محله علمی بژو، مثی «علوم و فناوری می یدافد غسرعامل» سال چهارم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۲؛ ص ۱۰۱-۹۳

عملكرد اتصالات ييجي تير به ستون تحت انفجار

**سید امیرالدین صدرنژاد<sup>ا\*</sup>، مسعود ضیائی<sup>۲</sup>** ۱-استاد و ۲- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۰۳)

چکیدہ

در نظر گرفتن پدافند غیرعامل در ساخت و مقاوم سازی سازههای نظامی و مسکونی، راهکاری مناسب برای کاهش خسارات در اثر وقوع انفجار در سازهها است. در این مقاله، رفتار اتصالات صفحه انتهایی پیچی تحت انفجار، توسط روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطمینان از نتایج مدل سازی، صحت سنجی توسط نتایج آزمایش انجام شده است. یک سازه فولادی ۵ طبقه بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، تحت اثر بارهای متعارف و در نرمافزار ETABS طراحی شده و رفتار یکی از اتصالات طبقه اول آن تحت اثر انفجار داخلی در نرمافزار ABAQUS با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش بررسی گردیده است. نتایج نشان داد که انفجار باعث بروز پیچش در تیر می گردد. در اتصال گیردار، ناحیه بحرانی اتصال شامل بخش پایینی ورق انتهایی در مجاورت پایین ترین ردیف پیچها و نیز محل اتصال بال پایینی تیر به ورق انتهایی است. مشاهده شد که اتصال با تعداد پیچ بیشتر، عملکرد مناسب تری در برابر انفجار داد.

كليد واژهها: پدافند غيرعامل، انفجار، اتصال صفحه انتهايي پيچي، روش اجزاي محدود، تحليل ديناميكي غيرخطي.

# Behavior of the Bolted Beam-Column Connections under Blast

S. A. Sadrnejad<sup>\*</sup>, M. Ziaei Civil Eng. Dep't. K. N. Toosi Univ. of Tech. (Received: 04/02/2013; Accepted: 25/9/2013)

#### Abstract

Considering passive defense in construction and rehabilitation of military and residential structures is a proper method for blast-induced damage mitigation. In this paper, the behavior of end plate bolted connections under blast is studied. To assure the accuracy of finite element models, verification is carried out using the results of an experimental test. Nonlinear dynamic analysis is carried out considering high strain rate effects. A 5-story structure is designed according to the national steel structures code using ETABS and one of the first storey connections is studied under blast load using nonlinear dynamic analysis in ABAQUS considering the effects of high strain rates. The results show that the beam experiences significant torsion. Moreover, the critical area in moment connection is the area adjacent to lower bolt holes as well as the area between end plate and lower beam flange. It is also observed that the use of small bolts in higher number provides more desirable response in blast loading.

Keywords: Passive Defense, Blast, End-plate Bolted Connection, Finite Element Method, Nonlinear Dynamic Analysis.

### ۱. مقدمه

پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می گردد که نیازی به کار گرفتن جنگافزار ندارد و با اجرای آن می توان از وارد شدن خسارات مالی به تجهیزات و تأسیسات حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی و تلفات انسانی جلوگیری نموده و یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. وجود تهدیدات خصمانه و تروریستی عليه كشور، اهميت لحاظ نمودن وجوه مختلف يدافند غيرعامل را دو چندان مینماید. انجام اقدامات پدافند غیرعامل در جنگهای نامتقارن امروزی برای مقابله با تهاجمات خصمانه و تقلیل خسارت ناشی از حملات هوایی، موضوعی بنیادی است که وسعت و گستره آن تمامی زیرساختها و مراکز حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی، سیاسی، ارتباطی، مواصلاتی نظیر بنادر، فرودگاهها، و پاها، زیرساختهای محصولات کلیدی نظیر پالایشگاهها، نیروگاهها، مجتمعهای بزرگ صنعتی، مراکز هدایت و فرماندهی و جمعیت مردمی کشور را در برمیگیرد.

