

## عملکرد اتصالات پیچی تیر به ستون تحت انفجار

سید امیرالدین صدرنژاد<sup>۱\*</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)

### چکیده

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 مبث دهم مقررات ملی ساختمان، تحت اثر بارهای متعارف و در نرم افزار ETABS طراحی شده و رفتار یکی از اتصالات طبقه اول آن تحت اثر انفجار داخلی در نرم افزار 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 می‌گردد. در اتصال گیردار، ناحیه بحرانی اتصال شامل بخش پایینی ورق انتهایی در مجاورت پایین‌ترین ردیف پیچ‌ها و نیز محل اتصال بال پایینی تیر به ورق انتهایی است. مشاهده شد که اتصال با تعداد پیچ بیشتر، عملکرد مناسب‌تری در برابر انفجار دارد.

**کلید واژه‌ها:** پدافند غیرعامل، انفجار، اتصال صفحه انتهایی پیچی، روش اجزای محدود، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

## Behavior of the Bolted Beam-Column Connections under Blast

S. A. Sadrnejad\*, 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

فولادی با اتصال صفحه انتهایی پیچی با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. 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 می‌گیرد.



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.

در سال ۱۹۹۹ کراتهمر [۳] 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 جزئیات ویژه برای تأمین ایمنی اتصالات 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 به دلیل شکست جوش‌ها دچار خرابی گردند [۴]. به علاوه 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<sup>۲</sup> 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 نمی‌کند. به علاوه، اتصالات صلب تقویت نشده مورد بررسی، عملکرد

پدافند غیرعامل به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌گردد که نیازی به کار گرفتن جنگ‌افزار ندارد و با اجرای آن می‌توان 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 علیه کشور، اهمیت لحاظ نمودن وجوه مختلف پدافند غیرعامل 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، پل‌ها، زیرساخت‌های محصولات کلیدی نظیر بالایشگاه‌ها، 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 به شدت 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.

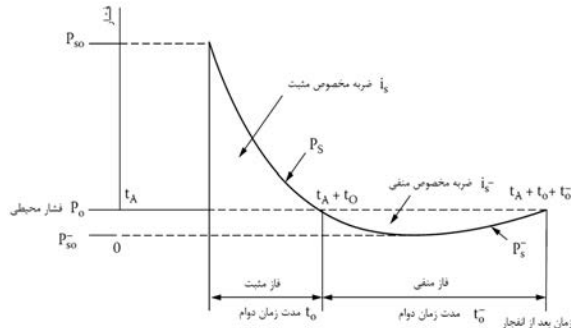
اتصالات پیچی یکی از کاربردی‌ترین نوع اتصالات به دلیل سهولت اجرا و عدم استفاده از جوشکاری در کارگاه است. در بین اتصالات پیچی نیز اتصال ساخته شده با استفاده از صفحه انتهایی<sup>۱</sup> به فراوانی در ساخت سازه‌ها به کار برده می‌شود. این نوع اتصال، هم می‌تواند به عنوان اتصال نیمه‌گیردار و هم به عنوان اتصال گیردار کامل، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین استفاده از پیچ به دلیل شکل‌پذیری 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 شیری در بال‌ها و جوش شیری یا گوشه در جان به ورق انتهایی متصل می‌شود. به دلیل انجام جوشکاری در کارخانه، کیفیت جوشکاری بسیار مطلوب‌تر 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 می‌شود [۱]. در این تحقیق اثر بارگذاری انفجار بر قاب

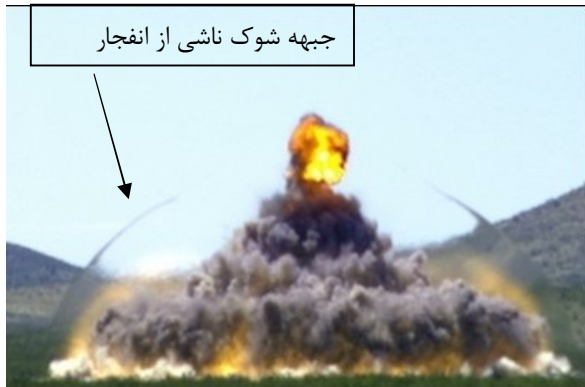
<sup>۲</sup> ABAQUS

<sup>۱</sup> End Plate Connection

جبهه شوک در زمان  $t_A$  به هدف می‌رسد. بعد از گذشت  $t_f$  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  $t_f$  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 پالس فشار تعریف می‌گردد. 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 می‌افتد که به مدت  $t_0^-$  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 (به جز در مورد سازه‌هایی که در کشش ضعیف هستند، مانند سازه‌های خاکی مسلح) و معمولاً از آن صرف‌نظر می‌شود. مقدار ضربه‌ای که در اثر موج انفجار به هدف وارد می‌گردد، برابر مساحت زیر منحنی در فاز مثبت منحنی فشار - زمان است و با  $t_s^-$  نمایش داده می‌شود.

