

## بررسی اثر انفجار بر عملکرد اتصالات تیر به ستون سپری پیچی

سید امیرالدین صدرنژاد<sup>۱</sup>، مسعود ضیائی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۲/۲۵

### چکیده

با در نظر گرفتن تهدیدات تروریستی و خصمانه علیه کشور و نیاز مبرم به در نظر گرفتن پدافند غیرعامل در سازه‌ها برای کاهش خسارات جانی و مالی در اثر انفجار داخل یا خارج از سازه‌ها، بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر انفجار از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین اعضای سازه‌ای که عملکرد کلی سازه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد اتصال تیر به ستون است. عملکرد نامطلوب و خرابی این اتصالات می‌تواند باعث خرابی موضعی و در گام بعد، بروز خرابی پیش رونده در سازه و فروریزی آن گردد. در این مقاله اثر بارگذاری انفجار بر عملکرد اتصالات تیر به ستون سپری پیچی مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع اتصال در سازه‌های فولادی در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای انجام این تحقیق، روش اجزای محدود و نرم‌افزار ABAQUS که یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای اجزای محدود موجود است مورد استفاده قرار گرفته است. برای اطمینان از نتایج مدل‌سازی اجزای محدود، در ابتدا صحت‌سنجی مدل با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی انجام شده و انطباق مناسبی بین نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل اجزای محدود و نتایج اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مشاهده گردیده است. پس از اطمینان از دقت روش اجزای محدود در شبیه‌سازی رفتار اتصال، تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بالای ناشی از انفجار انجام گرفته است. به دلیل وجود تقارن، تنها  $\frac{1}{8}$  از اتاق مورد مطالعه مدل‌سازی شده و 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 کمانش پیشگی در تیر می‌گردد. همچنین ملاحظه گردید که این نوع اتصال، رفتار نسبتاً شکل‌پذیری در برابر بارگذاری انفجار دارد.

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

۱- استاد و عضو هیئت علمی دانشکده عمران- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی Sadrnejad@kntu.ac.ir - نویسنده مسئول

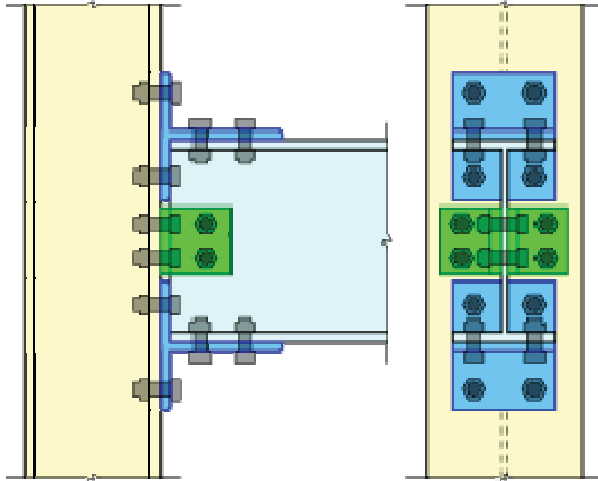
۲- دانشجوی دکترای مهندسی سازه- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی mziaei@dena.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

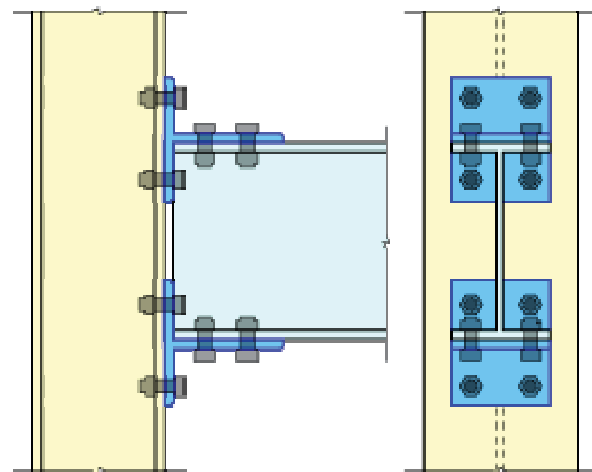
پدافند غیرعامل مجموعه اقداماتی است که انجام می‌شود تا در صورت بروز جنگ، خسارات احتمالی به حداقل میزان خود برسد. به بیان دیگر، به هر اقدام غیر مسلحانه‌ای که موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها، تاسیسات، تجهیزات، اسناد و شریان‌های کشور در مقابل عملیات خصمانه و مخرب دشمن گردد، پدافند غیرعامل گفته می‌شود.

یکی از روش‌های در نظر گرفتن پدافند غیرعامل، مقاوم‌سازی 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 گردد (شکل ۱). بنابراین واضح است که بررسی عملکرد این اتصالات در برابر انفجار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در کشش عمل می‌کنند انجام می‌پذیرد. معمولاً یک نوار برشی<sup>۱</sup> در کارخانه به بال ستون جوش داده می‌شود و این نوار برشی برای تقویت اتصال به جان تیر پیچ می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) اتصال تیر به ستون سپری پیچی با استفاده از نبشی جان، (ب) اتصال تیر به ستون سپری پیچی بدون استفاده از نبشی جان

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.



شکل ۱- گسیختگی اتصال ناشی از انفجار در سازه

اتصالات تیر به ستون سپری پیچی، یکی از کاربردی‌ترین 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 شکل‌پذیری بیشتر در مقایسه با جوش، می‌تواند عملکرد مناسبتری از دیدگاه جذب انرژی انفجار برای اتصال فراهم نماید. این نوع اتصال در شکل (۲) نشان داده شده است.

سپری‌ها 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

1- Shear tab

شده در آیین‌نامه و نیز مودهای خرابی اتصالات ذکر شده در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به اهمیت بررسی عملکرد اتصالات در برابر بارگذاری انفجار و نیز در نظر گرفتن کاربرد فراوان اتصالات سپری در سازه‌های فولادی، رفتار این نوع اتصالات در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی رفتار سازه در برابر بارگذاری انفجار، از روش اجزای محدود استفاده شده است. برای اطمینان از صحت پاسخ مدل‌های اجزای محدود، از آزمایش انجام شده توسط محققین قبلی استفاده شده است. پس از اطمینان از دقت روش اجزای محدود در شبیه‌سازی رفتار اتصال، تحلیل دینامیکی غیرخطی با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بالای ناشی از انفجار انجام گرفته است.

### ۳- بارگذاری انفجار

وقوع انفجار باعث تولید موج شوک<sup>۱</sup> (جبهه‌ای با فشار بالا که از نقطه وقوع انفجار شروع به حرکت می‌کند) می‌گردد که از فشار این جبهه با دور شدن از محل انفجار به تدریج کاسته می‌شود. مواد منفجره قوی متعارف (HE) مقادیر متفاوتی از فشار حداکثر، گرما و غیره تولید می‌کنند. در نتیجه، شرایط محیطی ایجاد شده در اثر انفجار یک ماده منفجره خاص با شرایط محیطی ایجاد شده توسط ماده انفجاری دیگر متفاوت خواهد بود. به منظور به‌دست آوردن ابزاری برای مقایسه، مواد منفجره مختلف را با مقدار " TNT معادل " آن‌ها می‌سجند. برای این کار از وزن معادل ماده منفجره در هوای آزاد استفاده می‌شود که عبارت است از مقدار وزنی TNT لازم برای ایجاد پارامترهای موج شوک معادل پارامترهای تولید شده به‌وسیله واحد وزن ماده منفجره مورد نظر.

