

## ارزیابی پاسخ اتصالات BFP و WFP تحت بار انفجار

میرمحسن حسینی<sup>۱</sup>، سیداحمد حسینی<sup>۲\*</sup>

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران

۲-استادیار، دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران

### چکیده

یکی از مهم‌ترین اعضای سازه‌ای که عملکرد کلی سازه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد اتصال تیر به ستون است. عملکرد نامطلوب و خرابی این اتصالات می‌تواند در گام اول باعث خرابی موضعی و در گام بعدی موجب بروز خرابی پیش‌رونده در سازه و فروریزی آن گردد. در این مقاله به بررسی عملکرد دو اتصال گیردار خمشی از پیش تأیید شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، در برابر بارهای ناشی از انفجار خارجی در فاصله‌ی ۱۰ متری از یک ساختمان طبقه در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس پرداخته می‌شود. از این‌رو ابتدا سازه مذکور تحت ضوابط لرزه‌ای طراحی شده، سپس اتصالات تیر به ستون به صورت دستی و طبق الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شد. در نهایت اتصالات در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و تحت بار انفجاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده حاکی از پاسخ مناسب اتصال پیچی BFP در مقایسه با اتصال جوشی WFP است. همچنین درصد خرابی اجزای اتصال WFP نسبت به درصد خرابی اجزای اتصال BFP بیش از ۳ برابر بوده است، و اجزای بیشتری در اتصال WFP نسبت به اتصال BFP تحت بار انفجاری آسیب دیده است. مود غالب خرابی اتصالات، در اثر پیچش ستون بوده است در نتیجه اتصال پیچی به دلیل شکل‌پذیری بهتر، پاسخ مناسب‌تری را تحت بار انفجار ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: اتصال BFP، اتصال WFP، تیر - ستون، بارگذاری انفجاری، آباکوس.

\*نویسنده مسئول: سیداحمد حسینی

پست الکترونیکی: hoseini@mut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

## ۱- مقدمه

در پی زلزله نورتریج اهمیت عملکرد اتصالات ساختمان‌های قاب خمشی فولادی در برابر بارهای دینامیکی بر کارشناسان آشکار گشت. به همین دلیل مطالعات آزمایشگاهی و تئوری متعددی در خصوص بررسی رفتار این نوع اتصالات انجام گرفت. نتیجه‌ی این تحقیقات به ارائه جزئیاتی جهت طراحی اتصالات و انواع اتصالات مختلف انجامید. آزمایش‌ها نشان از عملکرد مناسب این اتصالات در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله داشت.

نوع دیگری از بارهای دینامیکی، بار حاصل از انفجار است. بارهای انفجاری بر اثر واکنش سریع مواد منفجره به وقوع می‌پیوندند که در اثر آن جبهه‌ای از موج انفجار تشکیل می‌شود. این موج با سرعت بسیار زیاد پیش می‌رود و به هر نقطه‌ای که می‌رسد فشار را در آن مکان به مدت ناگهانی افزایش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های بارهای انفجاری با بارهای دینامیکی ناشی از زلزله، زمان تداوم بسیار کوتاه آن است بطوریکه این زمان تداوم کوتاه ایجاد نوعی ضربه و شوک در سازه‌ی معرض آن می‌کند.

بررسی اثر انفجار بر سازه در اواخر قرن بیستم مورد توجه قرار گرفت. و بعد از واقعه ۱۱ سپتامبر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بار انفجار و خرابی پیش‌رونده انجام گرفت. در سال ۲۰۰۴ آدانی و دونای [۱] رفتار اتصالات صفحه انتهایی تحت بارگذاری تک جهته و چرخه‌ای را با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. در بخش اول تحقیق خصوصیات اصلی مدل‌های محاسباتی بررسی شده و در بخش دوم با ارائه مثال‌هایی، صحت سنجی مدل‌های ساخته‌شده ارزیابی گردید.

انگو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۲] تأثیر انفجار و بارگذاری انفجار بر رفتار سازه‌ها را مورد مرور قرار دادند. بارگذاری انفجار و منحنی فشار-زمان انفجار و رابطه شدت انفجار با وزن ماده منفجره و فاصله آن از سازه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر بارگذاری با نرخ بالا بر رفتار مواد مورد بحث قرار گرفت. منحنی فشار-ضربه و استفاده آن در طراحی سازه‌ها بیان گردید.

پاسخ موضعی ستون‌های فولادی بال‌پهن تحت بار انفجار کیونگ کو و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۸ به صورت عددی و با استفاده از روش دینامیک سیال محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. در گام اول قابلیت این روش در پیش‌بینی قابل‌قبول فشارهای ناشی از انفجار بر یک مقطع بال‌پهن فولادی مورد ارزیابی قرار گرفت. مطالعات پارامتریک برای مشاهده اثرات اندازه مقطع و شرایط مرزی بر رفتار و خرابی ستون در قاب فولادی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش تحلیلی روشی مناسب و مؤثر برای درک ماهیت موج انفجار و اندرکنش پیچیده بین بار انفجار و رفتار ستون فولادی است.

در سال ۲۰۰۸ پیرموز و همکاران [۴] تأثیر اندازه نبشی جان بر عملکرد لنگر- دوران اتصالات نبشی بالا و پایین را مورد بررسی قرار دادند. مدل‌سازی اجزای محدود برای شبیه‌سازی رفتار اتصال مورد استفاده قرار گرفت و مدل‌های متعددی ساخته شد. صحت سنجی مدل‌ها با استفاده از نتایج آزمایشات قبلی انجام شد و دقت قابل‌قبولی مشاهده شد. معادله برای ضریب کاهش در اثر وجود نیروی برشی با استفاده از میزان نیروی برشی موجود و ابعاد نبشی جان و نیز تنش جاری شدن پیشنهاد گردید. ملاحظه شد که فرمول پیشنهادشده دقت بیشتری در مقایسه با روش‌های موجود دارد.

شبیه‌سازی اجزای محدود پاسخ سازه‌ها در انفجار توسط کراتهمر و سیپولا در سال ۲۰۰۸ [۵] مورد بررسی قرار گرفت. اتصالات سازه‌های فولادی به‌طور ویژه مورد بررسی قرار گرفت. برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش از ضرایب افزایش دینامیکی موجود در آیین‌نامه استفاده شد. برای در نظر گرفتن شکست ترد در جوش، از مدل شکست برشی استفاده شد. در این تحقیق همچنین خرابی پیش‌رونده در سازه ۱۰ طبقه با استفاده از المان‌های تیر و پوسته مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه گرفته شد که روش اجزای محدود می‌تواند به‌طور مؤثری برای تعیین پاسخ سازه‌ها و اتصالات به بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار گیرد. همچنین نتیجه گرفته شد که آیین‌نامه‌های موجود برای طراحی سازه‌ها در برابر انفجار محافظه‌کارانه نیست. قابل‌ذکر است که آیین‌نامه جدید ارتش آمریکا [۶] چند ماه بعد از این تاریخ جایگزین آیین‌نامه مذکور گردید.

کراتهمر و همکاران [۷] در تحقیق دیگری، روش‌های تئوری و عددی برای استخراج نمودارهای فشار-ضربه برای ارزیابی رفتار المان‌های سازه‌ای تحت بار گذرا مانند بار انفجار را مورد بررسی قرار دادند. نمودارهای فشار-ضربه به‌طور گسترده‌ای در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار به‌کاربرده می‌شوند. سه الگوریتم جستجو برای تعیین نمودار فشار-ضربه به‌صورت عددی پیشنهاد شد.

برای یک سیستم الاستیک خطی تحت بارگذاری متغیر با زمان مستطیلی و مثلثی منحنی‌های فشار-ضربه با استفاده از روش تئوری و عددی استخراج شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. کاربرد این روش‌ها در ارزیابی رفتار المان‌های سازه‌ای نشان داده شد. نتیجه گرفته شد که در حالاتی که رفتار سازه غیرخطی می‌شود استفاده از روش عددی اجتناب‌ناپذیر است [۷].

رفتار لنگر- دوران اتصالات نبشی بالا و پایین در سال ۲۰۰۹ توسط پیرموز و همکاران [۸، ۹] مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از انجام تحقیق، یافتن رابطه‌ای برای پیش‌بینی رفتار لنگر- دوران اتصالات ذکر شده بوده است. با ایجاد بانک داده از مدل‌سازی‌های اجزای محدود متعدد، رابطه‌ای پیشنهاد گردید. اثر نیروی محوری بر رفتار اتصال نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داده رابطه ارائه‌شده توانایی پیش‌بینی رفتار اتصال وقتی که هم‌زمان تحت نیروی محوری و لنگر خمشی قرار دارد را دارا می‌باشد.