### 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

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

در سال ۲۰۰۸، هیون و کراتهمر [۷] 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 فشار - ضربه مورد بررسی قرار گرفتند. در گام بعد، نمودارهای حاصل 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 حاصل این بود که استفاده از نمودارهای بار - ضربه می‌تواند در شبیه‌سازی رفتار قاب‌های فولادی ساده‌سازی شده به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد.

در سال ۲۰۱۱، اورگسا و آرکیوسکی [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، به دست 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 به همراه 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 نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق 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.

### 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 به دلیل افزایش ناگهانی فشار ناشی از وقوع انفجار، عمودی است. فشار حداکثر ناشی از انفجار که با  $p_0$  نشان داده می‌شود، در انتهای این فاز (فاز افزایش فشار) ایجاد می‌شود. سرعت انتشار  $V$  با زمان و فاصله کاهش می‌یابد، ولی معمولاً از مقدار سرعت صوت در محیط بیشتر است.

این مقاله فرض شده 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.

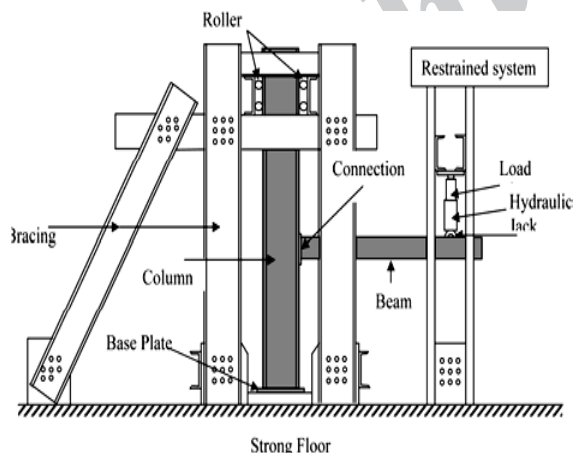
#### ۴. مدل‌سازی اجزای محدود

##### ۴-۱. صحت‌سنجی 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 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 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 شده‌اند. بارگذاری در انتهای تیر با استفاده از جک هیدرولیکی انجام می‌شود.

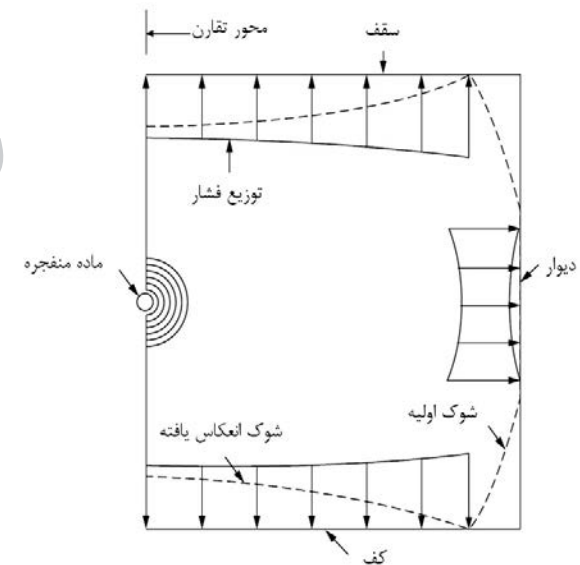
لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر، هشت نمونه اتصال صفحه انتهایی در دو گروه اتصالات صفحه انتهایی فلاش<sup>۳</sup> و توسعه‌یافته<sup>۴</sup> مورد آزمایش قرار گرفته است.



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

مشخصه آن یک افزایش فشار ناگهانی است که به‌عنوان فاز فشار شوک تعریف می‌شود. 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 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 فشار محیط خواهد رسید. مدت زمان دوام فاز فشار گاز به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مدت زمان دوام فاز فشار شوک است. به‌دلیل این مدت دوام طولانی، این فاز را شبه استاتیک<sup>۲</sup> نیز می‌گویند.



