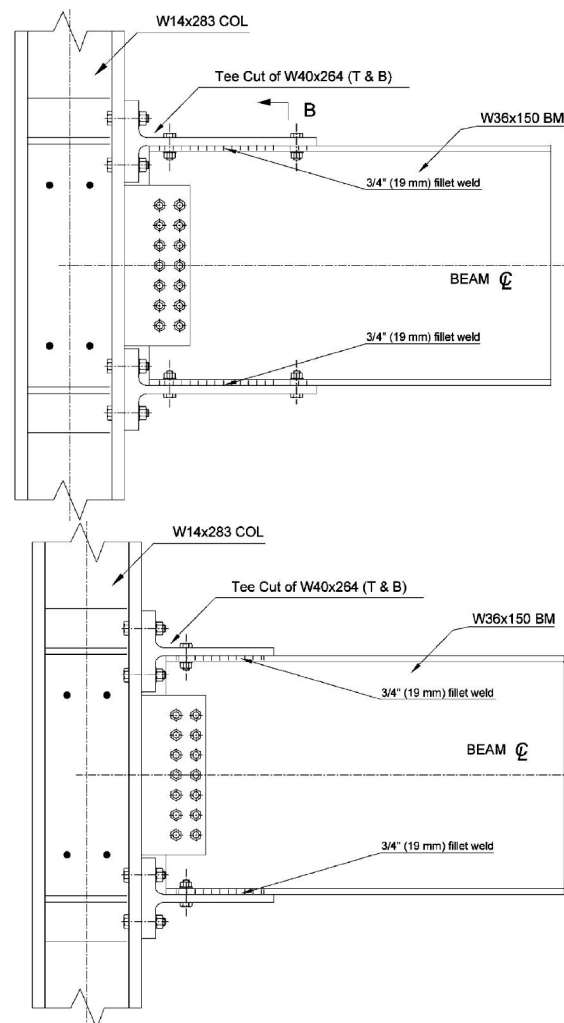
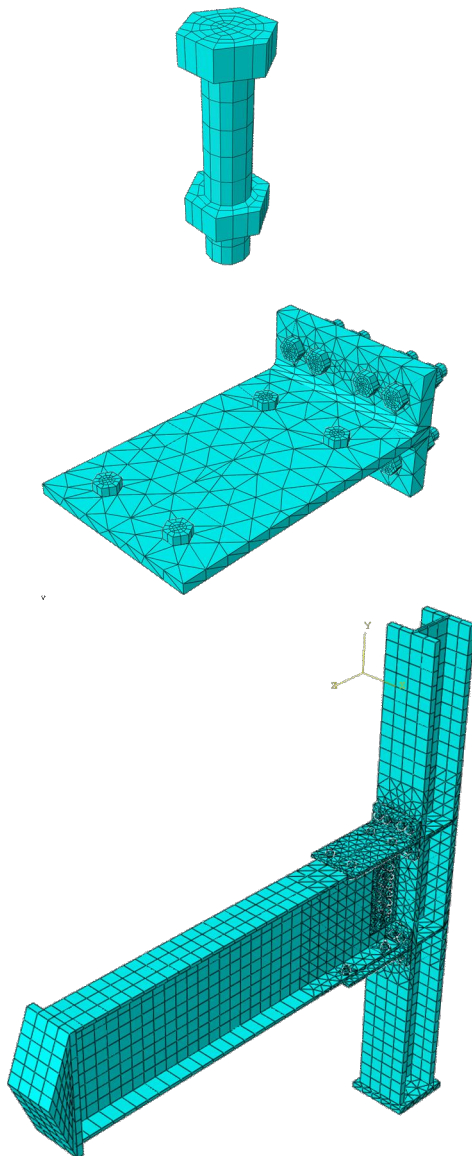
آزمایشی که برای این کار انتخاب گردیده است آزمایشی است که در سال ۲۰۰۲ توسط Popov و Takhirov بر روی نمونه های اتصال سپری پیچی انجام گرفته است. دو نمونه آزمایش شده در شکل ۳ نشان داده شده است و خصوصیات مکانیکی آنها در جدول ۱ ارایه شده است.

³ Gas pressure phase

⁴ Quasi-static



اتصال که نیاز به دقت بالاتر وجود دارد از مش بندی ریزتر استفاده شده است و اندازه مش‌ها با دور شدن از محل اتصال افزایش داده شده است تا زمان مورد نیاز برای تحلیل کاهش یابد. شرایط تکیه‌گاهی به گونه ای اختصاص داده شده است تا شرایط تکیه‌گاهی آزمایش به دقت شبیه‌سازی گردد.