ایزدی فرد و ماهری در سال ۲۰۱۰ [۱۰] تأثیر شکل‌پذیری بر رفتار سازه‌های فولادی تحت بار انفجار را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ۹ سازه فولادی کوتاه با دهانه‌ها و تعداد طبقات مختلف تحت بارگذاری‌های مختلف قرار گرفتند. نمودارهای بار افزون غیرخطی برای هر قاب ارزیابی شده و پارامترهای مربوط به شکل‌پذیری استخراج گردیده است. مطالعه نتایج نشان داده است که شکل‌پذیری نقش به‌سزایی در پاسخ سازه خواهد داشت. به‌علاوه نتیجه گرفتند که ضریب کاهش شکل‌پذیری تحت بار انفجار با افزایش ضریب شکل‌پذیری افزایش پیدا می‌کند، بدون آنکه به پیوند ارتعاشی سازه وابسته باشد.

لوریرو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۱] سعی نمودند تا روش ساده‌ای برای طراحی اتصالات نبشی بالا و پایین به همراه نبشی جان به‌عنوان اتصال نیمه صلب ارائه نمایند تا امکان استفاده مهندسی از این روش طراحی فراهم گردد. روش ارائه‌شده بر پایه تحلیل‌های اجزای محدود و مدل‌سازی بوده است. همچنین تحقیقات آزمایشگاهی برای تعیین رفتار این نوع اتصالات انجام شده است. روش طراحی ارائه‌شده با استفاده از نتایج این آزمایشات مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مطالعات دیگری نیز توسط محققین مختلف ارائه شده است [۱۲-۲۱].

همان‌طور که مشاهده شد پاسخ اتصالات در برابر انفجار توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است منتها مقایسه پاسخ انواع اتصالات صلب تیر به ستون فولادی و بررسی مزیت هر کدام از این اتصالات بر دیگری مورد مطالعه قرار نگرفته است. فلذا در این تحقیق به این مهم پرداخته می‌شود.

## ۲- انواع اتصالات صلب تیر به ستون و طراحی اتصالات BFP و WFP تحت بار لرزه‌ای

### ۲-۱ کلیات

در بررسی رفتار سازه‌های فولادی در برابر انفجار، یکی از اعضای بسیار مهم که نقش اساسی در بقا یا خرابی سازه تحت بارگذاری انفجار دارد، اتصالات تیر به ستون است. بنابراین درک رفتار اتصالات فولادی برای فراهم کردن شکل‌پذیری و مقاومت کافی در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار و خرابی پیش‌رونده ضروری است. در این مقاله ابتدا یک سازه ۱ طبقه در نرم‌افزار ETABS با شرایط لرزه‌ای مشخص واقع در شهر تهران با سیستم قاب خمشی متوسط در دو جهت طراحی شد سپس برای یکی از قاب‌های خمشی، دو اتصال BFP و WFP مطابق الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شد. در نهایت اتصالات فولادی در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار گرفت و نقاط ضعف و قدرت آن‌ها در برابر انفجار تعیین شد. و اتصالی که علاوه بر پاسخ‌دهی در برابر بار زلزله، در مقابل بار انفجار هم پاسخ مناسب‌تری داشت مشخص گردید.

### ۲-۲ معرفی انواع اتصالات گیردار از پیش‌تأییدشده

انواع اتصالات از پیش تأیید شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: انواع اتصالات از پیش تأیید شده.

ردیف	نوع اتصال	مخفف	نوع سیستم سازه‌ای قابل کاربرد	نوع اتصال
۱	اتصال مستقیم تیر با مقطع کاهش یافته	RBS	قاب خمشی متوسط و ویژه	اتصال جوشی
۲	اتصال فلنجی چهار پیچی با استفاده از ورق لچکی	BSEEP	قاب خمشی متوسط و ویژه	اتصال پیچی
۳	اتصال پیچی به کمک ورق‌های روسری و زیر سری	BFP	قاب خمشی متوسط و ویژه	اتصال پیچی
۴	اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیرسری	WFP	قاب خمشی متوسط	اتصال جوشی
۵	اتصال مستقیم تقویت نشده جوشی	WUF	قاب خمشی متوسط و ویژه	اتصال جوشی

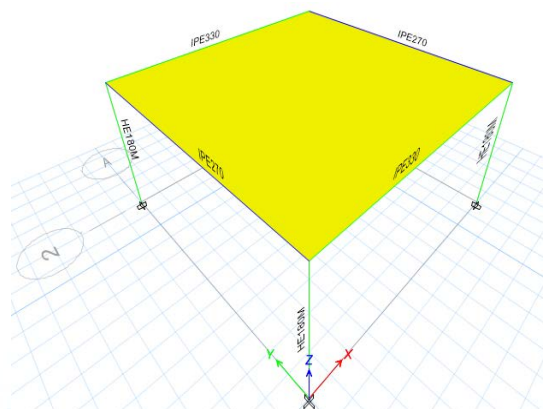
کلیه اتصالات از پیش تأیید شده باید دارای شرایط زیر باشند:

۱. کلیه اتصالات باید به صورت صلب (گیردار کامل) در نظر گرفته شوند.
۲. کلیه جوش‌های به کاررفته در اتصالات باید از طریق آزمایش‌های غیر مخرب نظیر رادیوگرافی و اولتراسونیک (فراصوتی) تأیید شوند.
۳. در کلیه اتصالات از پیش تأیید شده فاصله‌ی بین مفصل پلاستیک در داخل تیر تا بر ستون با علامت Sh نمایش داده می‌شود و برای انواع مختلف اتصالات بر اساس نتایج آزمایش، محل تشکیل مفصل پلاستیک در بخش‌های مربوطه ارائه شده است.
۴. در دو انتهای تیرهای ساخته شده از ورق، به فاصله  $(S_n + d)$  که در آن  $d$  عمق تیر است، اتصال جان به بال باید از نوع جوش نفوذی با نفوذ کامل با جوش گوشه تقویتی در هر دو طرف جان باشد. ضخامت جوش‌های گوشه تقویتی در هر طرف جان نباید از ۸ میلی‌متر کمتر در نظر گرفته شود. در مواردی که در بخش‌های مربوط به اتصالات گیردار از پیش تأیید شده در این خصوص الزام دیگری وضع شده باشد، تأمین این شرایط برای اتصال جان به بال تیر الزامی نیست.
۵. در ستون‌های H شکل ساخته شده از ورق، در محل اتصال تیر به ستون به فاصله‌ای شامل عمق تیر به علاوه ۳۰۰ میلی‌متر بالا و پایین بال‌های تیر، اتصال جان به بال‌های مقطع ستون باید از نوع جوش نفوذی با نفوذ کامل با جوش گوشه تقویتی در هر دو طرف جان باشد. ضخامت جوش‌های گوشه تقویتی در هر طرف جان نباید از ۸ میلی‌متر و ضخامت جان مقطع ستون کمتر در نظر گرفته شود.
۶. در ستون‌های قوطی شکل ساخته شده از ورق، در محل اتصال تیر به ستون به فاصله‌ای شامل عمق تیر به علاوه ۳۰۰ میلی‌متر بالا و پایین بال تیر، اتصال جان‌ها به بال‌های مقطع ستون، باید از نوع جوش نفوذی با نفوذ کامل باشد.
۷. در ستون‌های ساخته شده از ورق با مقطع صلیبی شکل، در محل اتصال تیر به ستون به فاصله‌ای شامل عمق تیر به علاوه ۳۰۰ میلی‌متر بالا و پایین بال تیر، اتصال جان‌ها به بال‌ها و جان دیگر باید از نوع جوش نفوذی با نفوذ کامل با جوش گوشه تقویتی در هر دو طرف جان باشد. ضخامت جوش‌های گوشه تقویتی در هر طرف جان نباید از ۸ میلی‌متر و ضخامت جان مقطع ستون کمتر در نظر گرفته شود.