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 می‌گردد، در

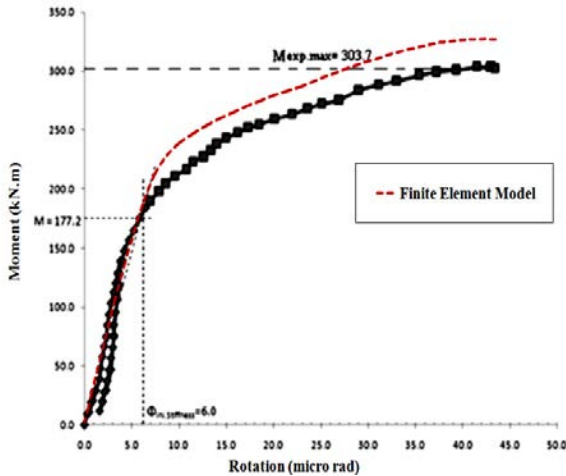
<sup>۳</sup> Flash End Plate

<sup>۴</sup> Extended End Plate

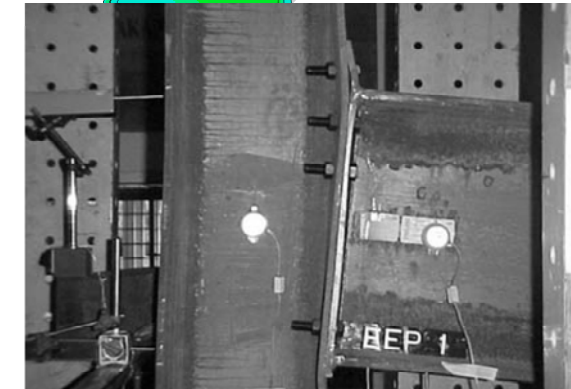
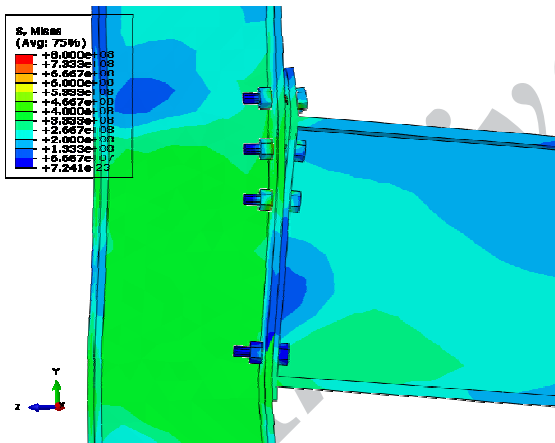
<sup>۱</sup> Gas Pressure Phase

<sup>۲</sup> Quasi-Static

مقایسه نمودارهای به دست آمده از آزمایش و مدل اجزای محدود و نیز تغییر شکل نمونه‌ها در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در بخش خطی نمودار، انطباق دقیقی بین سختی اولیه نمونه آزمایش شده و مدل تحلیل شده وجود دارد. در بخش غیرخطی نمودار نیرو- تغییر مکان، حداکثر اختلاف بین نتایج ۷/۱۶٪ بوده است.

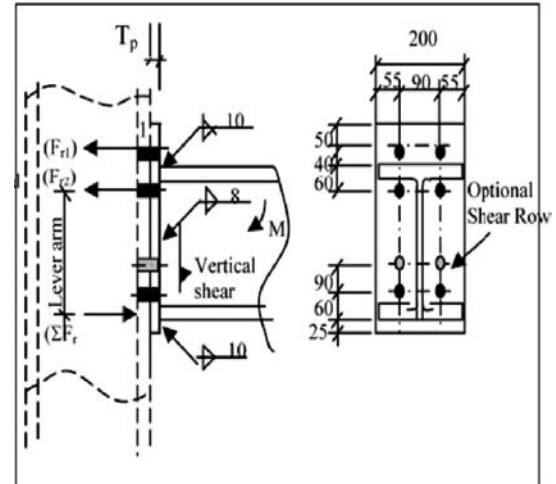


شکل ۷. مقایسه نمودار لنگر-دوران حاصل از آزمایش (خط ممتد) [۱۲] و مدل‌سازی اجزای محدود (خط چین)



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

استفاده برای شبیه‌سازی 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 میلی‌متر)