شکل ۳: مشخصات پروفیل های استفاده شده در نمونه‌های آزمایش شده

جدول ۱: مشخصات مکانیکی پروفیل‌های استفاده شده تیر، ستون و سپری

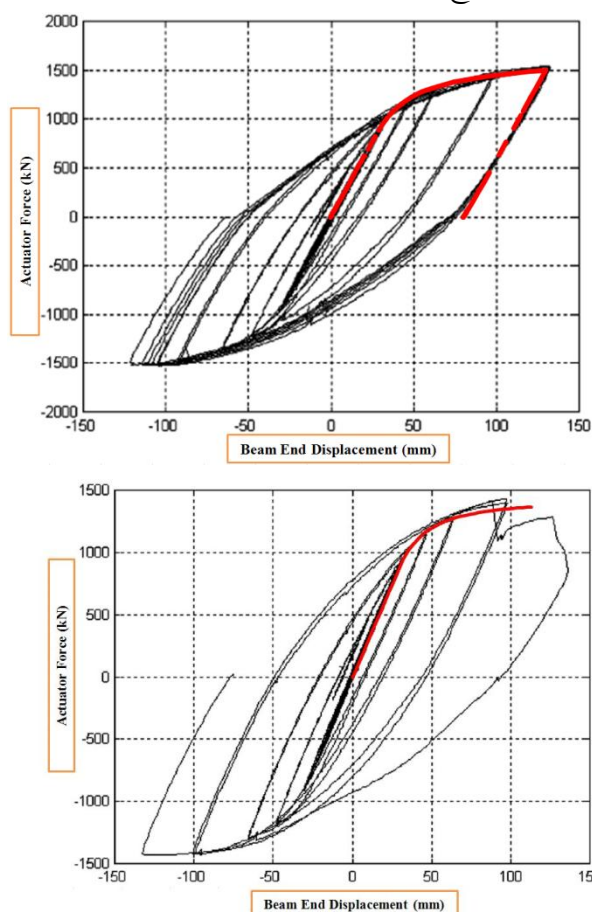
عضو	پروفیل استفاده شده	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (Mpa)
تیر	W36x150	۳۹۰	۵۱۲,۶
ستون	W14x283	۳۵۸,۸	۴۵۴,۷
سپری	W40x264	۴۴۱	۵۴۴,۳

تحلیل بارافزون بر روی مدل‌های ساخته شده انجام شده است و نتایج حاصل از آزمایش و مدل اجزای محدود برای اتصال اول و دوم در شکل ۵ مقایسه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود انطباق مناسبی بین نتایج

مدل اجزای محدود دو نمونه ذکر شده در بالا با در نظر گرفتن تمامی جزئیات ساخته شده است. در ساخت مدل از المان‌های ۴ گرهی هرمی شکل و نیز المان‌های ۸ گرهی مکعبی شکل استفاده گردیده است. در نواحی نزدیک به

TNT به وزن ۱۵ کیلوگرم قرار گرفته است. در تحلیل فرض شده است که تمامی دیوارهای سازه در اثر انفجار تخریب شده و بنابراین از انعکاس‌های ثانویه موج انفجار صرف‌نظر گردیده است.

وجود دارد و این امر توانایی نرم‌افزار اجزای محدود در پیش‌بینی صحیح رفتار اتصال را اثبات می‌نماید.



شکل ۵: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش (با رنگ سیاه) و نتایج مدل اجزای محدود (با رنگ قرمز) برای نمونه اول (راست) و نمونه دوم (چپ)

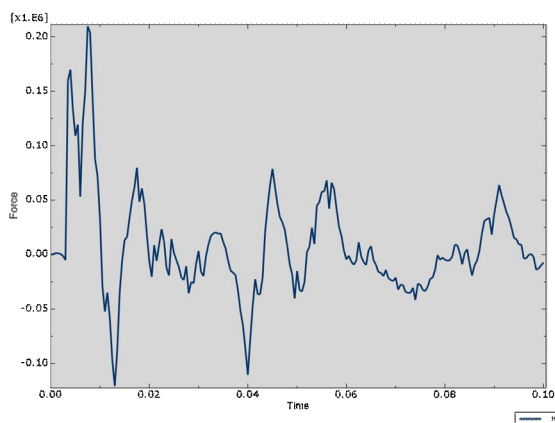
شکل ۶: سازه طراحی شده در نرم افزار ETABS

تحلیل دینامیکی صریح غیرخطی انجام گرفته است و نتایج در شکل ۷ تا ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تیر دچار کماتش پیچشی گردیده است و حداکثر تغییر مکان تیر در جهت عمود بر امتداد آن ۲/۰۷ سانتی متر بوده است.