یکی از عوامل مهم در تحلیل و طراحی سازه‌های محافظ، مقایسه اثرات سلاح‌های مختلف که در فواصل گوناگونی منفجر شده باشند بر روی سازه است. چنین مقایسه‌ای را می‌توان با استفاده از قوانین مقیاس قابل قبول انجام داد. یکی از این روش‌ها مقیاس کردن ریشه سوم است که برای مقایسه اثر انفجارها بر پایه ترازهای انرژی مربوطه است. اگر فرض شود که ماده منفجره‌ای به وزن W در فاصله R از محل مورد نظر منفجر شود، پارامترهایی مانند اضافه فشار، فشار دینامیکی، سرعت ذرات و غیره را می‌توان با استفاده از فرمول (۱) به پارامترهای ذکر شده مربوط به انفجار ماده منفجره‌ای به وزن W<sub>1</sub> در فاصله R<sub>1</sub> مربوط نمود.

$$\frac{R}{R_1} = \left( \frac{W}{W_1} \right)^{1/3} \quad (1)$$

در سال ۱۹۹۹، Krauthammer [۱] رفتار اتصالات تیر به ستون فولادی و بتنی را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی نشان داد که در نظر گرفتن جزئیات ویژه برای تامین ایمنی اتصالات در برابر بارگذاری انفجار ضروری است. همچنین نشان داده شد که اتصالات جوشی که مطابق آیین‌نامه 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 کرنش‌های با نرخ بالا از اهمیت زیادی برخوردار است.

در سال ۲۰۰۵ Sabuwala و همکاران [۳] با استفاده از روش اجزای محدود، عملکرد اتصالات تیر به ستون صلب را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی 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 مدل‌های اجزای محدود نشان می‌دهد که معیارهای آیین‌نامه ذکر شده برای 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 شکل‌پذیری 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 ساده‌سازی 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 شبیه‌سازی رفتار قاب‌های فولادی ساده‌سازی شده به‌طور موثری مورد استفاده قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۱، Arciszewski و 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 مقاوم‌سازی شده با استفاده از صفحه جانبی مورد بررسی قرار گرفتند. منحنی‌های تاریخچه زمانی با استفاده از نرم‌افزار FEFLO [۷] که یک نرم‌افزار دینامیک سیال محاسباتی است به‌دست آمد. ملاحظه گردید که رفتار اتصالات تقویت شده با صفحه کناری، بهتر از اتصالات بدون تقویت بوده است.

در سال ۲۰۱۱ ساعدی و همکاران [۸] رفتار اتصالات نیمه‌گیردار نبشی بالا و پایین به همراه نبشی بال را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. برای انجام این تحقیق، نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS [۹] مورد استفاده قرار گرفت. کفایت معیارهای ذکر

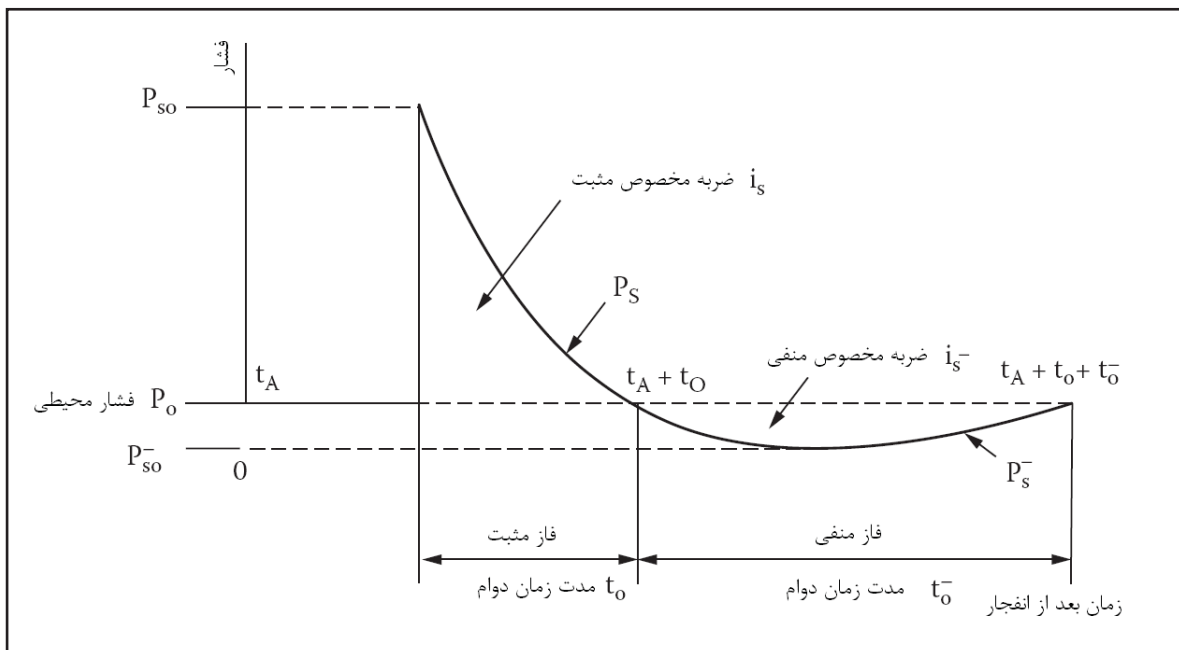
## ۳-۱- انفجار خارج از سازه

شکل عمومی تاریخچه فشار- زمان مربوط به موج شوک یک انفجار هوایی در هوای آزاد در شکل (۳) 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 به صورت 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 می‌افتد 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 صرفنظر می‌شود. مقدار ضربه‌ای که در اثر موج انفجار به هدف وارد می‌گردد برابر مساحت زیرمنحنی فاز مثبت منحنی فشار- زمان است و با  $\dot{I}_s$  نمایش داده می‌شود.

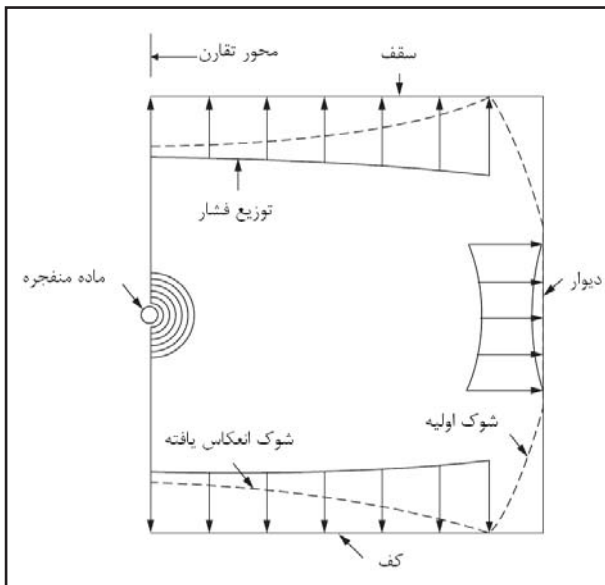
موج شوک تا زمانی که مانعی در برابر آن وجود نداشته باشد طبق رویه‌ای که در بالا ذکر شد منتشر خواهد شد. در صورتی که موج شوک به سطحی برسد که موازی جهت انتشار نیست (مانند دیوار یا یک سازه)، فشار انعکاسی تولید خواهد شد. فشار انعکاس یافته همان شکل کلی فشار تولید شده را دارد ولی همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، میزان فشار حداکثر آن بزرگ‌تر از فشار حداکثر موج اولیه است. فشار انعکاسی، به موج اولیه، زاویه مایل بین سطح انعکاس‌دهنده و راستای انعکاس موج بستگی دارد.