نام نمونه	ستون	تیر	اندازه پیچ	ردیف پیچ کششی	عرض	ضخامت و عرض صفحه انتهایی
EEP 1	HB × ۳۰۰ × ۳۰۰ ۸۳/۵	HB × ۵۰۰ × ۲۰۰ ۱۰۲	۲۰	۳	۲۰۰	۱۲ ۷۰۰

جدول ۲. مشخصات مکانیکی نمونه EEP1

کرنش نهایی	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۰/۱۵	۵۱۰	۳۵۱

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 محقرارگیری 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 (به‌صورت ضریب اصطکاک به میزان ۰/۳) به نرم‌افزار معرفی گردید است. در مش‌بندی اعضایی که بین آنها تماس تعریف شده، سعی بر این بوده تا مش‌بندی اعضاء در سطح تماس، حتی‌المقدور مشابه باشد.

## ۲-۴. طراحی سازه مورد نظر

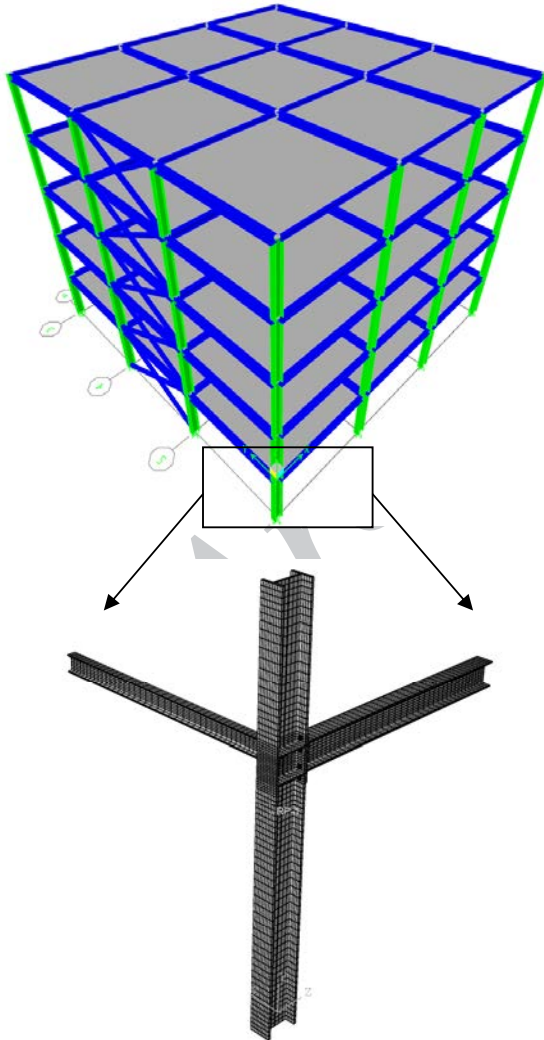
می‌شود. معادله مربوط به این مدل رفتاری با صرف نظر از ترم حرارتی در رابطه (۱) بیان شده است:

$$\sigma = (A+B(\epsilon_p)^n)(1+C \ln \frac{\epsilon}{\epsilon_0}) \quad (1)$$

در این رابطه،  $C$ ،  $B$ ،  $A$  و  $n$  ثابت‌های مربوط به ماده هستند که از آزمایش قابل تعیین می‌باشد. پارامتر  $\sigma$  نشان دهنده تنش تسلیم و پارامتر  $\epsilon$  بیانگر کرنش پلاستیک معادل است. پارامتر نرخ کرنش نرمالیزه شده است. در جدول (۴) مقادیر به کار رفته برای فولاد قابل مشاهده است.

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

درجه پیچ	طول سخت کننده	طول صفحه انتهایی	عرض صفحه انتهایی	ضخامت صفحه انتهایی	قطر بدنه پیچ	اتصال
۱۰/۹	-	۵۰۰	۲۵۰	۱۶	۲۴	4E
۱۰/۹	۱۸۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۶	۲۴	4ES
۱۰/۹	۲۴۰	۵۸۰	۲۵۰	۱۶	۱۶	8ES



شکل ۹. سازه طراحی شده در نرم‌افزار ETABS و بخش مدل شده در ABAQUS

بعد اطمینان از توانایی روش اجزای محدود در پیش‌بینی دقیق عملکرد اتصال صفحه انتهایی 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 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 مدل‌سازی 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.