### ۳-۲ طراحی سازه تحت بار لرزه‌ای

برای طراحی اتصالات، ابتدا باید مقاطع تیر و ستون توسط نرم‌افزار، طراحی و بهینه شوند. بنابراین لازم است برای به دست آوردن اطلاعات لازم جهت طراحی اتصالات ابتدا سازه مورد نظر مدل‌سازی، تحلیل و طراحی شود. سازه بررسی شده در این مقاله، یک ساختمان یک

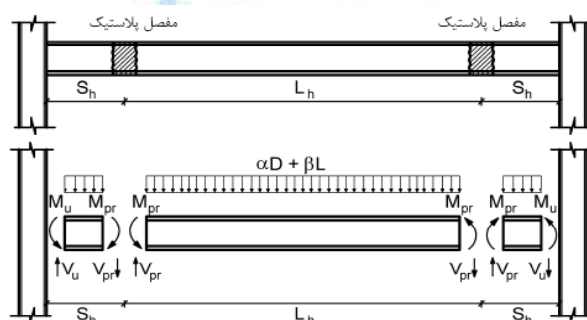
طبقه با ارتفاع ۳ متر و ابعاد پلان ۶ در ۶ متر هست. سیستم سقف از نوع تیرچه بلوک و فولاد مصرفی ST37 استفاده شده است. نوع کاربری ساختمان مسکونی و محل آن در شهر تهران و خاک نوع II با سطح خطرپذیری نسبی زیاد  $A=0.35$  و با درجه اهمیت متوسط  $I=1$  هست. نوع سیستم سازه‌ای قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط  $R=5$  است. مقادیر نیروهای ثقلی و لرزه‌ای و نحوه‌ی طراحی سازه بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به‌دست آمده است. با توجه به مشخصات بالا سازه مورد نظر را در نرم‌افزار ETABS طراحی شده و مقاطع IPE330 و IPE270 برای تیرها و مقطع HE180M برای ستون‌ها به دست آمد.



شکل ۱: سازه طراحی شده در نرم‌افزار ETABS

#### ۲-۴ طراحی لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی

در اتصالات تیر به ستون طراحی باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که شرایط ایجاد مفصل پلاستیک در فاصله‌ای محدود از بر ستون در داخل تیر فراهم شود. دو نوع روش برای این موضوع پیشنهاد می‌شود که روش اول شامل کاهش سطح مقطع تیر در فاصله‌ای محدود از بر ستون (RBS) و روش دوم تقویت اتصال تیر در وجه ستون است، به‌گونه‌ای که در آن مقاومت خمشی اتصال در ناحیه تقویت شده بیشتر از حداکثر لنگر ایجاد شده در تیر باشد. در این مقاله همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود به‌منظور طراحی اتصالات از روش دوم یعنی تقویت اتصال تیر در وجه ستون استفاده شده و بر این اساس، اتصال جوشی WFP و اتصال پیچی BFP با استفاده از مشخصات لرزه‌ای و بار ثقلی وارده بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث دهم طراحی شده است.



شکل ۲: نمودار پیکره‌ی آزاد تیرهای باربر جانبی.

مقاومت برشی ( $V_{EU}$ ) و خمشی ( $M_{EU}$ ) موردنیاز طراحی اتصالات تیر به ستون بر اساس الزامات طراحی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و (روابط پایین) و بر اساس نیروی برشی و لنگر خمشی مورد انتظار بر ستون محاسبه می‌گردد.

$$V_{EU} = \frac{2M_{pr}}{L_h} + V_u + W_u S_h \quad (1)$$

$$M_{EU} = M_{pr} + (V_{pr} + V_u) S_h + W_u \frac{S_h^2}{2} \quad (2)$$

$$M_{pr} = C_{pr} R_y M_p \quad (3)$$

$M_{EU}$  = مقاومت خمشی موردنیاز طراحی اتصالات تیر به ستون

$V_{EU}$  = مقاومت برشی موردنیاز طراحی اتصالات تیر به ستون

$M_{pr}$  = لنگر خمشی پلاستیک در محل مفصل پلاستیک

$L_h$  = فاصله بین محل تشکیل مفصل پلاستیک در دو سر دهانه تیر

$W_u$  = بار ثقیلی بر واحد طول

$V_{pr}$  = مقاومت برشی ناشی از ایجاد لنگرهای خمشی مورد انتظار در مفاصل پلاستیک دو انتهای تیر

$S_h$  = فاصله تشکیل مفصل پلاستیک

$V_u$  = نیروی برشی در محل مفصل پلاستیک فقط ناشی از بار قائم در طول  $L_h$

### ۳- مبانی شبیه‌سازی اتصالات صلب BFP و WFP

#### ۳-۱ روش مدل‌سازی عددی

در این بخش، به بررسی مدل‌سازی عددی پرداخته می‌شود. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، اتصال در جهت محور قوی تیر تحت بار انفجار مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض می‌شود ماده منفجره خارج از سازه و در فاصله‌ای ۱۰ متری بر روی سطح زمین واقع شده است. به دلیل تقارن سازه،  $\frac{1}{2}$  سازه در مدل‌سازی لحاظ می‌گردد. وزن ماده منفجره برحسب فاصله مقیاس شده  $Z = \frac{R}{W^{1/3}}$  و با فرض اینکه  $Z$  به ترتیب برابر ۱، ۱۲۶، ۱، ۴۱۸ و ۱ با واحد متر بر کیلوگرم به توان یک‌سوم در نظر گرفته شده است و فاصله ماده منفجره تا سازه برابر ۱۰ متر فرض شده در نتیجه وزن ماده منفجره به ترتیب برابر ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو تی ان تی شده است. بار مرده و زنده وارده از سقف بر روی تیر اعمال شده و سپس بارگذاری انفجاری انجام می‌گیرد. در مدل‌های در نظر گرفته شده فرض بر این است دیوار رو به انفجار و سقف در همان لحظه اول خراب می‌شود و دیوار و سقف در نظر گرفته نمی‌شود. اتصال گیردار در جهت محور  $Z$ ، اتصال WFP است. در شکل ۳ مدل مش‌بندی قابل مشاهده است. مصالح بکار رفته برای تیر، ستون و سایر ورق‌ها، فولاد ST37 و برای جوش‌ها، الکتروود E70 و برای پیچ و مهره از فولاد A490 استفاده شده است. شرایط تکیه‌گاهی برای کف ستون‌ها به صورت گیردار و در انتهای نیمه تیرها با در نظر گرفتن تقارن تعریف گردیده است. در مدل مد نظر برای ایجاد هندسه تیر، ستون، ورق‌های مورد استفاده، جوش‌ها و پیچ‌ها از گزینه Solid استفاده شده است.

سپس خواص مواد مختلف تعریف شده و به اجزای مدل اختصاص داده شده، که شامل خواصی همچون چگالی، ویژگی‌های مکانیکی از قبیل رفتار کشسان، رفتار خمیری، آسیب بوده است. در ادامه اجزای مختلف مدل ایجاد و فراخوانی شده‌اند و بر روی هم سوار شده، و مدل کلی مسئله ایجاد شده است. همچنین در ادامه مراحل مدل‌سازی نوع تحلیل و خروجی‌های مورد نیاز، مشخص گردیده است. برای تعیین نوع تحلیل گزینه Dynamic Explicit انتخاب شده است. سپس در مدول Interaction بار انفجاری به روش Conwep تعریف شده است. اندرکنش

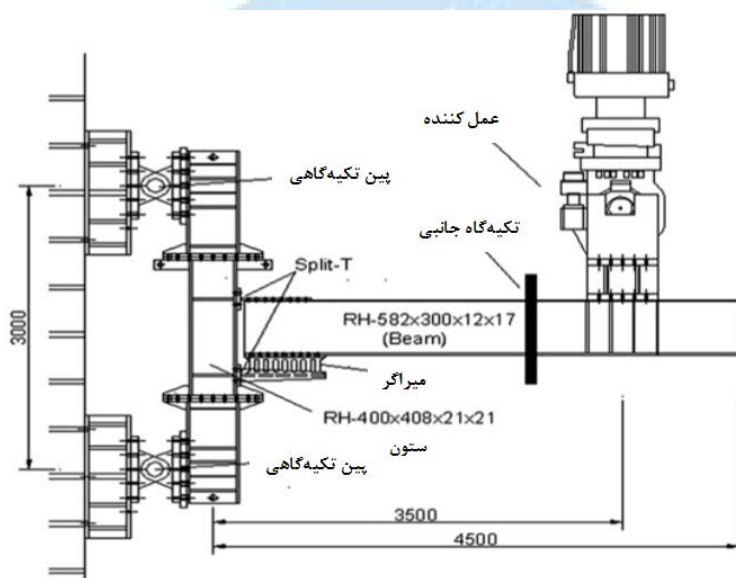
بین جوش با تیر، ستون و ورق‌ها با استفاده از قید Tie و اندرکنش پیچ با تیر، ستون و ورق‌ها به صورت Contact تعریف شده است. برای المان‌های تیر، ستون و سایر اجزای اتصالات از المان C3D8R استفاده شده است.