مدت زمان بقای فشار انعکاسی، به اندازه سطح انعکاس‌دهنده که نرخ جریان اطراف سطح را تعیین می‌کند بستگی دارد. این جریان ثانویه، باعث می‌شود تا فشار موج فشار انعکاس یافته در تمام محدوده تاریخچه فشار- دما یعنی از ناحیه فشار حداکثر تا ناحیه فشار حداقل کاهش یافته و به فشار ایستایی، یعنی میزانی که با فشار موجود در سرعت بالای متناظر با موج تولید شده در تعادل است، می‌رسد. در صورتی که جریان ثانویه باعث زوال فشار انعکاسی نشود (مانند حالتی که در آن، موج صفحه‌ای بی نهایت با دیوار بی نهایت بلندی تماس پیدا می‌کند)، موج تولید شده اولیه در تمامی نقاط سطح انعکاس یافته و مدت زمان دوام موج انعکاس یافته (فاز مثبت) برابر مدت زمان دوام موج تولید شده اولیه خواهد بود. ضربه واحد برای موج کاملاً انعکاس یافته در محدوده فاز مثبت با  $\dot{I}_{II}$  نشان داده می‌شود. طول موج فاز مثبت  $L_{II}$  برابر فاصله بین نقطه وقوع انفجار و آخرین نقطه‌ای که در یک زمان معین فشار مثبت را تجربه می‌کند می‌باشد.



شکل ۳- منحنی تاریخچه زمانی زمان- فشار ناشی از انفجار

ملاحظه‌ای بیشتر از مدت زمان دوام فاز فشار شوک است. به دلیل این مدت دوام طولانی، این فاز را شبه استاتیک<sup>۲</sup> نیز می‌گویند.



شکل ۵- فشار دینامیکی حداکثر  $q_0$  بر حسب فشار انفجار حداکثر  $P_{so}$

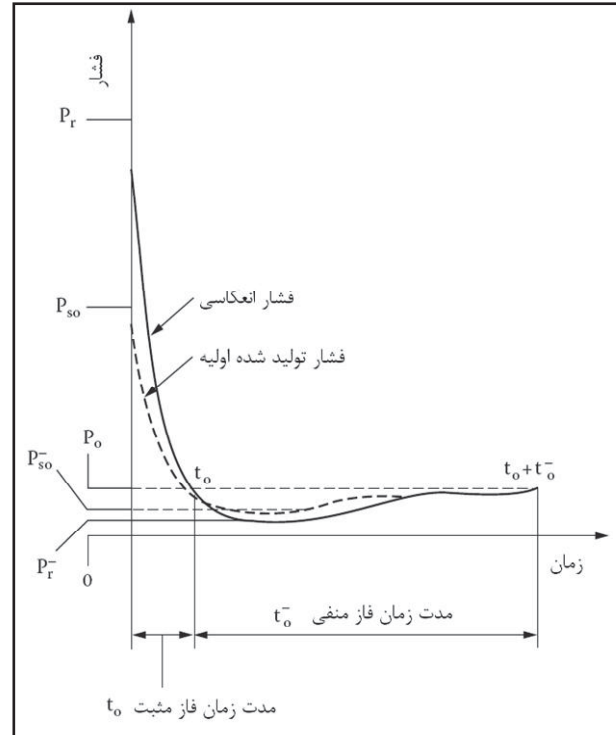
تاریخچه فشار- زمان در انفجار داخلی، به میزان زیادی وابسته به عملکرد دیوارهای محصور کننده سازه بستگی دارد. در صورتی که این دیوارها تا پایان بارگذاری انفجار باقی بمانند اثرات انعکاس فشار قابل توجه است. در این مقاله فرض شده است که دیوارهای آجری اطراف اتاق در ابتدای بارگذاری انفجار از بین می‌روند و از آنجایی که دیگر سطح قابل توجهی برای انعکاس موج فشار باقی نمی‌ماند می‌توان از انعکاس‌های ثانویه صرف‌نظر نمود.

#### ۴- مدل‌سازی اجزای محدود

##### ۴-۱- صحت سنجی مدل اجزای محدود

قبل از مدل‌سازی اتصال برای بررسی رفتار آن باید از صحت و دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط روش اجزای محدود اطمینان حاصل نمود. برای این کار نتایج اندازه‌گیری 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 می‌توان به نتایج حاصل از مدل‌سازی اتصال اطمینان نمود.

آزمایشی که برای این کار انتخاب گردیده است آزمایشی است که در سال ۲۰۰۲ توسط Popov و Takhirov بر روی نمونه‌های اتصال سپری پیچی انجام گرفته است. دو نمونه آزمایش شده در شکل (۶) نشان داده شده است و خصوصیات مکانیکی آن‌ها نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

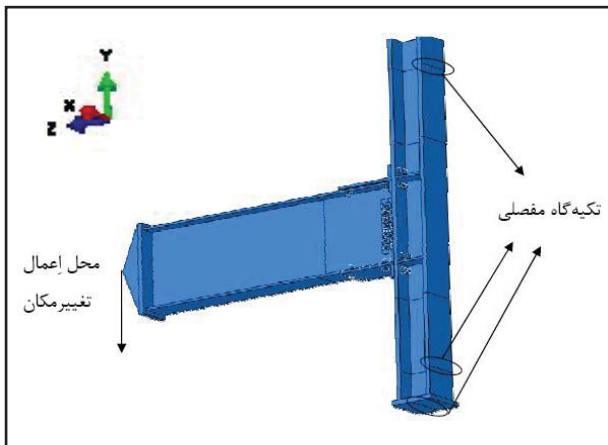


شکل ۴- تاریخچه فشار- زمان معمول موج انعکاسی

#### ۳-۲- انفجار داخل سازه

حالت پیچیده‌تری از شرایط انفجار وقتی به وجود می‌آید که انفجار در داخل یک فضای محدود شده اتفاق بیفتد. پدیده انفجار-زمان در این حالت در ابتدا بسیار شبیه شرایط کروی و نیم‌کروی است که مشخصه آن یک افزایش فشار ناگهانی است که به عنوان فاز فشار شوک تعریف می‌شود. فاز شوک به سطوحی که فضای بسته را ایجاد نموده‌اند برخورد نموده و آن‌ها را بارگذاری می‌کند. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، در نتیجه این برخورد، امواج شوک انعکاسی تولید می‌شود. مدت زمان دوام فاز فشار شوک بسیار کوتاه است و می‌توان 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 می‌شود و تعریف آن بسیار دشوار خواهد بود. امواج شوک انعکاس یافته منتشر شده و با سطوح مختلف موجود در محیط، اندرکنش انجام می‌دهد. هر کدام از این اندرکنش‌ها امواج شوک انعکاسی جدیدی تولید می‌کند 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 می‌کند. این فاز محیط انفجار را فاز فشار گاز<sup>۱</sup> می‌گویند که در اثر نشت گاز از فضای بسته و نیز سرد شدن دمای گازها، فشار به محیط خواهد رسید. مدت زمان دوام فاز فشار گاز به‌طور قابل

شده است تا شرایط تکیه‌گاهی آزمایش به دقت شبیه‌سازی گردد. بارگذاری مطابق شرایط آزمایش به صورت اعمال تغییر مکان در لبه انتهایی تیر می‌باشد. این بارگذاری به گونه‌ای اعمال شده است تا انتهای تیر به صورت مفصلی عمل نماید. انتهای تیر در نمونه اول ۱۳۰ میلیمتر و در نمونه دوم ۱۱۰ میلیمتر به طرف پایین حرکت داده شده است تا بارگذاری انجام شده در آزمایش را شبیه‌سازی نماید. با توجه به دستگاه آزمایش، سه تکیه‌گاه مفصلی برای سازه تعبیه شده است. در شکل (۷) وضعیت تکیه‌گاه‌ها و نحوه اعمال بار نشان داده شده است.