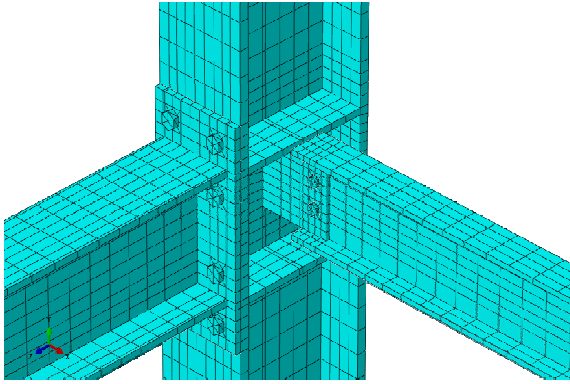
در مرحله بعد، طراحی اتصال گیردار صفحه انتهایی با استفاده از لنگر پلاستیک تیر و برش موجود در محل اتصال انجام شده است. سه نوع اتصال صفحه انتهایی ذکر شده در مقررات ملی ساختمان در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همچنین مشخصات سه اتصال طراحی شده در جدول (۲) بیان شده است. اتصالات به صورت اصطکاکی هستند و نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها به صورت اعمال درجه حرارت منفی به پیچ‌ها برای کاهش طول و ایجاد نیروی پیش‌تنیدگی در آنها شبیه‌سازی 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 به همراه 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. به دلیل 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 مش‌بندی، سعی شده تا در نقاط نزدیک به اتصال و نیز نقاطی از تیر و ستون که توسط صفحه تقارن قطع شده‌اند مش‌بندی ریزتری صورت گیرد. همچنین برای ایجاد مش‌بندی منظم، اعضا به تعدادی سلول با شکل هندسی منظم با استفاده از تقسیم‌بندی<sup>۱</sup> تفکیک شده‌اند. در شکل (۱۱) مش‌بندی بخش اتصال سازه در یکی از مدل‌ها نشان داده شده است.

برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در رفتار مواد، مدل رفتاری جانسون-کوک برای شبیه‌سازی رفتار غیرارتجاعی 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>۱</sup> Partitioning



شکل ۱۱. مش بندی 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.

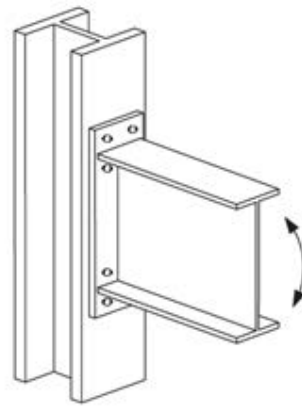
یکی از پارامترهای مؤثر بر رفتار اتصال نحوه ایجاد مهارجانبی برای تیر است. در این مقاله اثر این پارامتر نیز با در نظر گرفتن مهارجانبی برای بال بالایی تیر در سه مدل 4E، 4ES و 8E مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های 4E-B، 4ES-B و 8E-B نیز بدون در نظر گرفتن مهارجانبی برای بال بالایی تیر ایجاد شده‌اند.

شرایط تکیه‌گاهی برای مدل ساخته شده با در نظر گرفتن تقارن مورد استفاده در مدل‌سازی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مشخصات مربوط به هر تکیه‌گاه در جدول (۵) بیان شده است.

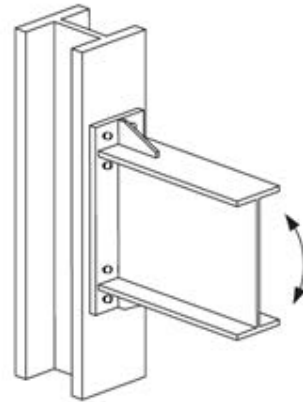
**جدول ۵.** مشخصات شرایط مرزی تعریف شده برای مدل اجزای محدود با توجه به شکل (۱۲)

شرط مرزی	انتقال محور X	انتقال محور Y	انتقال محور Z	انتقال محور X	انتقال محور Y	انتقال محور Z
۱	آزاد	مقید	آزاد	مقید	مقید	آزاد
۲	مقید	آزاد	آزاد	آزاد	مقید	مقید
۳	مقید	مقید	مقید	مقید	مقید	مقید
۴	آزاد	آزاد	آزاد	مقید	مقید	آزاد
۵*	مقید	آزاد	آزاد	مقید	آزاد	آزاد

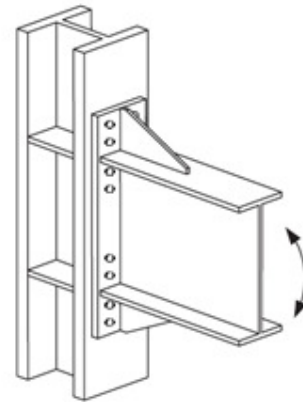
\* شرط مرزی شماره ۵ تنها در مدل‌هایی به کار گرفته شده است که بال بالایی تیر در آنها به دلیل اتصال به سقف دارای مهار جانبی فرض شده است.