### ۳-۲ صحت سنجی مدل اجزای محدود

برای اطمینان از دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل اجزای محدود لازم است در ابتدا نتایج مدل‌سازی با نتایج اندازه‌گیری شده در یک آزمایش مطابقت داده شود. دو مورد صحت سنجی برای اطمینان از نتایج مدل‌های اجزای محدود انجام شده است که در ادامه بیان شده است.

#### ۳-۲-۱ صحت سنجی مدل پیچی

جهت صحت سنجی اتصال پیچی فرآیند مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، از آزمایش تجربی آقای سونگ [۱۷] استفاده شده است. در این اتصال تیر به ستون فولادی از یک تیر H شکل به مقطع RH-582X300X12X17 و طول ۳۵۰۰ میلی‌متری که به ستون با مقطع RH-400X408X21X21 با طول ۳۰۰۰ میلی‌متری به وسیله اتصال با سپری و میراگر وصل شده و جزئیات اتصال در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: اتصال تیر به ستون پیچی [۱۷].

در این تحقیق ۴ نمونه اتصال مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونه انتخاب شده مدل D<sub>1</sub> هست. در اتصال مذکور از یک میراگر (اسلیت دمپر) استفاده شده که جزئیات دقیق آن در مقاله موجود است و در جدول ۲ مشخصات مصالح بکار برده شده برای تیر و ستون و ورق‌های اتصال بالا و پایین و دمپر آمده است.

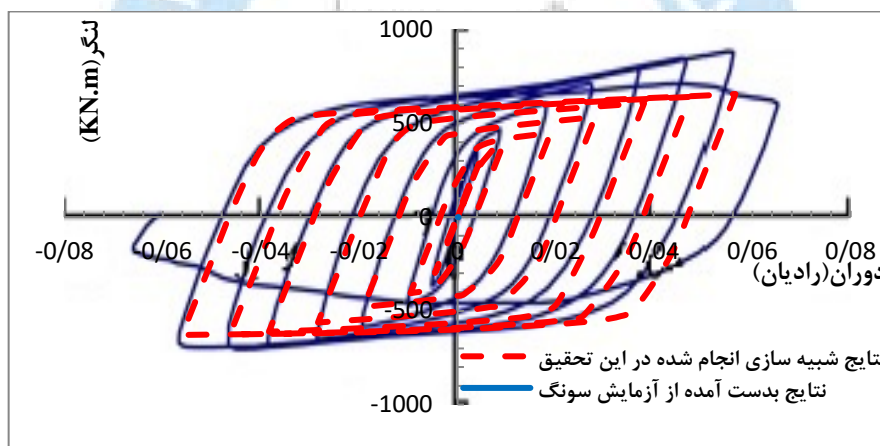
جدول ۲: خواص مکانیکی مصالح فولادی

نمونه آزمایش	نمره فولاد	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	Y.R(%)	Elo.(%)
--------------	------------	------------------	------------------	--------	---------

تیر	جان (t=12mm)	SS400	339	488	70	27
	بال (t=17mm)	SS400	318	480	67	30
ستون	جان (t=20mm)	SM490	395	554	74	27
	بال (t=20mm)	SM490	378	551	71	24
ورق T شکل	جان (t=22mm)	SM490	388	577	71	25
	بال (t=35mm)	SM490	386	573	69	24
ورق اسلیت (t=19mm)		SS400	208	464	63	30

در این مطالعه، برای حل کردن مسئله آسیب‌هایی که بسیاری از قاب‌های خمشی در اتصالات تیر به ستون در طول زلزله‌های کوبه و نورتریج متحمل شدند، یک سیستم سازه‌ای نوین با میراگرهای توسعه‌یافته ارائه شد که نه تنها عملکرد لرزه‌ای خوبی را فراهم می‌کند بلکه بعد از زلزله به راحتی تعمیر می‌شود. ویژگی اصلی این سیستم این است که تغییر شکل‌های پلاستیک را به میراگر زیر فلنچ تیر محدود می‌کند.

در این صحت سنجی همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، منحنی هیستریزس به دست آمده از آزمایش بارگذاری چرخه‌ای نمونه اتصال تیر به ستون همراه میراگر را با نمونه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس را مورد مقایسه قرار دادیم. نتایج به دست آمده از تطابق قابل قبول نمودارهای لنگر-دوران شبیه‌سازی شده در این تحقیق با نمودار لنگر-دوران بدست آمده از آزمایش آقای سونگ نشان می‌دهد. البته همان‌طور که مشخص است در چرخه‌های اول، میزان تطابق نمودارها بالا بوده و بعد از گذشت چند چرخه، بین نتایج نمودار آزمایش و شبیه‌سازی در این تحقیق، اختلاف ایجاد می‌شود. علت این اختلاف می‌تواند از یک طرف به علت ساده‌سازی‌های صورت گرفته در شبیه‌سازی و از طرف دیگر، ناشی از سخت‌شوندگی کرنشی بالاتر آزمایش اصلی نسبت به مدل‌سازی باشد.

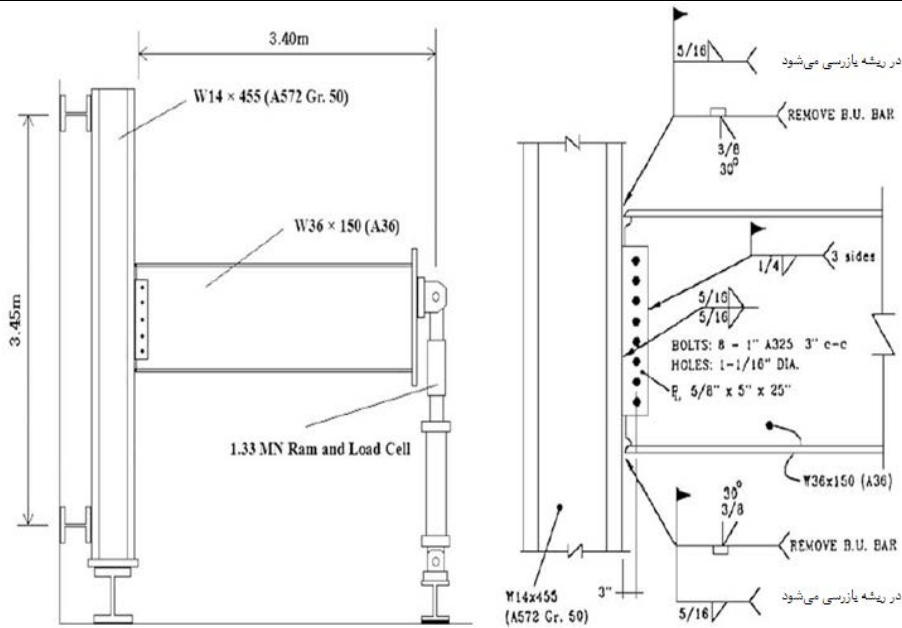


شکل ۴: مقایسه بین منحنی هیستریزس به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی سونگ و شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق.

### ۳-۲-۲ صحت سنجی مدل جوشی

در گام بعد اتصال جوشی صحت سنجی شده است. برای این کار آزمایشی انتخاب گردیده است که در سال ۲۰۰۹ توسط آقای کراتهمر و هیون تحت عنوان خصوصیات بار-ضربه اتصالات [۲۱] مورد بررسی قرار داده شده است. نمونه آزمایش شده در شکل ۵ نشان داده شده و خصوصیات مکانیکی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.





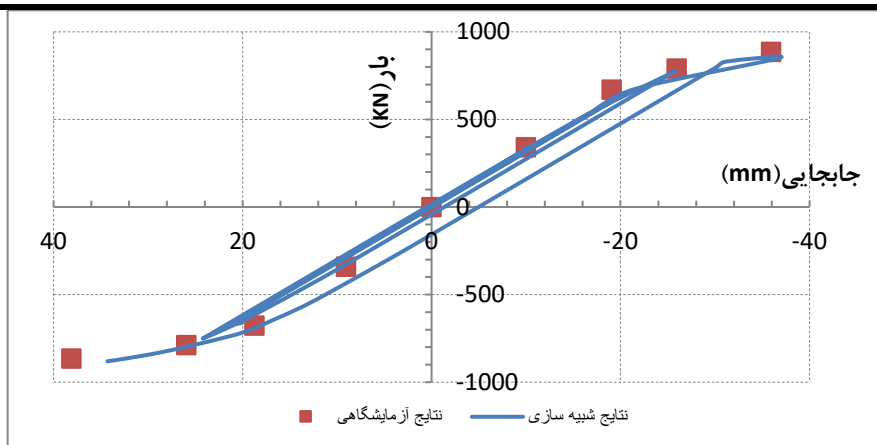
شکل ۵: راه اندازی آزمایش چرخه‌ای و مشخصات پروفیل‌های استفاده شده در آزمایش [۲۱].