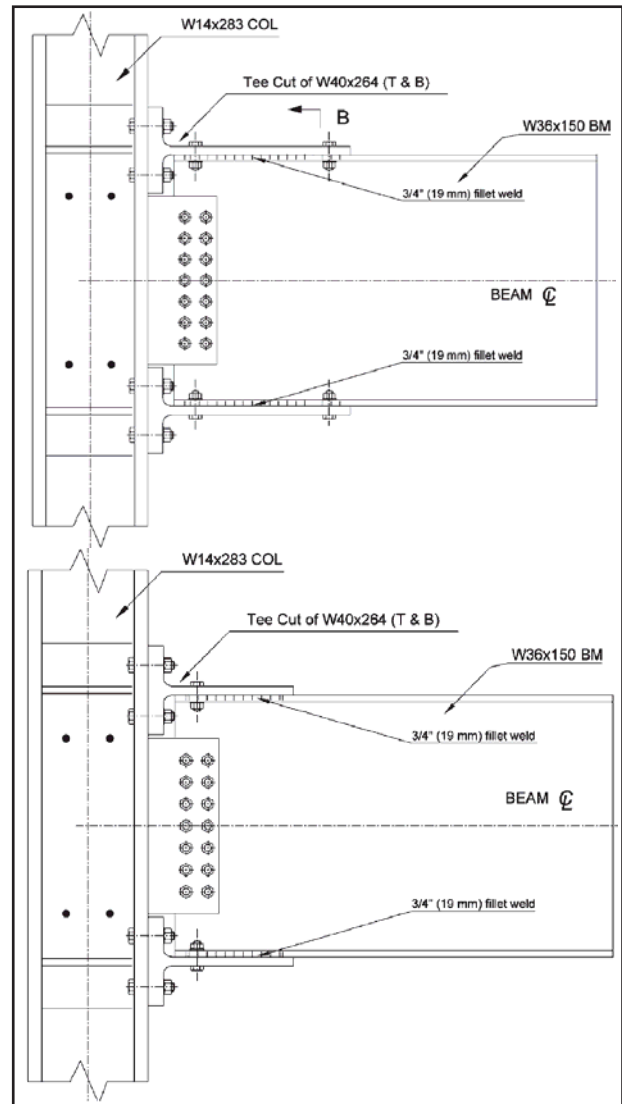


شکل ۷- تکیه‌گاه‌ها و نحوه اعمال بار

ارتباط بین پیچ‌ها و محل قرار گیری آن‌ها با استفاده از گزینه تماس در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. برای تعریف تماس بین اعضاء، دو نوع خصوصیت تماس لازم، یعنی خصوصیت تماس عمودی (عدم عبور اعضاء در حال تماس از یکدیگر) و خصوصیت تماس مماسی (به صورت ضریب اصطکاک به میزان ۰/۳) به نرم‌افزار معرفی گردیده است. در مش‌بندی اعضایی که بین آن‌ها تماس تعریف شده است سعی شده تا مش‌بندی اعضاء در سطح تماس حدالمقدور مشابه باشد.

در ساخت مدل از المان‌های ۴ گرهی هرمی‌شکل و نیز المان‌های ۸ گرهی مکعبی‌شکل استفاده گردیده است. در نواحی نزدیک به اتصال که نیاز به دقت بالاتر وجود دارد از مش‌بندی 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. مدل مش‌بندی‌شده اتصال اول در شکل (۸) نشان داده شده است.

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 (۹) مقایسه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود انطباق مناسبی بین نتایج وجود دارد و این امر توانایی نرم‌افزار اجزای محدود در پیش‌بینی صحیح رفتار اتصال را اثبات می‌نماید.



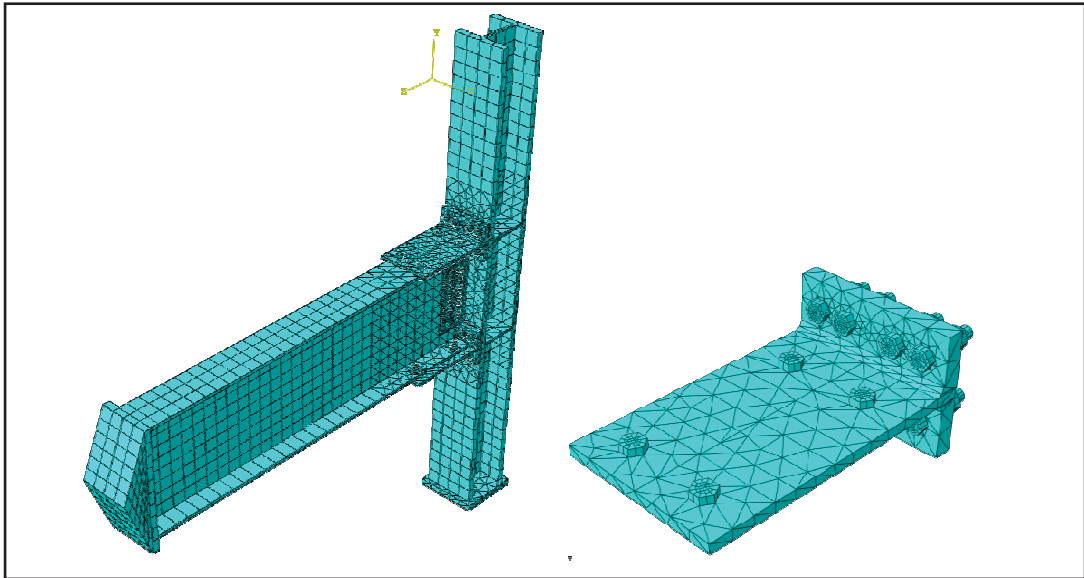
شکل ۶- مشخصات پروفیل‌های استفاده شده در نمونه‌های آزمایش شده

مدل رفتاری مورد استفاده برای شبیه‌سازی رفتار فولاد رفتار دوخطی با در نظر گرفتن سخت شوندگی کرنش مطابق اعداد ذکر شده در جدول (۱) بوده است.