در نظر گرفتن پدافند غیرعامل در ساخت و مقاوم سازی سازههای نظامی، صنعتی، تجاری و مسکونی میتواند راهکاری مناسب برای کاهش خسارات جانی و مالی در اثر وقوع انفجار در داخل یا خارج از این سازهها باشد. یکی از معمولترین سیستمهای ساختمانی در کشور، سازههای فولادی هستند و بررسی رفتار این نوع سازهها، تحت اثر بارگذاری ناشی از انفجار از اهمیت ویژهای برخوردار است. رفتار سازههای فولادی بهشدت به رفتار اتصالات تیر به ستون وابسته است و برای فراهم نمودن درک صحیح از رفتار سازه، شناخت رفتار اتصالات سازههای فولادی در برابر انفجار ضروری است. بدیهی است عملکرد نامطلوب و خرابی اتصالات میتواند باعث خرابی موضعی و در گام بعد بروز خرابی پیش رونده در سازه و فروریزی آن گردد.

اتصالات پیچی یکی از کاربردی ترین نوع اتصالات به دلیل سهولت اجرا و عدم استفاده از جوشکاری در کارگاه است. در بین اتصالات ییچی نیز اتصال ساخته شده با استفاده از صفحه انتهایی ( به فراوانی در ساخت سازهها به کار برده می شود. این نوع اتصال، هم می تواند به عنوان اتصال نیمه گیردار و هم به عنوان اتصال گیردار کامل، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از پیچ بهدلیل شکل پذیری بیشتر در مقایسه با جوش، میتواند عملکرد مناسبتری از دیدگاه جذب انرژی انفجار برای اتصال فراهم نماید. نمونهای از این نوع اتصال در شکل (۱) نشان داده شده است.

در اتصال به کمک ورق انتهایی، تیر فولادی در کارخانه با جوش شیاری در بالها و جوش شیاری یا گوشه در جان به ورق انتهایی متصل می شود. بهدلیل انجام جوشکاری در کارخانه، کیفیت جوشکاری بسیار مطلوب تر از حالتی است که جوشکاری در محل ساخت سازه انجام پذیرد. مجموعه تیر و ورق انتهایی که در آن سوراخهایی تعبیه شده، توسط پیچهای پرمقاومت به بال ستون متصل می شود [۱]. در این تحقیق اثر بارگذاری انفجار بر قاب

<sup>1</sup> End Plate Connection

فولادی با اتصال صفحه انتهایی پیچی با استفاده از روش اجزای محدودمورد بررسی قرار می گیرد. برای اطمینان از دقت پیشبینیهای مدل اجزای محدود در ابتدا صحت سنجی مدل با استفاده از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی صورت گرفته است. سپس سازه مورد نظر مدلسازی شده و بارگذاری انفجار به آن وارد میشود. تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شده و نتایج مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱. اتصال تیر به ستون با استفاده از صفحه انتهایی و پیچ [۲]

## ۲. پیشینه تحقیق

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.

د, سال ۱۹۹۹ کراتهمر [۳] 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 تـ أمین ایمنـی اتصـالات در برابر بارگذاری انفجار ضروری است. همچنین نشان داده شد که اتصالات جوشی که مطابق آییننامه TM5-1300 ایمن در نظر گرفته شدهاند ممکن است در اثر مقدار ماده منفجره مجاز بهدلیل شکست جوشها دچار خرابی گردند [۴]. بهعلاوه ملاحظه گردید که تغییر رفتار مکانیکی فولاد در کرنشهای با نرخ بالا، از اهمیت زیادی برخوردار است.

در سال ۲۰۰۵ سابووالا و همکارانش [۵] با استفاده از روش جزای محدود، عملکرد اتصالات تیر به ستون صلب را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. مدلسازی با استفاده از نرمافزار اجزای محدود آباکوس ٔ انجام گرفت [۶]. 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 نمى كند. به علاوه، اتصالات صلب تقويت نشده مورد بررسى، عملكرد

ضعیفی در برابر بارگذاری انفجار دارند و خیز بالا و تنشهایی بالاتر از تنش جاری شدن در اتصال بهوجود میآید.