جدول ۳: مشخصات مکانیکی پروفیل‌های استفاده شده [۲۱].

مؤلفه	$F_y$ (w/o DIF), Mpa	DIF For $F_y$	$F_y$ (w/ DIF), Mpa	$F_u$ (w/o DIF), Mpa	DIF For $F_u$	$F_u$ (w/ DIF), Mpa
تیر	345	1.29	445	447	1.1	492
ستون	431	1.1	474	554	1.05	571
صفحه برشی	345	1.29	445	447	1.1	492
پیچ - مهره	634	1.1	697	827	1.05	868
جوش	483	1.1	531	552	1.05	580

مدل اجزای محدود نمونه ذکر شده در بالا با در نظر گرفتن تمامی جزئیات ساخته شده است. در نواحی نزدیک به اتصال که نیاز به دقت بالاتر وجود دارد از مش ریزتری 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 گونه‌ای اختصاص داده شده است تا شرایط تکیه‌گاهی آزمایش به دقت شبیه‌سازی گردد.

بعد از انجام شبیه‌سازی، مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از طریق نرم‌افزار اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی انجام گردیده است و مشخص شده مدل اجزای محدود می‌تواند با دقت مناسبی رفتار اتصالات مورد نظر را پیش‌بینی نماید در شکل ۶ مقایسه بین جابجایی حاصل از بارگذاری چرخه‌ای با نرم‌افزار اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. همچنین برای درک بهتر از میزان اختلاف صحت سنجی صورت گرفته در جدول ۴ مقایسه بین جابجایی حاصل از بارگذاری چرخه‌ای با نرم‌افزار اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۶: مقایسه نتایج به دست آمده از تغییر مکان تیر در مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی.

جدول ۴: مقایسه نتایج به دست آمده از تغییر مکان تیر در مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی.

بار چرخه‌ای (KN)	تغییر مکان		درصد اختلاف
	آزمایش چرخه‌ای	شبیه سازی	
۰	۰	۰	۰
۳۳۳,۶۲	۰,۹۵۳	۱,۰۰۱۷۴	۴,۸۷
-۳۳۳,۶۲	-۰,۹۵۳	-۱,۰۰۱۰۹۴	۵,۷۳
۶۶۷,۲۳	۱,۹۰۵	۱,۸۸۵۰۵	۱,۰۶
-۶۶۷,۲۳	-۱,۹۰۵	-۲,۰۰۵۵۱	۵,۰۰
۷۷۸,۴۴	۲,۵۴	۲,۵۷۸۵۱	۱,۴۹
-۷۷۸,۴۴	-۲,۵۴	-۲,۴۲۱۳۸	۴,۹۰
۸۶۷,۴۰	۳,۸۱	۳,۶۷۹۲۲	۳,۵۵
-۸۸۰,۷۵	-۳,۵۵۶	-۳,۴۲۹۹۷	۳,۶۷

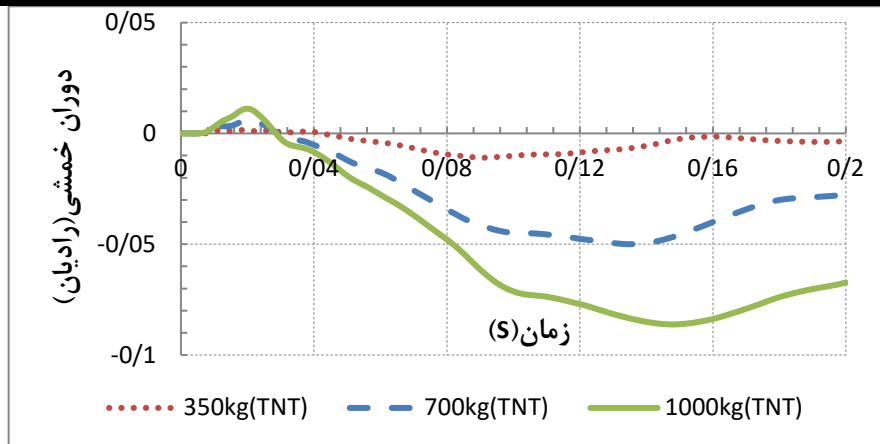
پس نتیجه می‌شود مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی اتصال صلب جوشی (WFP) و اتصال صلب پیچی (BFP)، از صحت قابل قبولی برخوردار هست.

#### ۴- ارزیابی پاسخ اتصالات صلب تیر به ستون BFP و WFP تحت بار انفجار

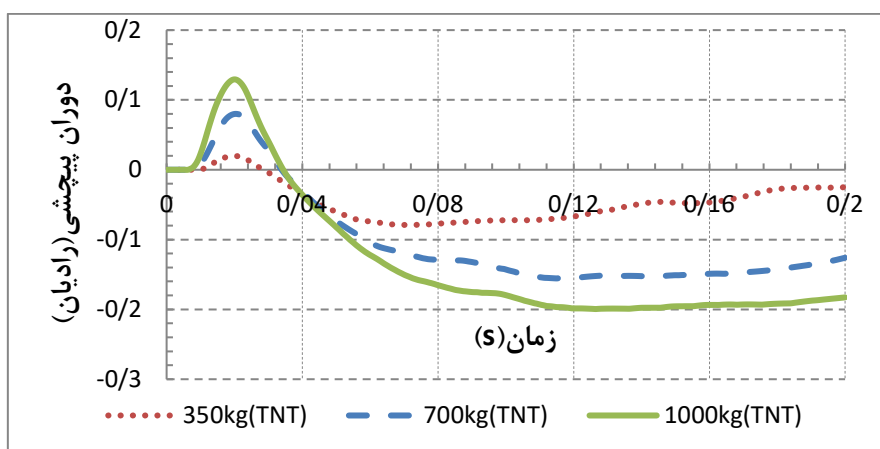
به منظور حصول نتایج کافی برای سنجش اتصالات از یکدیگر چند پارامتر را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم، از جمله دوران خمشی تیر اصلی در فاصله ۳۷ سانتی متری از اتصالات، دوران پیچشی تیر اصلی در محل اتصالات و دوران پیچشی ستون و آسیب‌هایی که در هر یک از اجزای بکار رفته در سازه بر اثر انفجار رخ داده است.

##### ۴-۱ اتصال WFP

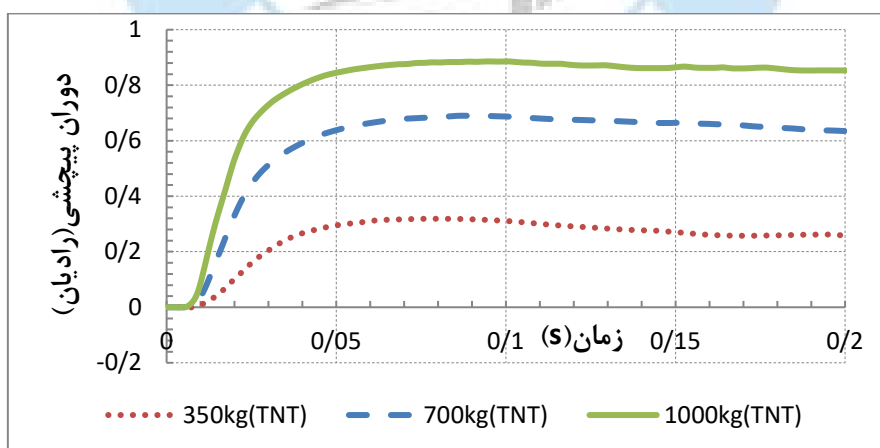
نتایج حاصل از تحلیل به صورت تاریخچه دوران خمشی تیر در شکل ۷، دوران پیچشی تیر در شکل ۸ و ستون در شکل ۹ در محل اتصال همراه با میزان رشد درصد آسیب جانسون کوک برای این اتصال بیان شده است.



شکل ۷: دوران خمشی حول محور قوی تیر بر اثر بارگذاری ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال WFP.