(الف)



(ب)



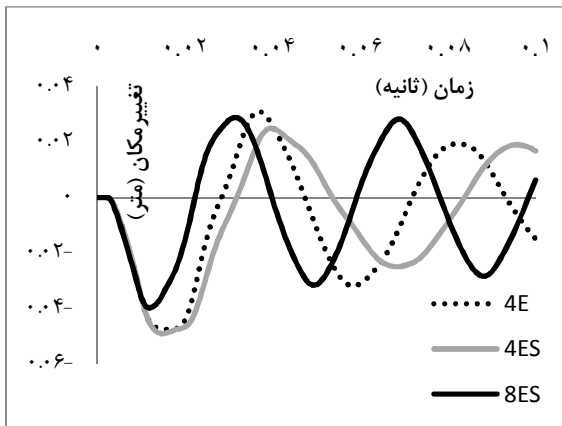
(ج)

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

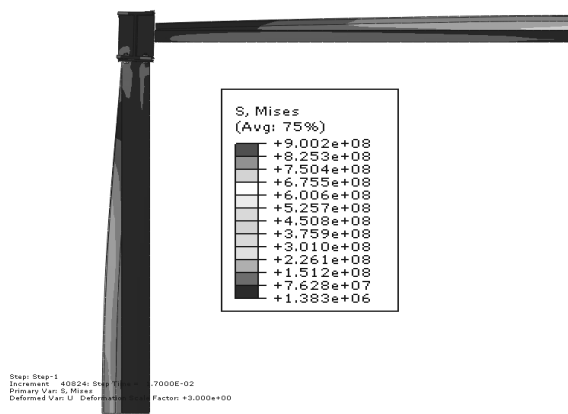
**جدول ۴.** پارامترهای مدل جانسون-کوک استفاده شده برای فولاد

پارامتر	A (MPa)	B (MPa)	N	C
مقدار	۳۱۰	۲۵۰	۰/۲۶	۰/۰۱۴

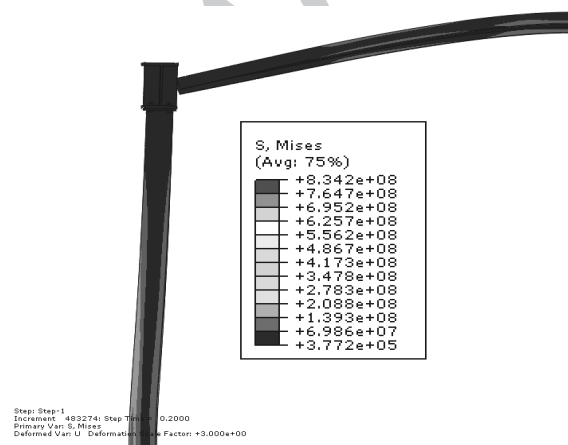
آمده و در عوض تغییر مکان جانبی تیرها به شدت افزایش یافته است، به گونه‌ای که ورق اتصال تیر ساده به ستون دچار گسیختگی شده است.



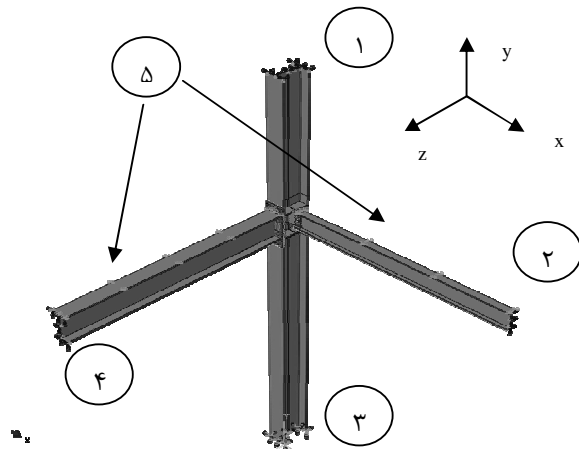
شکل ۱۴. نمودار تغییر مکان افقی-زمان انتهای تیر گیردار برای سه مدل 4E (نقطه چین)، 4ES (خط خاکستری) و 8ES (خط مشکی)