در سال ۲۰۰۸، هیون و کراتهمر [۷] 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 فشار – ضربه مورد بررسی قرار گرفتند. در گام بعد، نمودارهای حاصل 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 حاصل این بود که استفاده از نمودارهای بار – ضربه می تواند در شبیه سازی رفت ار قابهای فولادی ساده سازی شده به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۱، اورگسا وآرکیزوسکی [۸] 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 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 ضیائی [۹] رفتار اتصالات نیمه گیردار نبشی بالا و پایین بههمراه نبشی جان را در برابر بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار دادند. برای انجام تحقیق، نرمافزار اجزای محدود ANSYS مورد استفاده قرار گرفت. کفایت معیارهای ذکر شده در آییننامه و نیز مودهای خرابی اتصالات ذکر شده در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت.

در سال ۲۰۱۲ صدرنژاد و ضیائی [۱۰]رفتار اتصالات سپری تیر به ستون، تحت بارگذاری انفجار را مورد بررسی قرار دادند. برای انجام تحقیق، از روش اجزای محدود و نرم افزار ABAQUS استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که وقوع انفجار در داخل اتاق، باعث بروز کمانش پیچشی در تیر می گردد. همچنین ملاحظه گردید که این نوع اتصال رفتار نسبتاً شکل پذیری در برابر بارگذاری انفجار دارد.

### ۳. 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 بهدلیل افزایش ناگهانی فشار ناشی از وقوع انفجار، عمودی است. فشار حداکثر ناشی از انفجار که با p₀ نشان داده می شود، در انتهای این فاز (فاز افزایش فشار) ایجاد می شود. سرعت انتشار V با زمان و فاصله کاهش می یابد، ولی معمولاً از مقدار سرعت صوت در محیط بیشتر

است. www.SID.ir

جبهه شوک در زمان  $A_1$  به هدف می رسد. بعد از گذشت  $t_i$  از زمان رسیدن موج 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، می توان فرض کرد که رسیدن به مقدار فشار حداکثر ، به صورت آنی بعد از رسیدن جبهه شوک اتفاق می افتد. فشار حداکثر  $P_{so}$  در مدت زمان  $t_0$  افت نموده و برابر با فشار اولیه محیط می شود که این فاصله به عنوان فاز مثبت پالس فشار تعریف می گردد. در شکل (۳) جبهه شوک ناشی از انفجار نشان داده شده است.



شکل ۲. منحنی تاریخچه زمانی فشار – زمان ناشی از انفجار [۹]



**شکل ۳.** جبهه شوک ناشی از انفجار [۱۱]

بعد از این مرحله، فاز منفی اتفاق می فتد که به مدت  $t_o^-$  ادامه خواهد داشت و در این فاصله، میزان فشار از فشار اولیه محیط کمتر خواهد بود. فاز منفی در طراحی سازههای معمول اهمیت چندانی ندارد (بهجز در مورد سازههایی که در کشش ضعیف هستند، مانند سازههای خاکی مسلح) و معمولاً از آن صرف نظر می شود. مقدار ضربهای که در اثر موج انفجار به هدف وارد می گردد، برابر مساحت زیر منحنی در فاز مثبت منحنی فشار – زمان است و با  $i_s$  نمایش داده می شود.

### ۳–۲. 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 بهعنوان فاز فشار شوک تعریف می شود. موج شوک به سطوحی که فضای بسته را ایجاد نمودهاند برخورد نموده و آنها را بارگذاری میکند و همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده، در نتیجه این برخورد امواج شوک انعكاسي توليد مي شود. مدت زمان دوام فاز فشار شوك بسيار كوتاه 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 میشود و تعریف آن بسیار دشوار خواهد بود. امواج شوک انعکاس یافته منتشر شده و با سطوح مختلف موجود در محيط اندركنش انجام مىدهد. هر كدام از اين اندركنش ها، 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 ٔ میگویند که در اثر نشت گاز از فضای بسته و نیز سرد شدن دمای گازها، فشار به فشار محيط خواهد رسيد. مدت زمان دوام فاز فشار گاز بهطور قابل 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 می گویند.