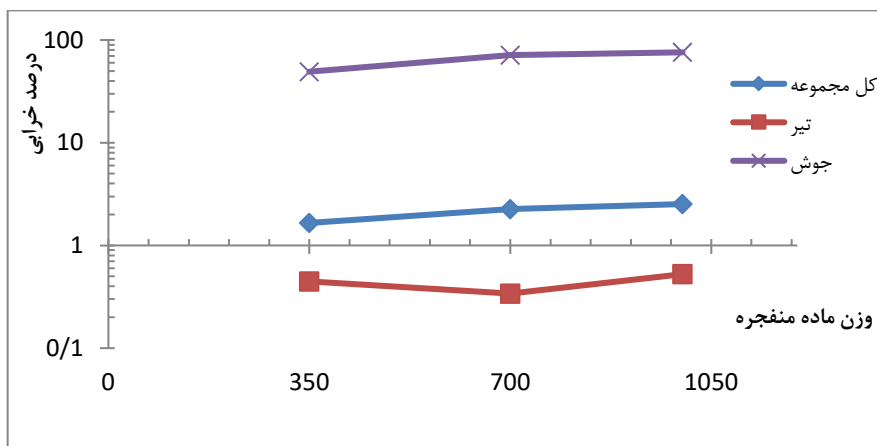
شکل ۸: دوران پیچشی تیر بر اثر بارگذاری ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال WFP.



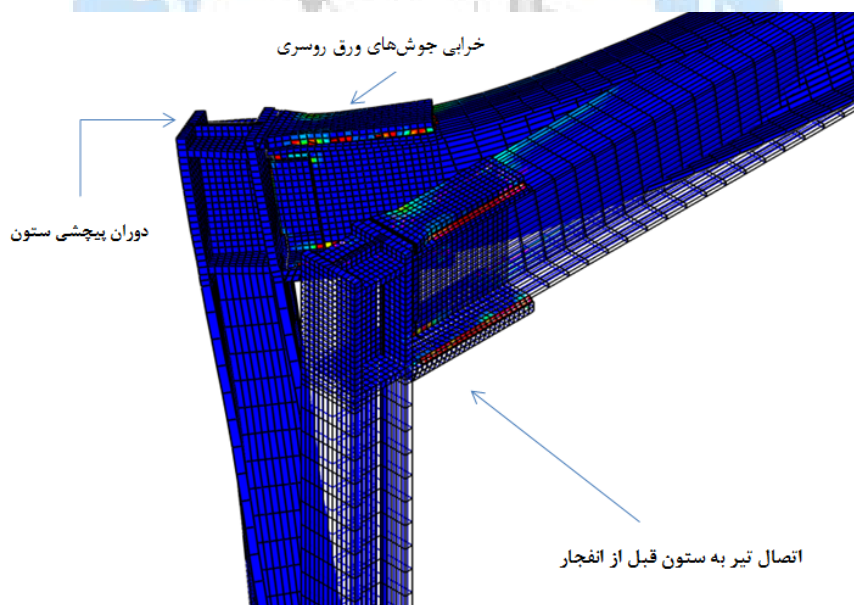
شکل ۹: دوران پیچشی ستون بر اثر بارگذاری ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال WFP.

با مشاهده نتایج به دست آمده از نمودارهای دوران‌های خمشی و پیچشی مربوط به تیر و ستون با بارگذاری‌های مختلف می‌توان به این نتیجه رسید، به دلیل بحرانی‌تر بودن میزان دوران پیچشی در تیر و ستون نسبت به دوران خمشی تیر، احتمال خرابی اتصال، به دلیل دوران پیچشی بیش از حد تیر و ستون خواهد بود. در اتصال WFP همان‌طور که از شکل ۷ دوران خمشی مشخص است سازه توانسته با خسارت جزئی دوران ۰٫۰۲ رادیان را تحمل کند. در اتصال WFP به دلیل دوران پیچشی ستون که باعث دوران خمشی حول محور ضعیف تیر می‌شود

در نتیجه بیشترین آسیب در ورق روسری و زیرسری اتفاق می افتد. چون اتصال بین ورق ها با تیر، به وسیله جوش انجام گرفته و جوش مانند پیچ نمی تواند شکل پذیری کافی داشته باشد لذا در این اتصال بیشترین آسیب را جوش ها نسبت به سایر اتصالات می بینند. با توجه به شکل ۹ مشاهده می شود در بارگذاری با ۳۵۰ کیلوگرم TNT، جوش ها آسیب زیادی دیده اند و تیر و ورق های برشی آسیب کمتری دیده اند و در نهایت سازه پایدار است، در بارگذاری با ۷۰۰ کیلوگرم TNT، درصد خرابی جوش ها بیشتر می شود ولی درصد خرابی بقیه اعضا نسبتاً کمتر می شود و در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، تعداد خرابی المان های تیر بیشتر می شود همچنین تعداد خرابی المان های جوش افزایش قابل ملاحظه ای داشته به طوری که می توان انتظار داشت جوش های ورق روسری بعد از مدت زمان کوتاهی تخریب شوند و در نتیجه خرابی در اتصالات اتفاق افتد.



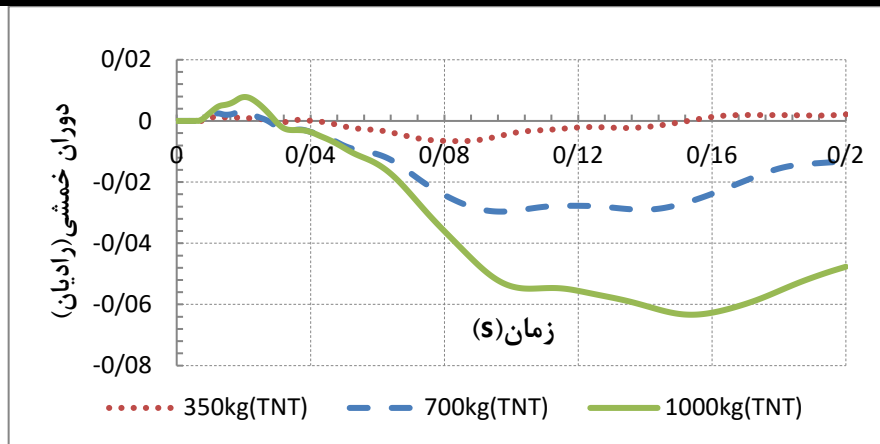
شکل ۱۰: درصد خرابی هر یک از اعضا بر اثر بارگذاری با ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال WFP.



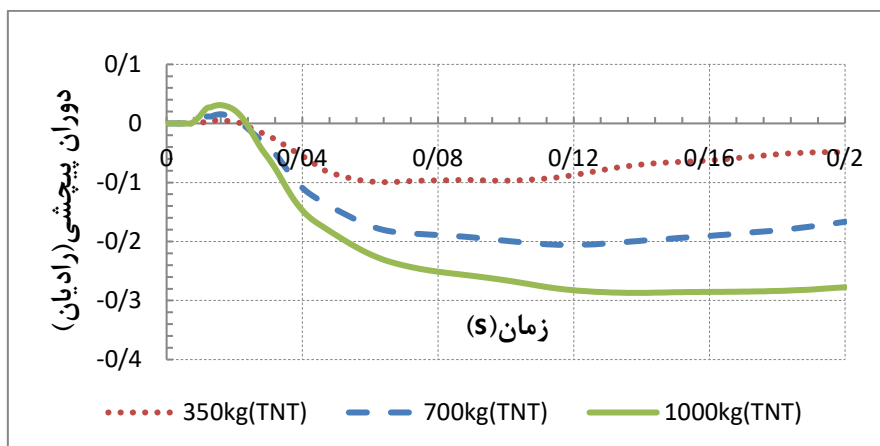
شکل ۱۱: خرابی جوش های ورق روسری در اثر بارگذاری با ۳۵۰ کیلوگرم TNT در اتصال WFP.

## ۲-۴ اتصال BFP

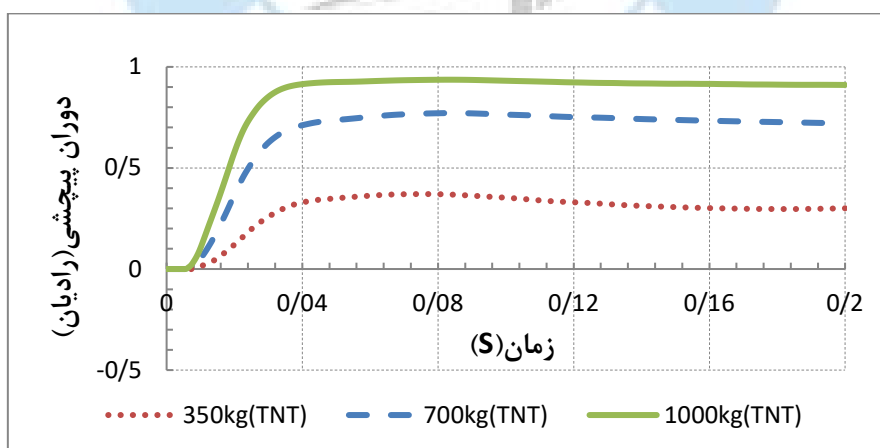
نتایج حاصل از تحلیل به صورت تاریخچه دوران خمشی تیر در شکل ۱۲، دوران پیچشی تیر در شکل ۱۳ و ستون در شکل ۱۴ در محل اتصال همراه با میزان رشد درصد آسیب جانسون کوک در شکل ۱۵ برای این اتصال بیان شده است.