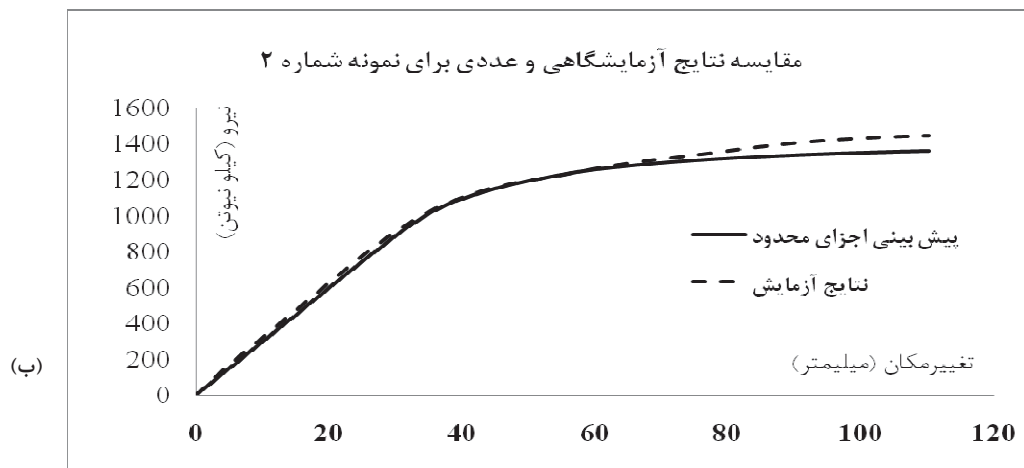
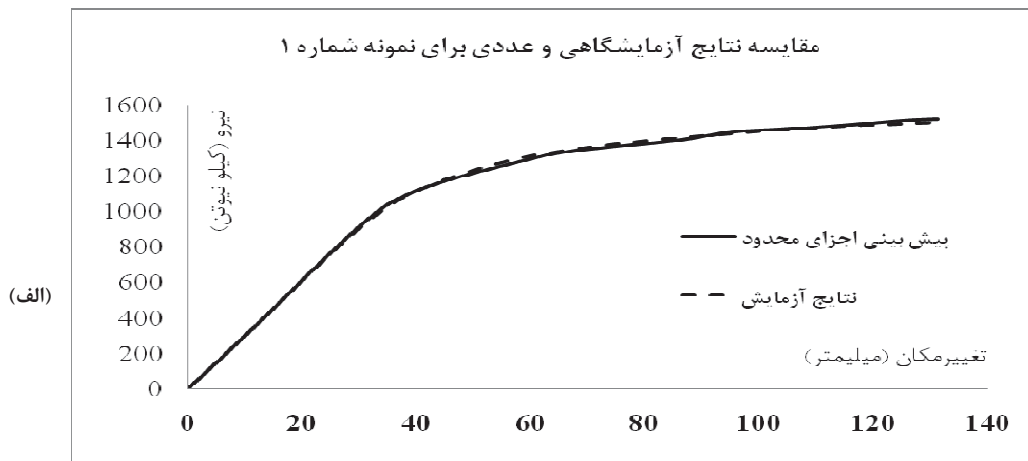
جدول ۱- مشخصات مکانیکی پروفیل‌های استفاده شده تیر، ستون و سپری

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

مدل اجزای محدود دو نمونه ذکر شده در بالا با در نظر گرفتن تمامی جزئیات ساخته شده است. شرایط تکیه‌گاهی به گونه‌ای اختصاص داده



شکل ۸- مدل اجزای محدود مش بندی شده اتصال اول و سپری آن

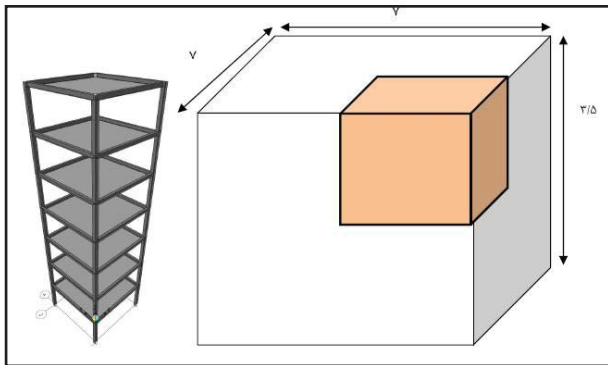


شکل ۹- (الف): مقایسه نتایج حاصل از آزمایش (خط توپر) و نتایج مدل اجزای محدود (خط چین)، (ب): مقایسه نتایج حاصل از آزمایش (خط توپر) و نتایج مدل اجزای محدود (خط چین)

جدول ۲- مقایسه نیروهای اندازه‌گیری شده در آزمایش و پیش‌بینی‌شده در مدل عددی در تغییر مکان‌های مشخص

نمونه ۲			نمونه ۱		
تغییر مکان	نیرو (آزمایش)	نیرو (مدل عددی)	تغییر مکان	نیرو (آزمایش)	نیرو (مدل عددی)
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۱۵۵	۱۷۶	۵	۱۶۱	۱۵۸
۱۴	۴۲۳	۴۴۸	۱۴	۴۳۱	۴۲۸
۲۶	۷۸۰	۸۱۰	۲۶	۷۹۷	۸۰۵
۳۵	۱۰۱۵	۱۰۲۶	۳۵	۱۰۳۲	۱۰۴۵
۴۴	۱۱۴۳	۱۱۵۰	۴۴	۱۱۷۲	۱۱۶۴
۵۶	۱۲۳۸	۱۲۳۶	۵۶	۱۲۸۹	۱۲۶۸
۶۵	۱۲۷۸	۱۲۹۳	۶۵	۱۳۴۱	۱۳۳۳
۷۴	۱۳۰۷	۱۳۳۵	۷۴	۱۳۷۹	۱۳۶۶
۸۶	۱۳۳۳	۱۳۹۰	۸۶	۱۴۱۸	۱۴۰۴
۹۵	۱۳۴۶	۱۴۲۰	۹۵	۱۴۴۲	۱۴۴۹
۱۰۴	۱۳۵۷	۱۴۳۸	۱۰۴	۱۴۶۲	۱۴۶۵
۱۱۰	۱۳۶۲	۱۴۴۶	۱۱۶	۱۴۸۴	۱۴۹۱
			۱۲۵	۱۴۹۷	۱۵۱۴
			۱۳۱	۱۵۰۴	۱۵۲۲

رفتاری با صرف‌نظر از ترم حرارتی در رابطه (۲) بیان شده است:



شکل ۱۰- سازه طراحی شده در نرم‌افزار ETABS

$$\sigma = [A + B\varepsilon^m][1 + C \ln \varepsilon^*] \quad (2)$$

در این رابطه  $A$ ,  $B$ ,  $m$  و  $n$  ثابت‌های مربوط به ماده هستند که از آزمایش قابل تعیین می‌باشد. پارامتر  $\sigma$  نشان‌دهنده تنش تسلیم و پارامتر  $\varepsilon$  بیانگر کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. پارامتر  $\varepsilon^*$  نرخ

#### ۲-۴- طراحی سازه مورد نظر

پس از اطمینان از توانایی روش اجزای محدود در پیش‌بینی دقیق عملکرد اتصال سپری پیچی، شبیه‌سازی اثر انفجار بر روی سازه انجام گرفته است. برای این کار یک اتاق از طبقه اول یک ساختمان که بحرانی‌ترین طبقه ساختمان است انتخاب گردیده است. ارتفاع اتاق مورد مطالعه برابر  $3/5$  متر و ابعاد اتاق  $7 \times 7$  متر در نظر گرفته شده است. سازه ۷ طبقه در نرم‌افزار ETABS طراحی شده و لنگر و برش آن برای طراحی اتصال سپری به کار برده شده است. بخشی از اتاق که مدل‌سازی شده و نیز سازه طراحی شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است..

سپس مدل دقیق اتصال به همراه تیر و ستون و با در نظر گرفتن تمامی جزئیات در نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد به دلیل وجود تقارن در مدل، تنها  $1/8$  اتاق در طبقه اول و دوم مدل‌سازی شده است. برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در رفتار مواد، مدل رفتاری جانسون-کوک [۱۱] برای شبیه‌سازی رفتار غیرارتجاعی فولاد مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل رفتاری، تنش تسلیم به صورت تابعی از کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما تعیین می‌گردد. معادله مربوط به این مدل



کرنش نرمالیزه شده است. مقادیر استفاده شده برای این ثابت‌ها در جدول (۳) ارایه شده است.