شکل ۴. شوک ناشی از انفجار و شوک انعکاس یافته در محیط محصور [۱۰]

تاریخچه فشار-زمان در انفجار داخلی به میزان زیادی وابسته به عملکرد دیوارهای محصورکننده سازه بستگی دارد. در صورتی که این دیوارها تا پایان بارگذاری انفجار باقی بمانند، اثرات انعکاس فشار قابل توجه است و در صورتی که اتصال قوی بین دیوار و قاب وجود نداشته باشد، این اثرات قابل صرفنظر کردن میباشد. با توجه به اینکه در ساخت و ساز معمول در کشور، اتصالی بین دیوار و ستون وجود ندارد و اتصال دیوار به تیر نیز تنها با استفاده از ملات تأمین می گردد، در

<sup>1</sup> Gas Pressure Phase

این مقاله فرض شده که دیواره ای 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

برای اطمینان از دقت پیشبینیهای ارائه شده توسط مدلهای اجزای محدود، لازم است در ابتدا صحتسنجی مدلسازی صورت گیرد. 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، میتوان به نتایج حاصل از مدلسازی اجزای محدود اطمینان نمود.

آزمایشی که برای این کار انتخاب شده ، آزمایشی است که در سال ۲۰۰۸ توسط تهریر و حسین [۱۲] بر روی نمونههای اتصال صفحه انتهایی پیچی انجام گرفته است. تصویر شماتیک دستگاه آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است. پای ستون به صورت گیردار ساخته شده است. در بالای ستون امکان حرکت در جهت عمودی وجود دارد و سایر درجات آزادی مقید شده اند. بار گذاری در انتهای تیر با استفاده از جک هیدرولیکی انجام می شود.

لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر، هشت نمونه اتصال صفحه انتهایی در دو گروه اتصالات صفحه انتهایی فـلاش<sup>۳</sup> و توسـعهیافتـه<sup>۴</sup> مورد آزمایش قرار گرفته است.



**شکل ۵**. پیکربندی دستگاه انجام آزمایش بر روی نمونههای اتصال صفحه انتهایی [۱۲]

برای انجام صحتسنجی نمونه EEP1 مورد استفاده قرار گرفته است و مشخصات آن در جدول (۱) ذکر گردیده است. مدل رفتاری مورد

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Quasi-Static

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Flash End Plate

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Extended End Plate

استفاده برای شبیه سازی رفتار فولاد، رفتار دوخطی با در نظر گرفتن سخت شوندگی کرنش مطابق اعداد ذکر شده در جدول (۲) بوده است. جزئیات دو دسته نمونه آزمایش شده در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. جزئیات دو دسته نمونه آزمایش شده [۱۲]

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه EEP1 (ابعاد بر حسب میلی متر)

.1:	ستون	تير	اندازه پيچ	رديف		ضخامت و		
نمونه				پيچ	عرض	عرض صفحه		
-			•	كششى		ایی	انته	
	HB	HB						
EEP	× ٣••	×۵۰۰	۲۰	٣	۲۰۰	١٢	γ	
1	× ٣••	× 7 · ·						
	۸۳/۵	1.7						

**جدول ۲**. مشخصات مکانیکی نمونه EEP1

تنش تسليم (MPa)	تنش نهایی(MPA)	کرنش نهایی		
۳۵۱	۵۱۰	٠/١۵		

خصوصیات هندسی و مشخصات مصالح مدل بهطور دقیق مشابه نمونه آزمایش تنظیم شده است. برای شبیهسازی مشخصات فولاد، از منحنی تنش-کرنش دوخطی استفاده شده است. مدل اجزای محدود با استفاده از المانهای solid ایجاد گردید.