شکل ۱۲: دوران خمشی حول محور قوی تیر بر اثر بارگذاری با ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال BFP



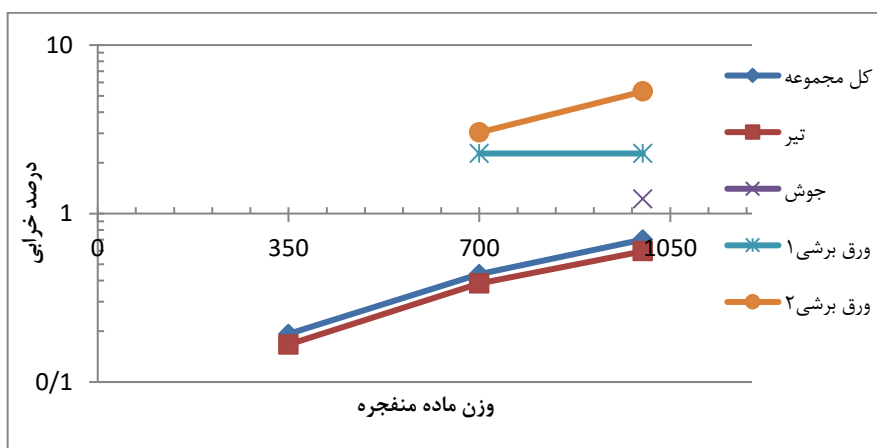
شکل ۱۳: دوران پیچشی تیر بر اثر بارگذاری با ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال BFP



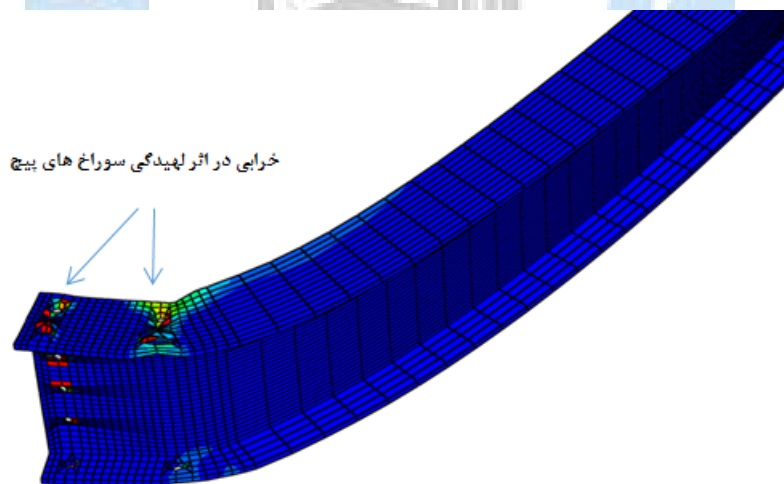
شکل ۱۴: دوران پیچشی ستون بر اثر بارگذاری با ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال BFP

با مشاهده نتایج به دست آمده از نمودارهای دورانهای خمشی و پیچشی مربوط به تیر و ستون با بارگذاریهای مختلف می توان به این نتیجه رسید، به دلیل بحرانی تر بودن میزان دوران پیچشی در تیر و ستون نسبت به دوران خمشی تیر، در نتیجه احتمال خرابی اتصال به دلیل دوران پیچشی بیش از حد تیر و ستون خواهد بود. در اتصال BFP همان طور که از شکل ۱۲ دوران خمشی مشخص است سازه توانسته با خسارت جزئی دوران ۰,۰۲ رادیان را تحمل کند. در اتصالات قبلی به دوران پیچشی زیاد ستون اشاره شده و اینکه اتصال جوشی WFP

همانند اتصال پیچی BFP دارای ورق روسری و زیرسری است. همچنین دوران پیچشی ستون باعث دوران خمشی تیر حول محور ضعیف می‌شود، در اتصال BFP با توجه به اینکه ورق روسری و زیرسری با پیچ به تیر متصل شده‌اند لذا می‌توانند حول محور ضعیف تیر دوران خمشی داشته باشند و آسیب کمتری نسبت به اتصال معادل با جوش WFP داشته باشند. در بارگذاری با ۳۵۰ کیلوگرم TNT، ستون، جوش، ورق‌های برشی و پیچ آسیبی ندیده‌اند و فقط تیر و ورق‌های روسری و زیرسری آسیب جزئی دیده‌اند و سازه به پایداری خود ادامه می‌دهد. در بارگذاری با ۷۰۰ کیلوگرم TNT، جوش، پیچ و ستون هم چنان آسیبی ندیده‌اند ولی درصد آسیب بقیه اجزای سازه روند صعودی داشته و سازه به پایداری خود ادامه می‌دهد. در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، هم چنان ستون و پیچ‌ها آسیبی ندیده‌اند و درصد آسیب بقیه اجزای سازه افزایش پیدا کرده بیشترین آسیب مربوط به محل سوراخ‌های پیچ‌ها بر روی تیر است ولی در نهایت اتصال و سازه به پایداری خود ادامه می‌دهد.



شکل ۱۵: درصد خرابی هر یک از اعضا بر اثر بارگذاری با ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT در اتصال BFP.



شکل ۱۶: آسیب‌های وارده به محل سوراخ‌های پیچ و ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک در اتصال BFP.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار اتصالات از پیش تائید شده مبحث دهم مقررات ملی ساختمان تحت بارگذاری با نرخ کرنش بالای انفجار مورد بررسی قرار گرفته است. یک سازه ۱ طبقه فولادی که در هر دو جهت دارای قاب خمشی گیردار است مطابق ضوابط آیین‌نامه ایران طراحی شده است و مقاطع تیر و ستون به دست آمده است. نصف سازه مورد نظر با در نظر گرفتن شرایط تقارن برای شبیه‌سازی همراه با اتصالات تیر

به ستون مربوطه در دو دسته اتصال WFP و اتصال BFP طراحی شده‌اند. انفجار از نوع انفجار خارجی و ماده منفجره به فاصله ۱۰ متر از سازه بر روی زمین قرار گرفته است و هدف بررسی رفتار اتصالات در محور قوی تیر است. رفتار مصالح پیچ، جوش و فولاد با در نظر گرفتن مدل دوخطی و تئوری تسلیم فون میزس و نیز در نظر گرفتن آسیب با استفاده از مدل جانسون کوک شبیه‌سازی و صحت سنجی شده است. روش CONWEP برای اعمال بار دینامیکی انفجار بر روی سازه مورد استفاده قرار گرفته است. برای انجام شبیه‌سازی از روش اجزای محدود و نرم‌افزار قدرتمند آباکوس استفاده شده است. برای اطمینان از دقت نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل اجزای درزمینه‌ی اتصالات دو اتصال جوشی و پیچی تحت بار چرخه‌ای صحت سنجی شده است. در گام بعد یک‌دوم از سازه در نظر گرفته شده شبیه‌سازی شده و بار انفجاری مربوط به ماده منفجره با وزن‌های مختلف به سازه وارد شده و عکس‌العمل سازه و اتصال و مودهای خرابی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور حصول نتایج کافی برای سنجش اتصالات از یکدیگر چند پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفت، از جمله دوران خمشی تیر اصلی در فاصله ۳۷ سانتی‌متری از اتصالات، دوران پیچشی تیر اصلی در محل اتصالات و دوران پیچشی ستون و آسیب‌هایی که در هر یک از اجزای بکار رفته در سازه بر اثر انفجار رخ داده است.

مقایسه دوران خمشی تیر اصلی سازه با اتصال WFP نسبت به اتصال BFP نشان می‌دهد در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، سازه با اتصال WFP، ۱،۳۶ برابر سازه با اتصال BFP دوران خمشی حول تیر داشته است؛ لذا با در نظر گرفتن اینکه سازه با اتصال جوشی نسبت به اتصال پیچی دوران خمشی بیشتری را حول تیر متحمل شده است این نکته قابل توجه است که مود خرابی در اثر بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، بر اثر مقادیر زیاد دوران پیچشی تیر و دوران پیچشی ستون بوده است.