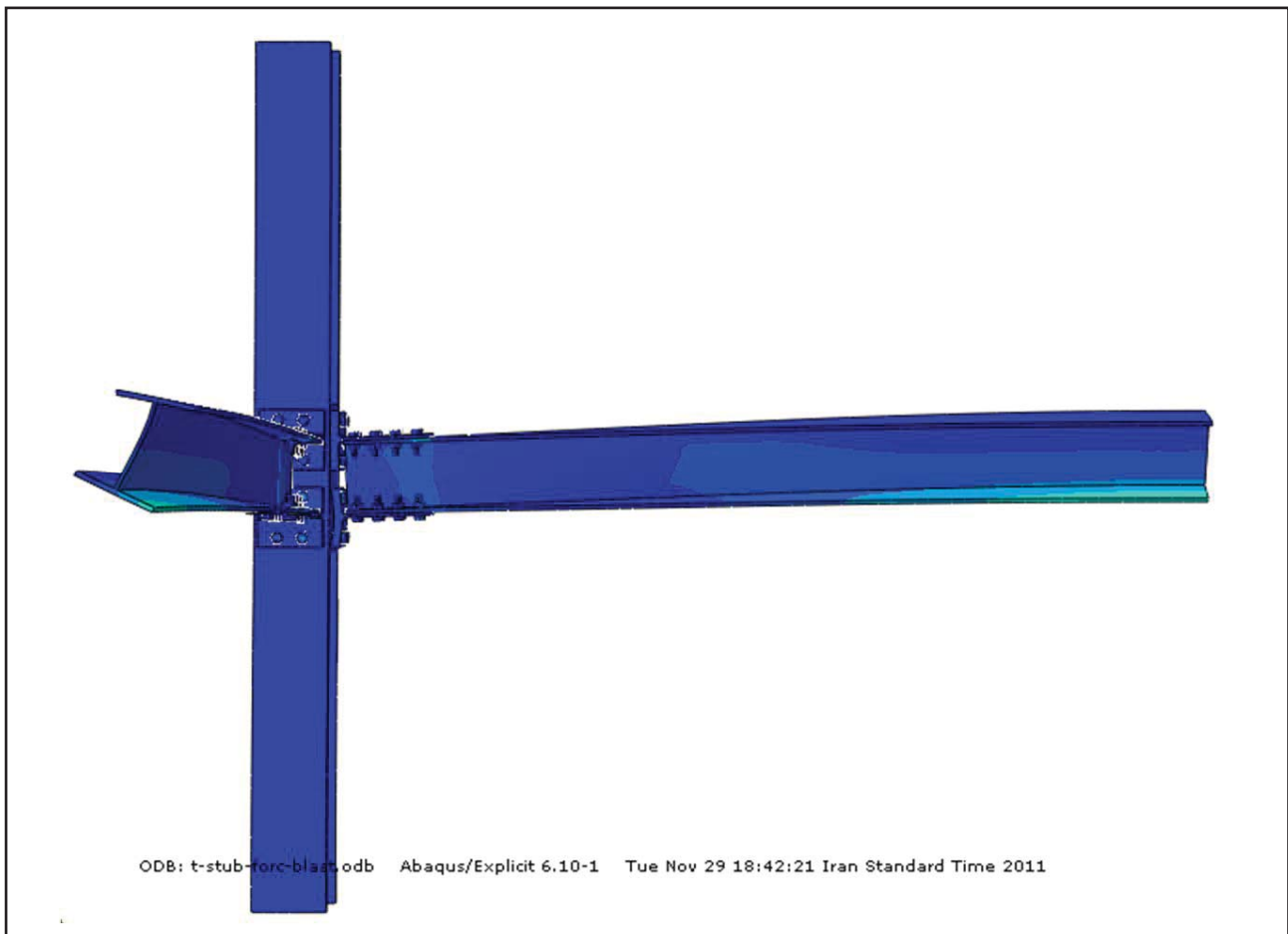
جدول ۳- مقادیر ثابت‌های مدل جانسون-کوک

A (MPa)	B	N	C
۳۵۰	۵۰۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴

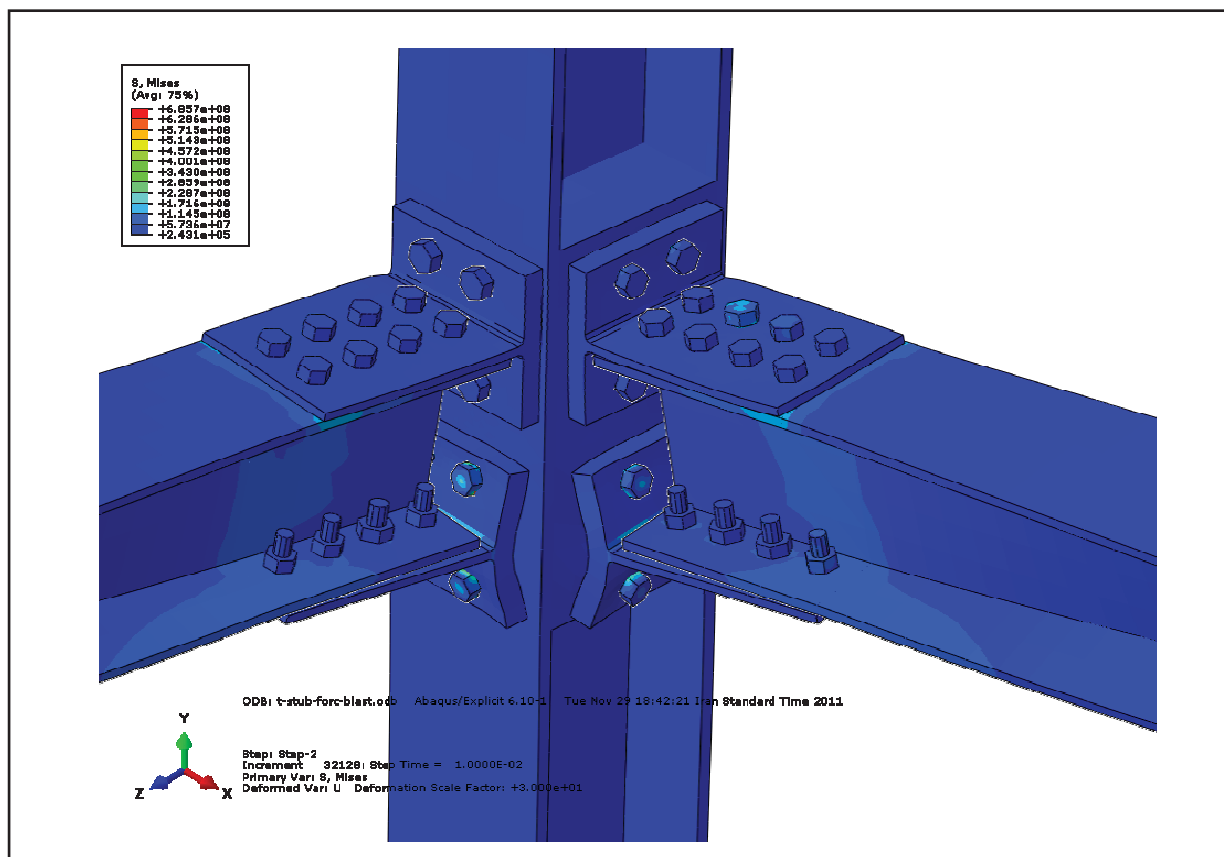
سازه با استفاده از روش CONWEP تحت تأثیر ماده منفجره TNT به وزن ۱۵ کیلوگرم که در مرکز اتاق فرض شده قرار گرفته است. در تحلیل فرض شده است که تمامی دیوارهای سازه در اثر انفجار تخریب شده و بنابراین از انعکاس‌های ثانویه موج انفجار صرف‌نظر گردیده است.