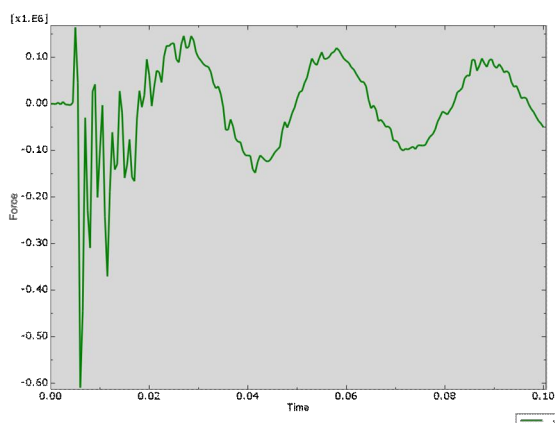
۲-۴- شبیه‌سازی رفتار اتصال در بارگذاری انفجار

ارتفاع اتاق مورد مطالعه برابر ۳٫۵ متر و ابعاد اتاق ۷×۷ متر در نظر گرفته شده است. سازه ای ۷ طبقه در نرم افزار ETABS طراحی شده و لنگر و برش آن برای طراحی اتصال سپری به کار برده شده است. سازه طراحی شده در شکل ۶ نشان داده شده است.

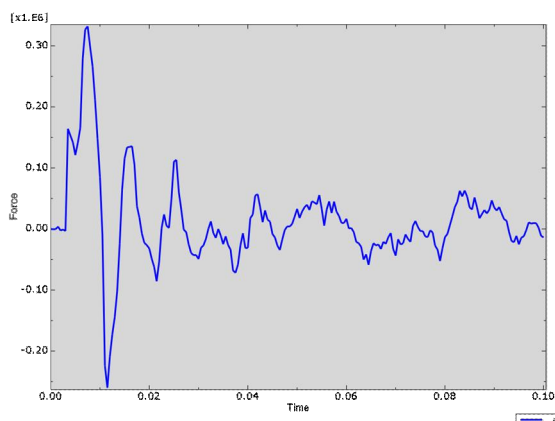
سپس مدل دقیق اتصال به همراه تیر و ستون و با در نظر گرفتن تمامی جزئیات در نرم افزار ABAQUS ساخته شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد به دلیل وجود تقارن در مدل تنها ۱/۸ اتاق مدل‌سازی شده است. سازه با استفاده از روش CONWEP تحت تاثیر ماده منفجره



شکل ۹: نمودار تاریخچه زمانی نیرو در جهت محور X



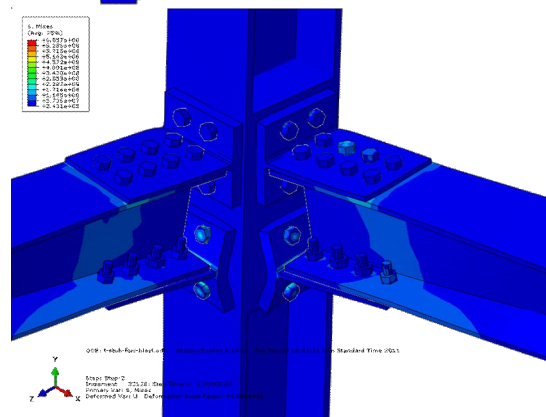
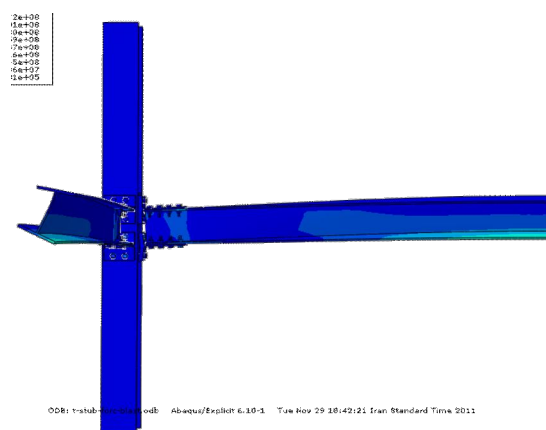
شکل ۱۰: نمودار تاریخچه زمانی نیرو در جهت محور Y (محور عمودی)