ارتباط بین پیچها و محلقرارگیری 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 اعضای در حال تماس از یکدیگر) و خصوصیت تماس مماسی (بهصورت ضریب اصطکاک به میزان ۱/۳) به نرمافزار معرفی گریده است. در مش بندی اعضایی که بین آنها تماس تعریف شده، سعی بر این بوده تا مش بندی اعضاء در سطح تماس، حتی المقدور مشابه باشد.

مقایسه نمودارهای بهدست آمده از آزمایش و مدل اجزای محدود و نیز تغییرشکل نمونهها در شکلهای (۷ و ۸) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، در بخش خطی نمودار، انطباق دقیقی بین سختی اولیه نمونه آزمایش شده و مدل تحلیل شده وجود دارد. در بخش غیرخطی نمودار نیرو- تغییرمکان، حداکثر اختلاف بین نتایج ۷/۶٪ بوده است.



**شکل ۷.** مقایسه نمودار لنگر-دوران حاصل از آزمایش (خط ممتد) [۱۲] و مدلسازی اجزای محدود (خط چین)



شکل ۸. مقایسه تغییرشکل نمونه پس از پایان آزمایش [۱۲] با تغییرشکل پیشبینی شده توسط مدل اجزای محدود

www.SID.ir

در رابطه (۱) بیان شده است:

(1)

مشاهده است.

می شود. معادله مربوط به این مدل رفتاری با صرف نظر از ترم حرارتی

در این رابطه، C، B، C و n ثابتهای مربوط به ماده هستند که از

آزمایش قابل تعیین میباشد. پارامتر σ نشان دهنده تنش تسلیم و

پارامتر ٤ بیانگر کرنش پلاستیک معادل است. پارامتر نرخ کرنش

نرمالیزه شده است. در جدول (۴) مقادیر به کار رفته برای فولاد قابل

 $\sigma = (A + B(\varepsilon_p)^n)(1 + C.\ln\frac{\varepsilon}{c})$ 

#### ۴-۲. طراحی سازه مورد نظر

بعد اطمینان از توانایی روش اجزای محدود در پیش بینی دقیق عملکرد اتصال صفحه انتهایی پیچی، شبیه سازی اثر انفجار بر روی سازه انجام گرفته است. برای این کار، یک اتاق از طبقه اول یک ساختمان که بحرانی ترین طبقه ساختمان است، انتخاب شده است. ارتفاع اتاق مورد مطالعه برابر ۳/۲ متر و ابعاد اتاق ۶×۶ متر در نظر گرفته شده است. سازه ۵ طبقه در نرمافزار ETABS طراحی شده و لنگر و برش آن برای طراحی اتصال صفحه انتهایی به کار برده شده است. سازه طراحی شده در نرمافزار ETABS و بخشی از آن که در نرمافزار ABAQUS مدل سازی شده در شکل (۹) نشان داده شده است. سیستم مقاوم جانبی در یک جهت از نوع قاب گیردار و در جهت دیگر از نوع مهاربندی بوده است. بنابراین اتصالات گیردار و مفصلی به ترتیب در این دو جهت مورد نیاز خواهد بود.

در مرحله بعد، طراحی اتصال گیردار صفحه انتهایی با استفاده از لنگر پلاستیک تیر و برش موجود در محل اتصال انجام شده است. سه نوع اتصال صفحه انتهایی ذکر شده در مقررات ملی ساختمان در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همچنین مشخصات سه اتصال طراحی شده در جدول (۲) بیان شده است. اتصالات به صورت اصطکاکی هستند و نیروی پیش تنیدگی پیچها به صورت اعمال درجه حرارت منفی به پیچها برای کاهش طول و ایجاد نیروی پیش تنیدگی در آنها شبیه سازی شده است.

برای ایجاد اتصال مفصلی در جهت مهاربندی شده سازه، از ورق جوش شده به بال و جان ستون استفاده شده که این ورق با دو پیچ به جان تیر متصل گردیده است.