مقایسه دوران پیچشی حول تیر اصلی سازه با اتصال BFP نسبت به اتصال WFP نشان می‌دهد در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، سازه با اتصال BFP، ۱،۴۴ برابر سازه با اتصال WFP دوران پیچشی حول تیر اصلی داشته است و با در نظر گرفتن این نکته که بیشترین مقدار دوران پیچشی تیر اصلی سازه در هر یک از دو اتصال بیش از ۵ برابر بیشترین مقدار دوران خمشی حول تیر اصلی ثبت شده است در نتیجه دوران پیچشی تیر اصلی سازه با اتصال پیچی نسبت به اتصال جوشی موجب آسیب کمتر به اتصالات و سازه گردیده است.

مقایسه دوران پیچشی حول ستون سازه با اتصال BFP نسبت به اتصال WFP نشان می‌دهد در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، سازه با اتصال BFP، ۱،۰۵ برابر سازه با اتصال WFP دوران پیچشی ستون داشته است؛ با در نظر گرفتن این نکته که بیشترین مقدار دوران پیچشی ستون سازه در هر یک از دو اتصال بیش از ۳ برابر بیشترین مقدار دوران پیچشی تیر اصلی ثبت شده است لذا مود غالب خرابی سازه، دوران پیچشی ستون بوده و در نتیجه عملکرد بهتر دوران پیچشی ستون سازه با اتصال پیچی نسبت به اتصال جوشی آسیب کمتری را نسبت به سازه و اتصالات وارد کرده است.

با استفاده از یافته‌های این تحقیق نتیجه‌گیری به صورت زیر به‌دست آمده است.

- در اتصال WFP مود خرابی بر روی جوش‌ها هست به‌خصوص جوش‌های متصل‌کننده ورق روسری به تیر، در اتصال BFP مود خرابی لهیدگی سوراخ پیچ‌های ورق روسری و تیر است.
- اتصالات از پیش تائید شده WFP و BFP توانستند به حد ظرفیت دورانی نظیر تغییرمکان جانبی نسبی طبقه، حداقل ۰،۰۲ رادیان برسند که جزو الزامات طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی متوسط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان بود.
- از مقایسه نمودارهای به‌دست‌آمده از نتایج مشخص شد غالب مود خرابی از دوران پیچشی ستون بود، به همین جهت اتصال پیچی به دلیل شکل‌پذیری بیشتر نسبت به اتصال جوشی پاسخ‌دهی مناسبی را تحت این شرایط بارگذاری داشت.
- در محدوده کاری و با توجه به شرایط تحقیق و نتایج به‌دست‌آمده، اتصال جوشی از پیش تائید شده به دلیل خرابی زودتر نسبت به تیر برای بارگذاری انفجاری مناسب نیست.
- در اتصالات BFP درصد خرابی در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، برای اجزای اتصالات به ترتیب برای ورق برشی (۲) ۵،۳ درصد، ورق برشی (۱) ۲،۳ درصد، جوش‌ها ۱،۲ درصد، تیر ۰،۶ درصد، ثبت شده و ستون هم آسیبی ندیده است.

- در اتصالات WFP درصد خرابی در بارگذاری با ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، برای اجزای اتصالات به ترتیب برای جوشها ۷۶ درصد، ورق برشی (۱) ۷۵ درصد، ورق برشی (۲) ۷۵ درصد، تیر ۵۲ درصد، ستون هم آسیبی ندیده است.
- با مقایسه اختلاف پاسخ اتصالات BFP با اتصالات WFP در انفجار با پاسخ این اتصالات در زلزله، می توان مشاهده کرد که در بارگذاری لرزه ای نیز مشابه انفجار، اتصال BFP پاسخ بهتری از WFP داشته است و همچنین درصد خرابی اجزای BFP کمتر از WFP می باشد. با وجود تفاوت بارگذاری انفجار با زلزله، اما نکته ای که می تواند حائز اهمیت باشد این است که هر دوی این بارگذاری ها، بارگذاری های سریع دینامیکی هستند و اتصالات و اجزای در این بارگذاری ها رفتار و پاسخ بهتری دارند که رفتار شکل پذیرتری داشته باشند و رفتار و پاسخ ترد غالب نباشد. با توجه به اینکه اختلاف این دو اتصال فقط در اجزای اتصال دهنده یعنی در جوش و پیچ می باشد آن اتصال رفتار بهتری دارد که اجزای اتصال دهنده آن، رفتار و پاسخ شکل پذیرتری داشته باشد. پس چون پیچ از جوش شکل پذیرتر است در اتصال BFP چون از پیچ جهت اتصال استفاده شده است نسبت به WFP که از جوش استفاده شده است رفتار و پاسخ بهتر و شکل پذیرتری انتظار رفته و مشاهده شده است.





- [۱] S. Ádány and L. Dunai, "Finite element simulation of the cyclic behaviour of end-plate joints," *Computers & structures*, vol. 82, pp. 2131-2143, 2004.
- [۲] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta, and J. Ramsay, "Blast loading and blast effects on structures—an overview," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 7, pp. 76-91, 2007.
- [۳] K. Lee, T. Kim, and J. Kim, "Local response of W-shaped steel columns under blast loading," *Structural engineering and mechanics*, vol. 31, pp. 25-38, 2009.
- [۴] A. Pirmoz, A. S. Daryan, A. Mazaheri, and H. E. Darbandi, "Behavior of bolted angle connections subjected to combined shear force and moment," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, pp. 436-446, 2008.
- [۵] T. Krauthammer and J. Cipolla, "Building blast simulation and progressive collapse analysis," <http://www.nafems.org/downloads/public/buildingblast.pdf>, 2007.
- [۶] U. F. GUIDE, "UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC)," 2014.
- [۷] T. Krauthammer, S. Astarlioglu, J. Blasko, T. Soh, and P. Ng, "Pressure-impulse diagrams for the behavior assessment of structural components," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 771-783, 2008.
- [۸] A. Pirmoz, F. Danesh, and V. Farajkhah, "The effect of axial beam force on moment-rotation curve of top and seat angle connections," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 20, pp. 767-783, 2011.
- [۹] A. Pirmoz, A. S. Khoei, E. Mohammadrezapour, and A. S. Daryan, "Moment-rotation behavior of bolted top-seat angle connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, pp. 973-984, 2009.
- [۱۰] R. Izadifard and M. Maheri, "Ductility effects on the behaviour of steel structures under blast loading," *Iranian Journal of Science and Technology*, vol. 34, p. 49, 2010.
- [۱۱] A. Loureiro, J. Reinoso, R. Gutiérrez, and A. Moreno, "New proposals on the calculation of the flexural resistance in angle connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, pp. 613-622, 2011.
- [۱۲] Y. Bai and T. Wierzbicki, "A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence," *International journal of plasticity*, vol. 24, pp. 1071-1096, 2008.
- [۱۳] A. S. Daryan, M. Ziaei, and S. A. Sadrnejad, "The behavior of top and seat bolted angle connections under blast loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 67, pp. 1463-1474, 2011.
- [۱۴] J. Liu, "Preventing progressive collapse through strengthening beam-to-column connection, Part 2: Finite element analysis," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, pp. 238-247, 2010.
- [۱۵] Y. Maggi, R. Gonçalves, R. Leon, and L. Ribeiro, "Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, pp. 689-708, 2005.
- [۱۶] A. A. Nassr, A. G. Razaqpur, M. J. Tait, M. Campidelli, and S. Foo, "Strength and stability of steel beam columns under blast load," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 55, pp. 34-48, 2013.
- [۱۷] S.-H. Oh, Y.-J. Kim, and H.-S. Ryu, "Seismic performance of steel structures with slit dampers," *Engineering structures*, vol. 31, pp. 1997-2008, 2009.
- [۱۸] T. Sabuwala, D. Linzell, and T. Krauthammer, "Finite element analysis of steel beam to column connections subjected to blast loads," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 31, pp. 861-876, 2005.
- [۱۹] A. Version, "6.12 Documentation Collection," *ABAQUS/CAE User's Manual*, 2013.
- [۲۰] H. C. Yim, "A study of steel moment connections for structures under blast and progressive collapse loading rates," 2007.
- [۲۱] H. C. Yim and T. Krauthammer, "Load-impulse characterization for steel connection," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 737-745, 2009.