### ۵- نتایج حاصل از تحلیل

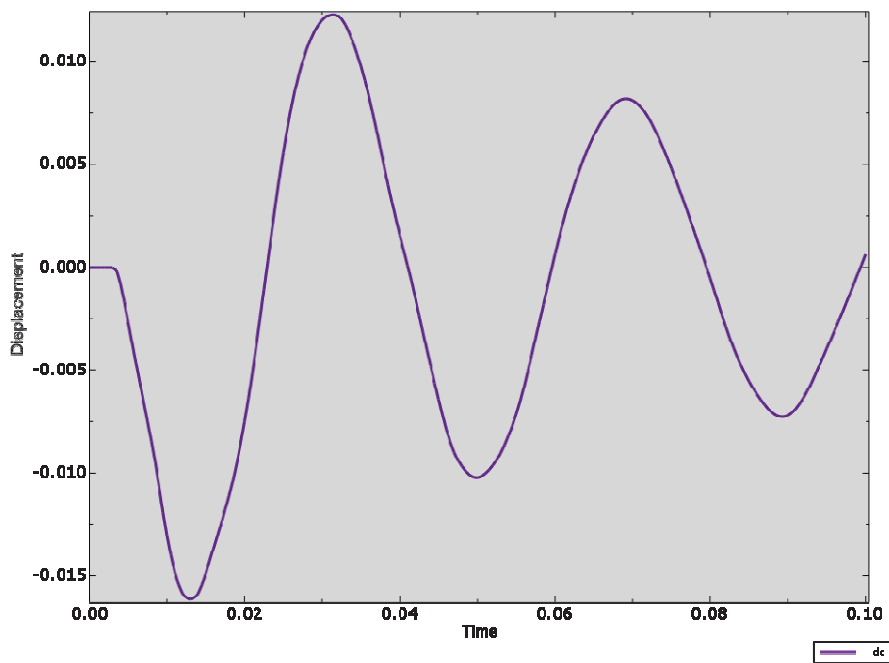
تحلیل دینامیکی صریح غیرخطی انجام گرفته و نتایج در شکل‌های (۱۱) تا (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیر دچار کماتش پیچشی گردیده و حداکثر تغییر مکان تیر در جهت عمود بر امتداد آن ۲/۰۷ سانتی‌متر بوده است. آسیب دیدگی و پلاستیک شدن اجزای اتصال در پیچ‌ها و سپری‌ها قابل مشاهده است. این امر در سپری‌های پایینی تیر به دلیل پیچش تیر شدت بیشتری دارد. محل اتصال بال سپری به جان آن دچار بیشترین تغییر شکل در سپری شده و پلاستیک شدن در این ناحیه قابل مشاهده است و بنابراین لازم است از اتصال صحیح و مناسب این دو قطعه به یکدیگر اطمینان حاصل گردد.



شکل ۱۱- تغییر شکل سازه (۲ میلی ثانیه بعد از وقوع انفجار در اتاق)



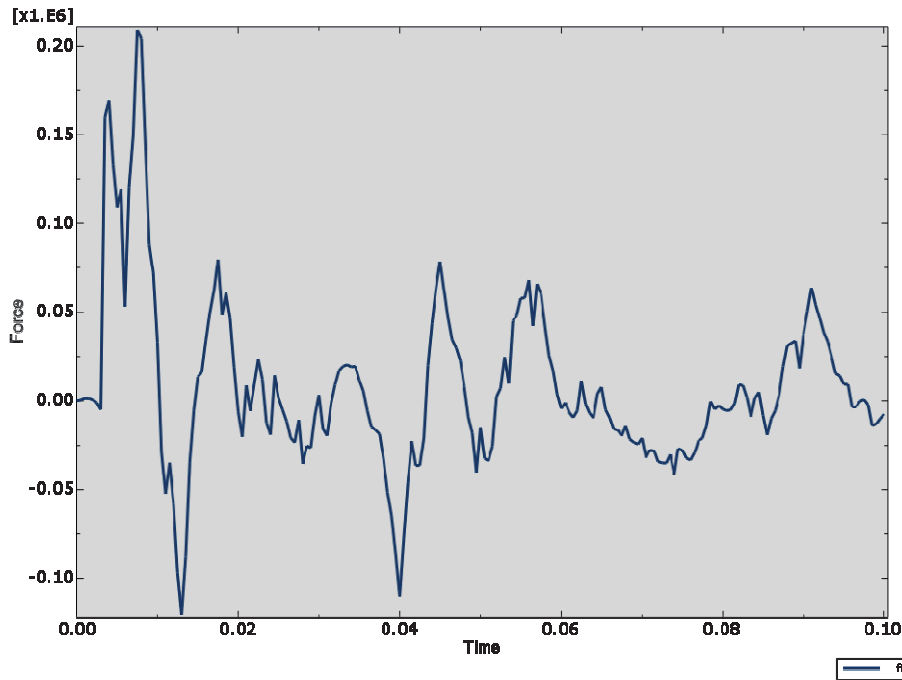
شکل ۱۲- تغییر شکل اتصال (۲ میلی ثانیه بعد از وقوع انفجار در اتاق)



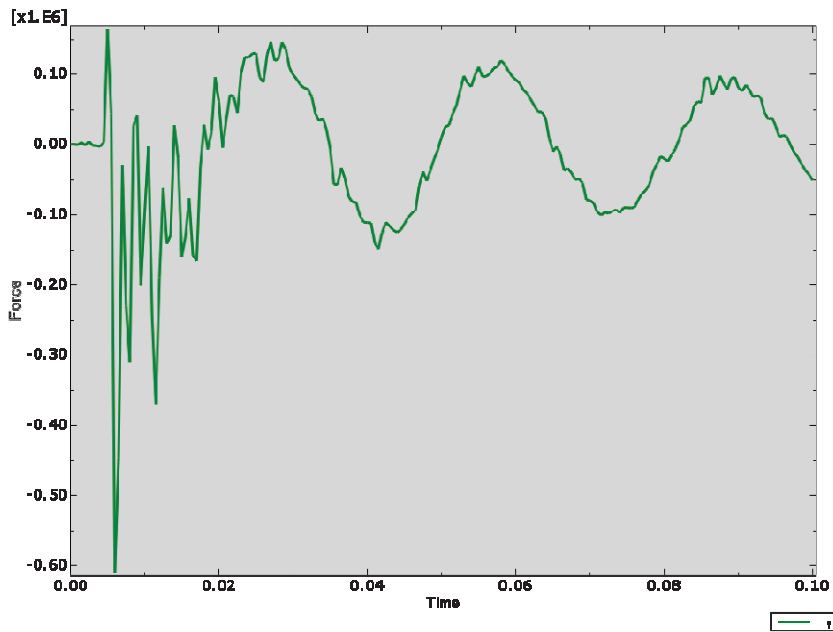
شکل ۱۳- نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان وسط تیر در جهت عمود بر امتداد آن (محور X)

تیر ایجاد می‌شود. با برطرف شدن فشار انفجار به دلیل خرابی دیوارها، سازه به ارتعاش آزاد ادامه می‌دهد و دامنه ارتعاش در هر سیکل ارتعاش کاهش می‌یابد.