در گام بعد، مدل دقیق اتصال بههمراه تیر و ستون و با در نظر گرفتن تمامی جزئیات در نرمافزار ABAQUS ساخته شده است. در جدول (۳) مشخصات اتصال نشان داده شده است. بهدلیل وجود تقارن در مدل، تنها یک چهارم اتاق در طبقه اول و دوم مدلسازی شده است. با توجه به استفاده از تقارن، شرایط تکیهگاهی به گونهای در نظر گرفته شده تا اثرات بخش مدل نشده اتاق نیز در نظر گرفته شود. در انجام مش بندی، سعی شده تا در نقاط نزدیک به اتصال و نیز نقاطی از تیر و ستون که توسط صفحه تقارن قطع شدهاند مشربندی ریزتری صورت گیرد. همچنین برای ایجاد مش بندی منظم، اعضاء به تعدادی سلول با شکل هندسی منظم با استفاده از تقسیم بندی از مدل ها نشان داده شده است.

برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در رفتار مواد، مدل رفتاری جانسون-کوک برای شبیهسازی رفتار غیرار تجاعی فولاد مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲]. در این مدل رفتاری، تنش تسلیم به صورت تابعی از کار پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک و دما تعیین

<sup>1</sup> Partitioning

**جدول ۳**. مشخصات اتصالات صفحه انتهایی طراحی شده (میلیمتر)

-	-	••••	•			
	قطر	ضخامت	عرض	طول	طول	
اتصال	بدنه	صفحه	صفحه	صفحه	سخت	ترب
	پيچ	انتهایی	انتهایی	انتهایی	كننده	پيچ
4E	74	18	۲۵۰	۵۰۰	-	۱۰/۹
4ES	74	18	۲۵۰	۵۰۰	۱۸۰	۱۰/۹
8ES	18	18	۲۵۰	۵۸۰	74.	۱۰/۹





شکل ۱۰. انواع اتصالات صفحه انتهایی، الف) چهار ردیـف پیچ بدون سخت کننده (4E)، ب) چهار ردیف پیچ با سخت کننده (4ES) و ج) ۸ ردیف پیچ با سخت کننده (8ES) [۱۲]

جدول ۴. پارامترهای مدل جانسون-کوک استفاده شده برای فولاد

پارامتر	A (MPa)	B (MPa)	Ν	С
مقدار	۳۱۰	۲۵۰	•/7۶	•/•14



شکل ۱۱. مشبندی اتصال صفحه انتهایی پیچی در ABAQUS

سازه با استفاده از روش CONWEP تحت تأثیر ماده منفجره TNT که در مرکز اتاق فرض شده، قرار گرفته است. در تحلیل فرض شده که تمامی دیوارهای سازه در اثر انفجار تخریب شده و بنابراین از انعکاسهای ثانویه موج انفجار صرفنظر شده است. با توجه به نحوه ساخت دیوارهای آجری در کشور که معمولاً اتصال قابل توجهی با تیر و ستون ندارند، انجام این فرض منطقی است. وزن ماده منفجره با توجه به ابعاد اتاق برابر ۵۰ کیلوگرم TNT انتخاب شده است.

یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال نحوه ایجاد مهارجانبی برای تیر است. در این مقاله اثر این پارامتر نیز با در نظر گرفتن مهارجانبی برای بال بالایی تیر در سه مدل 4ES، 4ES و 8ES مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل های 4ES-B، 4ES-B و 8ES نیز بدون در نظر گرفتن مهارجانبی برای بال بالایی تیر ایجاد شدهاند.

شرایط تکیهگاهی برای مدل ساخته شده با در نظر گرفتن تقـارن مورد استفاده در مدلسازی در شکل (۱۲) نشـان داده شـده اسـت. مشخصات مربوط به هر تکیه گاه در جدول (۵) بیان شده است.