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



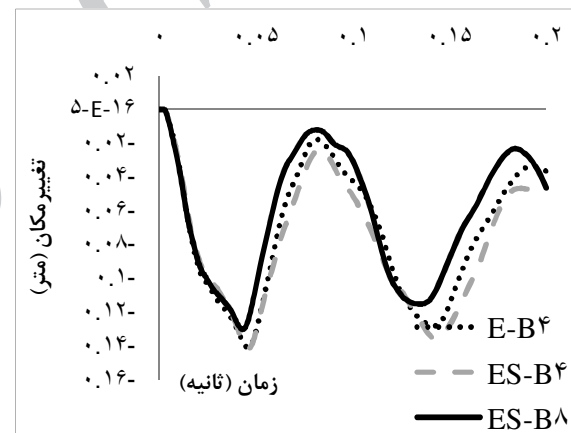
شکل ۱۶. نمای بالا از تغییر شکل سازه در اثر انفجار و کانتور تنش‌های فون میزس برای مدل 4E-B (با بزرگنمایی ۳)



شکل ۱۲. شرایط تکیه‌گاهی سازه

## ۵. نتایج و بحث

تحلیل دینامیکی صریح<sup>۱</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)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اتصال 8ES-B، تغییر مکان‌های 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 می‌شود، در این حالت تغییر مکان انتهای تیر به مراتب کوچک‌تر از تغییر مکان در حالت بدون 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 به‌وضوح در آنها مشخص است.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، به‌دلیل عدم وجود مهار جانبی برای بال بالایی تیر در این حالت پیچش اندکی به‌وجود

<sup>۱</sup> Explicit



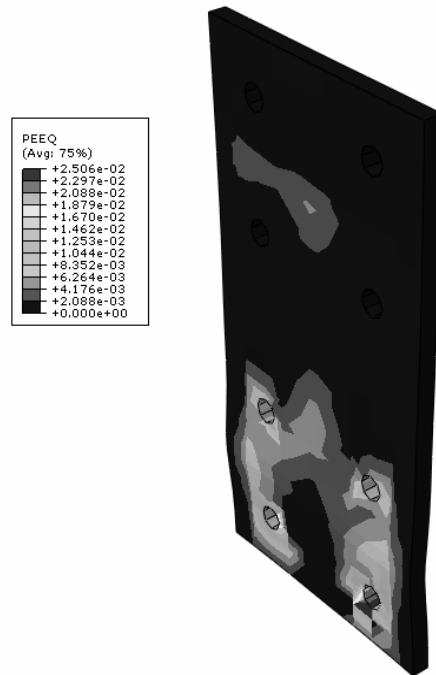
می‌گردد. در حالتی که مهار جانبی برای بال بالایی تیر در نظر گرفته نمی‌شود، تغییر مکان‌های تیر در اثر بارگذاری انفجار به شدت افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در تیر با اتصال ساده (در راستای مهاربندی شده)، جان تیر و ورق اتصال در مجاورت پیچ‌ها دچار خرابی می‌شود و این امر سبب بروز ناپایداری در این تیر می‌گردد. همچنین در محل جوش صفحه به جان ستون و سخت‌کننده، کرنش‌های پلاستیک بالایی به وجود می‌آید و این امر ضرورت استفاده از سخت‌کننده جانبی برای این صفحه را آشکار می‌نماید (در طراحی معمول، درحالتی که مقدار برش اتصال کم است از سخت‌کننده استفاده نمی‌شود). همچنین سختی کم جانبی این نوع اتصال باعث ایجاد تغییر مکان‌های 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](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.

همان‌طور که در شکل (۱۷) ملاحظه می‌گردد، صفحه انتهایی در مجاورت پیچ‌های دو ردیف پایین کرنش‌های پلاستیک بالایی را تجربه می‌نماید. مقدار کرنش پلاستیک در صفحه انتهایی در کنار پایین‌ترین 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 سازه‌های 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 نرم‌افزار ETABS طراحی و تحلیل شده و نتایج حاصل از این تحلیل برای طراحی اتصال به‌کار گرفته شده است.

پس از طراحی اتصال، مدل اجزای محدود آن 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 در اثر انفجار در سازه با مهار جانبی تیر، تیر دچار پیچش شده و به‌نوبه خود باعث بروز پیچش در اتصال