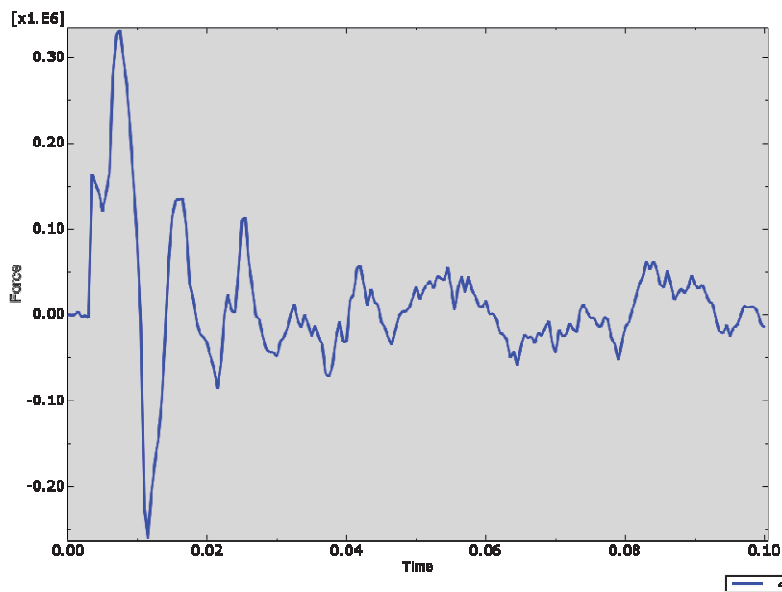
همان‌طور که در شکل (۱۳) ملاحظه می‌گردد، میزان تغییر مکان تا زمان رسیدن موج شوک به تیر و ستون برابر صفر است (حدود ۴ میلی‌ثانیه). سپس با وارد شدن موج شوک و اعمال فشار، تغییر مکان حداکثر در زمان ۱۲ میلی‌ثانیه و به میزان ۱/۷ سانتی‌متر در وسط



شکل ۱۴- نمودار تاریخچه زمانی نیرو در جهت محور X (محور افقی)



شکل ۱۵- نمودار تاریخچه زمانی نیرو در جهت محور Y (محور عمودی)



شکل ۱۶- نمودار تاریخچه زمانی نیرو در جهت محور Z (محور افقی)

ملاحظه گردیده است. در گام بعد، سازه اتاق با استفاده از نرم‌افزار 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 معمول‌ترین روش‌های اعمال بارگذاری انفجار بر سازه‌ها می‌باشد بر سازه وارد شده و تحلیل دینامیکی صریح انجام گرفته است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که تیر در اثر بار انفجاری دچار پیچش گردیده و این امر به نوبه خود باعث ایجاد پیچش در سپری‌ها شده است. حداکثر کرنش در ساق پیچ‌هایی اتفاق افتاده است که سپری پایین را به بال تیر متصل می‌کنند. آسیب دیدگی و پلاستیک شدن اجزای اتصال در پیچ‌ها و سپری‌ها قابل مشاهده است. این امر در سپری‌های پایینی تیر به دلیل پیچش تیر شدت بیشتری دارد. محل اتصال بال سپری به جان آن دچار بیشترین تغییر شکل در سپری شده و پلاستیک شدن در این ناحیه قابل مشاهده است و بنابراین لازم است از اتصال صحیح و مناسب این دو قطعه به یکدیگر اطمینان حاصل گردد. مشاهده گردید که اتصال، رفتاری شکل‌پذیر در برابر انفجار داشته و توانسته است بار ناشی از مقدار ماده منفجره مورد نظر را با حفظ مسیر انتقال بار تحمل نماید.

همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) ملاحظه می‌گردد، نیرو پس از رسیدن موج شوک به سازه و اعمال فشار ناشی از انفجار به اوج رسیده و سپس با برطرف شدن فشار انفجار کاهش یافته و به دلیل ارتعاش آزاد سازه مقدار آن در نوسان است. منظور از نیرو، کل نیرویی است که در اثر انفجار در سه جهت اصلی سازه یعنی جهت‌های افقی X و Z و جهت عمودی Y بر سازه وارد گردیده است و مقدار آن‌ها از جمع مولفه‌های نظیر در تمامی تکیه‌گاه‌ها به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد بیشترین میزان نیرو در جهت عمودی (۶۰۰ کیلونیوتن) به سازه اعمال گردیده است و بنابراین، اهمیت در نظر گرفتن نیروی انفجار در جهت عمودی سازه مشخص می‌گردد. مقدار نیرو در جهت Z از مقدار نیرو در جهت X بیشتر است و دلیل آن را می‌توان سختی بیشتر سازه در جهت Z به دلیل قرارگیری محور قوی ستون در این جهت دانست و سختی بیشتر باعث جذب نیروی بیشتر می‌گردد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

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، صحت‌سنجی در گام اول انجام شده است و انطباق بسیار نزدیکی بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل اجزای محدود

## مراجع

1. Krauthammer T., Blast-resistant structural concrete and steel connections, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 22, Issues 9-10, P.P: 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, P.P: 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, P.P: 737-745, (2009).
6. Urgessa G. , Arciszewski T., Blast response comparison of multiple steel frame connections, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 47, Issue 7, P.P: 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, P.P: 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).
11. Johnson, G.R.; Cook, W.H. (1983), "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high", *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, PP: 541-547, (2009).

# A Review of the Effect of Performance of Connections of Pole to Twist Shielding Pillar

S. A. Sadr Nezhad<sup>1</sup>

M. Ziaie<sup>2</sup>

## Abstract

Considering the terrorist and hostile threats against Iran and the dire need of passive defense in structures to reduce casualty and financial damage caused by implosion and explosion in structures, reviewing the performance of structures against blast is of utmost importance. One of the most important structural members which severely affect the overall performance of the structure is the connection of pole to the pillar. The inappropriate performance and defect of these connections can contribute to the surface and in subsequent steps cause the increasing defect in structures and its collapse. In this article, the blast loading effect on the performance of connections of pole to twist shielding pillar has been studied. This kind of connection is used in steel structures in Iran. To do the research, the Limited Elements Method and the ABAQUS software which is one of the most robust Limited Elements Method that exists today was used. To ensure the results of Limited Elements modeling, the authenticity of the model using the results of a laboratory research was first utilized and an appropriate compliance between the predicted results by the Limited Elements Method and the measured results in the laboratory were observed. After ensuring the precision of the Limited Element in the simulation of the connection behavior, a non-linear dynamic analysis taking into account the effects of high rate strain resulting from blast, was performed. Due to the presence of symmetry, only 1/8 of the room was studied for the modeling. The weight of the explosive approximated 15 kilograms of TNT. The test results showed that the occurrence of blast inside the room causes a twisting deflection in the pole. It was also noticed that this kind of connection has a relatively formable behavior against blast loading.

**Key Words:** *Blast, Connection of Pole to Twist Shielding Pillar, Limited Elements Method, Non-linear Dynamic Analysis*

---

1- Professor and academic member of the Faculty of Civil Engineering- Khajeh Nasirodin Toosi University of Technology, Writer in charge (Email: Sadrnejad@kntu.ac.ir)

2- PhD Candidate of Structure Engineering, Khajeh Nasirodin Toosi University of Technology (Email: mziaei@dena.kntu.ac.ir)