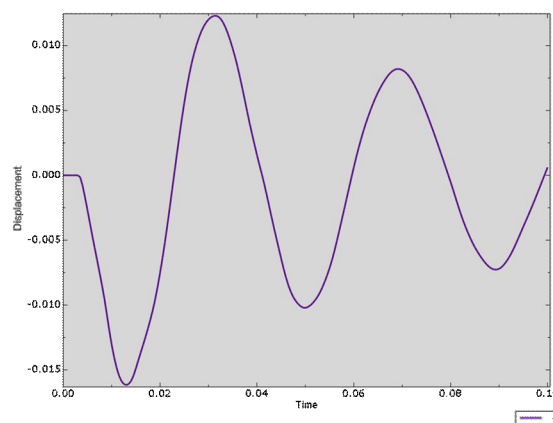
شکل ۱۱: نمودار تاریخچه زمانی نیرو در جهت محور Y (محور عمودی)

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌ای با اتصالات صلب سپری پیچی مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطمینان از صحت نتایج مدل اجزای محدود، صحت سنجی



شکل ۷: تغییر شکل ۲ میلی ثانیه بعد از وقوع انفجار در اتاق



شکل ۸: نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان وسط تیر در جهت عمود بر امتداد آن

- [6]. Urgessa G., Arciszewski T., Blast response comparison of multiple steel frame connections, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 47, Issue 7, Pages 668-675, 2011
- [7]. FEFLO, Naval Research Laboratory (NRL), Laboratory for Computational Physics and Fluid Dynamics (LCP&FD), Washington DC, USA
- [8]. Saedi Daryan A., Ziaei M., Sadrnejad S.A., The behavior of top and seat bolted angle connections under blast loading, Journal of Constructional Steel Research, Volume 67, Issue 10, Pages 1463-1474, 2011
- [9]. ANSYS finite element software, ANSYS Inc.
- [10]. Egor P. Popov, Shakhzod M. Takhirov, "Bolted large seismic steel beam-to-column connections Part 1: experimental study", Engineering Structures, 24, pp. 1523-1534, 2002

در گام اول انجام شده است و انطباق بسیار نزدیکی بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج پیش بینی شده توسط مدل اجزای محدود ملاحظه گردیده است. در گام بعد سازه اتاق با استفاده از نرم افزار ETABS طراحی و تحلیل شده و نتایج حاصل از این تحلیل برای طراحی اتصال به کار گرفته شده است.

پس از طراحی اتصال، مدل اجزای محدود اتصال با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مصالح و هندسی و مدلسازی دقیق تمامی اجزای سازه صورت گرفته است. بار انفجار با استفاده از روش CONWEP که یکی از معروفترین روشهای اعمال بارگذاری انفجار بر سازه‌ها می باشد بر سازه وارد شده و تحلیل دینامیکی صریح انجام گرفته است. نتایج تحلیل نشان می دهد که تیر در اثر بار انفجاری دچار کمزش پیچشی گردیده است. این امر به نوبه خود باعث ایجاد پیچش در سپری ها شده است. حداکثر کرنش در ساق پیچ‌هایی اتفاق افتاده است که سپری پایین را به بال تیر متصل می کنند. لقی پیچ‌ها تاثیر زیادی در جذب انرژی انفجار داشته و به سازه کمک نموده است تا بتواند انرژی بسیار زیاد ناشی از ماده منفجره را مستهلک و جذب نماید. همانطور که در شکل ملاحظه می شود اتصال رفتاری شکل پذیر در برابر انفجار داشته و توانسته است بار در نظر گرفته شده را با حفظ مسیر انتقال بار تحمل نماید.

مراجع

- [1]. Krauthammer T., Blast-resistant structural concrete and steel connections, International Journal of Impact Engineering, Volume 22, Issues 9-10, Pages 887-910, 1999
- [2]. TM5-1300, Structure to resist the effects of accidental explosions, USA army, 1990
- [3]. Sabuwala T., Linzell D., Krauthammer T., Finite element analysis of steel beam to column connections subjected to blast loads, International Journal of Impact Engineering, Volume 31, Issue 7, Pages 861-876, 2005
- [4]. ABAQUS finite element software, Simulia Inc.
- [5]. Hyun C., Krauthammer T., Load-impulse characterization for steel connection, International Journal of Impact Engineering, Volume 36, Issue 5, Pages 737-745, 2009