ای محدود با	ل اجزا	رای مد	شده ب	تعريف	مرزى	شرايط	مشخصات	ل ۵.	جدوا
							کل (۱۲)	به ش	توجه

					-	-
انتقــال	انتقــال	انتقال	انتقــال	انتق_ال	انتقال	شرط
محور z	محور y	محور x	محور z	محور y	محور x	مرزى
آزاد	مقيد	مقيد	آزاد	مقيد	آزاد	١
مقيد	مقيد	آزاد	آزاد	آزاد	مقيد	۲
مقيد	مقيد	مقيد	مقيد	مقيد	مقيد	٣
آزاد	مقيد	مقيد	مقيد	آزاد	آزاد	۴
آزاد	آزاد	آزاد	مقيد	آزاد	مقيد	* ۵

\* شرط مرزی شماره ۵ تنها در مدلهایی به کار گرفته شده است که بال بالایی تیر در آنها به دلیل اتصال به سقف دارای مهار جانبی فرض شده است.



**شکل ۱۲**. شرایط تکیهگاهی سازه

## ۵. نتایج و بحث

تحلیل دینامیکی صریح <sup>ر</sup>غیرخطی بر روی مدلهای مورد بحث انجام شده است. در شکل (۱۳) تاریخچه تغییر مکان افقی بال پایین تیر (در راستای عمود بر محور تیر) در حالت بدون مهار جانبی در محل اتصال گیردار بر حسب متر نشان داده شده است.



شکل ۱۳. نمودار تغییر مکان افقی- زمان انتهای تیر گیردار برای سه مدل 4E-B (نقطه چین)، 4ES-B (خط خاکستری) و 8ES-B (خط مشکی)

همان طور که ملاحظه می شود، اتصال BES-B، تغییر مکان های کوچکتری را فراهم نموده است. در شکل (۱۴) تاریخچه تغییر مکان انتهای تیر برای اتصال گیردار با مهار جانبی نشان داده شده است.

همانطور که ملاحظه می شود، در این حالت تغییر مکان انتهای تیر به مراتب کوچکتر از تغییر مکان در حالت بدون وجود مهاربندی جانبی تیر است. در این حالت نیز اتصال با ۸ پیچ در بالا و پایین، پاسخ مناسبتری ارائه نموده است. در شکلهای (۱۵ و ۱۶) نمای بالایی از تغییر مکان حداکثر سازه در اثر انفجار نشان داده شده که پیچش تیرها به وضوح در آنها مشخص است.

همانطور که در این شکل ملاحظه میشود، بهدلیـل عـدم وجـود مهار جانبی برای بال بالایی تیر در این حالت پیچش اندکی بهوجـود

آمده و در عوض تغییر مکان جانبی تیرها بهشدت افزایش یافته است، به گونهای که ورق اتصال تیر ساده به ستون دچار گسیختگی شده است.



**شکل ۱۴.** نمودار تغییر مکان افقی-زمان انتهای تیر گیردار برای سه مـدل 4E (نقطه چین)، 4ES (خط خاکستری) و 8ES (خط مشکی)



**شکل ۱۵.** نمای بالا از تغییر شکل سازه در اثر انفجار و کانتور تـنشهـای فون میزس برای مدل 4E (با بزرگنمایی ۳)



**شکل ۱۶.** نمای بالا از تغییر شکل سازه در اثر انفجار و کانتور تنشهای فون میزس برای مدل EB-B (با بزرگنمایی ۳)

همانطور که در شکل (۱۷) ملاحظه می گردد، صفحه انتهایی در مجاورت پیچهای دو ردیف پایین کرنشهای پلاستیک بالایی را تجربه می ماید. مقدار کرنش پلاستیک در صفحه انتهایی در کنار پایین ترین ردیف پیچ حدود ۲/۵٪ است که نشان از لهیدگی صفحه انتهایی در مجاورت ردیف پایینی پیچ دارد.



**شکل ۱۷.** کانتور کرنش پلاستیک معادل در صفحه انتهایی برای مدل 4E (با بزرگنمایی ۳)

### ۶. نتیجهگیری

در مقاله حاضر اثر بارگذاری انفجار بر سازهای با اتصالات صلب صفحه انتهایی پیچی مورد بررسی قرار گرفته است. برای اطمینان از صحت نتایج مدل اجزای محدود، صحتسنجی در گام اول انجام شده و انطباق بسیار نزدیکی بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج پیشبینی 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 آن با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مصالح و هندسی و مدلسازی دقیق تمامی اجازی سازه صورت گرفته است. بار انفجار با استفاده از روش CONWEP که یکی از معمول ترین روشهای اعمال بارگذاری انفجار بر سازهها میباشد، بر سازه وارد شده و تحلیل دینامیکی صریح انجام گرفته است.

نتایج تحلیل نشان میدهد که در اثر انفجار در سازه با مهار جانبی تیر، تیر دچار پیچش شده و بهنوبه خود باعث بروز پیچش در اتصال

می گردد. در حالتی که مهار جانبی برای بال بالایی تیر در نظر گرفته نمی شود، تغییر مکانهای تیر در اثر بارگذاری انفجار به شدت افزایش می ابد، به گونه ای که در تیر با اتصال ساده (در راستای مهار بندی شده)، جان تیر و ورق اتصال در مجاورت پیچها دچار خرابی می شود و این امر سبب بروز ناپایداری در این تیر می گردد. همچنین در محل جوش صفحه به جان ستون و سخت کننده، کرنش های پلاستیک بالایی به وجود می آید و این امر ضرورت استفاده از سخت کننده جانبی برای این صفحه را آشکار می نماید (در طراحی معمول، در حالتی که مقدار برش اتصال کم است از سخت کننده استفاده نمی شود). همچنین سختی کم جانبی این نوع اتصال باعث ایجاد تغییر مکان های بزرگ در تیر ساده خواهد شد.

در اتصال گیردار صفحه انتهایی، صفحه انتهایی در مجاورت پیچهای دو ردیف پایین، کرنشهای پلاستیک بالایی را تجربه مینماید. با مقایسه نتایج ملاحظه گردید که استفاده از تعداد بیشتر پیچ با قطر کمتر میتواند باعث بهبود عملکرد اتصال در برابر بارگذاری انفجار گردد.

#### ۷. مراجع

- [1] Azhari, M.; Mirghaderi, S. R. "Design of Steel Structures"; Third Part, Arkane Danesh Pub., 2010 (in Persian).
- [2] "Connection Gallery, Moment End Plate Connections"; http://www.microstran.com.au/lmc\_gallery\_mepc.htm, 2013.
- [3] Krauthammer, T. "Blast-Resistant Structural Concrete and Steel Connections"; Int. J. Impact. Eng. 1999, 22, 887-910.
- [4] TM5-1300, "Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions"; USA army, 1990.
- [5] Sabuwala, T.; Linzell, D.; Krauthammer, T. "Finite Element Analysis of Steel Beam to Column Connections Subjected to Blast Loads"; Int. J. Impact. Eng. 2005, 31, 861-876.
- [6] ABAQUS finite Element Software, Simulia Inc.
- [7] Hyun, C.; Krauthammer, T. "Load–Impulse Characterization for Steel Connection"; Int. J. Impact. Eng. 2009, 36, 737-745.
- [8] Urgessa, G.; Arciszewski, T. "Blast Response Comparison of Multiple Steel Frame Connections"; Finite Elem. Anal. Des. 2011, 47, 668-675.
- [9] Saedi Daryan, A.; Ziaei, M.; Sadrnejad, S. A. "The Behavior of Top and Seat Bolted Angle Connections Under Blast Loading"; J. Constr. Steel. Res. 2011, 67, 1463-1474.
- [10] Sadrnejad, S. A; Ziaei, M. "Study the Blast Effect on Behavior of T-Stub Bolted Connections"; Passive Defense Quarterly, 2012 (in Persian).
- [11] "Richard Hammond Shows How a Shockwave Can Be Seen"; http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8569953.stm, 2010.
- [12] Tahir, M.; Hussein, A. "Experimental Tests on Extended End-Plate Connections with Variable Parameters"; Steel Structures 2008, 8, 369-381.
- [13] Johnson, G. R.; Cook, W. H. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High"; Proc. of the 7th Int. Symposium on Ballistics; 1983, 541–547.

1+1