

## بررسی رفتار اتصالات فولادی از پیش تأیید شده پیچ و مهره‌ای تحت آتش سوزی و انتخاب بهترین اتصال از حیث عملکرد

سجاد محمدیان آبی<sup>۱\*</sup>، علی طرهانی<sup>۲</sup>، پویا حسنوند<sup>۳</sup>

۱- دکتری تخصصی، گروه سازه و زلزله، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)،

تهران، ایران

۳- استادیار، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸، انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴)

### چکیده

خواص مکانیکی فولاد و ظرفیت باربری سازه‌های فولادی در دماهای بالا به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. یکی از مهم‌ترین اجزاء سازه‌های فولادی که وظیفه انتقال نیروهای اعضا به یکدیگر و به تکیه‌گاه‌ها را بر عهده‌دارند اتصالات میان اعضا می‌باشند. در این پژوهش به کمک نرم‌افزار ABAQUS، اتصال فلنجی چهار پیچی بدون استفاده از ورق لچکی (4e)، اتصال فلنجی چهار پیچی با استفاده از ورق لچکی (4es) و اتصال فلنجی هشت پیچی با استفاده از ورق لچکی (8es) مدل‌سازی و تحت بارگذاری حرارتی تحلیل شده‌اند. در نهایت، رفتار این ۳ نوع اتصال با استفاده از منحنی‌های تغییر مکان نقاط وسط و انتهای تیر در دو مرحله، تا قبل از شروع آتش‌سوزی و در انتهای آتش‌سوزی مورد مقایسه قرار گرفته است. نمودار تغییرات جابجایی در نقطه انتهایی تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی، نشان می‌دهد که لچکی باعث کاهش ۱۰٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال 4es، نسبت به اتصال 4e شده است. با شروع فرآیند آتش‌سوزی روند تغییرات جابجایی، ابتدا روند افزایشی و سپس کاهش یافته است. منحنی‌های تغییر مکان تیر پس از آتش‌سوزی نشان می‌دهد که لچکی باعث کاهش ۳۵٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال 4es، نسبت به اتصال 4e در انتهای تیر شده است.

**کلیدواژه‌ها:** اتصالات پیچ و مهره‌ای، آتش‌سوزی، لچکی، اتصالات از پیش تأیید شده، ABAQUS.

## Comparison of Modeling and Performance of Different Lateral Load Resisting Systems in High-Rise Concrete Frames

S. Mohammadian Abi<sup>1\*</sup>, A. Tarhani, P. Hassanvand<sup>3</sup>

Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 2020/04/10, Revised: 2020/06/21, Accepted: 2020/06/08, Published: 2020/06/18)

### Abstract

The mechanical properties of steel and the load-bearing capacity of steel structures significantly decrease at elevated temperatures. One of the most important components of steel structures, responsible for transferring forces between members and to supports, are the connections. In this study, using ABAQUS software, a four-bolt flange connection without a gusset plate (4e), a four-bolt flange connection with a gusset plate (4es), and an eight-bolt flange connection with a gusset plate (8es) were modeled and analyzed under thermal loading. Finally, the behavior of these three types of connections was compared using displacement curves at the midspan and the beam end in two stages: before the fire initiation and at the end of the fire. The displacement variation curve at the beam end before fire initiation shows that the gusset plate reduced the maximum displacement in the 4es connection by 10% compared to the 4e connection. At the onset of the fire, the displacement trend initially increased and then decreased. The displacement curves after the fire indicate that the gusset plate reduced the maximum displacement at the beam end in the 4es connection by 35% compared to the 4e connection.

**Keywords:** Triangular stiffener plate, Bolted connections, Pre - approved connections, Fire, ABAQUS

\*Corresponding Author: Sajjad.mohammadian@srbiau.ac.ir

## ۱. مقدمه

با نگاهی به گذشته و بررسی آمار، ارقام و تاریخ سوانح آتش‌سوزی، می‌توان دریافت که بشر همواره با آتش‌سوزی در ساختمان‌ها دست‌به‌گریبان بوده و هزینه‌های سنگینی را متحمل شده است؛ به‌طوری‌که هرساله عده‌ای از شهروندان بر اثر آتش‌سوزی در ساختمان‌های مختلف جان خود را از دست می‌دهند یا دچار جراحاتی می‌شوند و همچنین میلیاردها تومان از سرمایه‌های کشور بر اثر حریق از بین می‌رود. ابعاد این خسارات هم‌زمان با توسعه شهری و صنعتی افزایش می‌یابد. یکی از مباحث مهم دیگر، وقوع آتش‌سوزی پس از زلزله است؛ در اکثر مواقع، خسارت ناشی از آتش‌سوزی بعد از وقوع زلزله، شدیدتر از خسارت خود زلزله است. با توجه به این‌که ایران یکی از کشورهای زلزله‌خیز جهان است، آسیب دیدن تأسیسات برق شهری و خطوط انتقال گاز در هنگام زلزله می‌تواند باعث وقوع آتش‌سوزی شود؛ به‌طوری‌که خسارت ناشی از آتش‌سوزی بیشتر از خود زلزله باشد. این امر به دلیل از بین رفتن پوشش اعضای سازه‌ای آسیب‌دیده، تغییرات به وجود آمده و تنش‌های پسماند حاصله در اثر زلزله است. با اندکی دقت در نحوه شکست اکثر سازه‌های فولادی تحت بارگذاری‌های مختلف، می‌توان دریافت که ضعف اتصال می‌تواند عامل بسیار تعیین‌کننده‌ای در خرابی سازه‌های فولادی باشد. خرابی اتصال، با توجه به نوع و محل قرارگیری آن، می‌تواند موجب خرابی موضعی یا خرابی کلی از نوع خرابی پیش‌رونده در سازه شود. پس از حادثه فروپاشی برج‌های تجارت جهانی در اثر برخورد هواپیما و آتش‌سوزی ناشی از آن، مشخص شد که حتی اگر سازه‌ای بتواند تحت اثر بارهای ناشی از زلزله و بارهای غیرمتعارف نظیر برخورد هواپیما گول‌بیکر رفتار مناسبی از خود نشان دهد، بازهم در مقابل آتش‌سوزی پس‌از آن بسیار ضعیف است.

بررسی رفتار اتصالات فولادی در معرض آتش در چند سال گذشته توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است. چونگ و همکاران [۱] با استفاده از دو روش آزمایشگاهی و مدل المان محدود، تأثیر استفاده از فولادهای مقاوم در برابر آتش در اتصالات تیر و ستون سازه‌های فولادی را بررسی کردند و دریافتند که استفاده از این فولادها، زمان تحمل اتصالات در دماهای بالا را افزایش می‌دهد، تغییر شکل را کاهش می‌دهد و دمای بحرانی شکست در اتصالات خمشی تیر و ستون را بالا می‌برد. سانتیاگو و همکاران [۲] آزمایش‌هایی بر اتصال صلب با ورق انتهایی کشیده و هم‌تراز، در دو حالت جوش شده و پیچ شده انجام دادند و نشان دادند که اتصالات ورق انتهایی باید در مود اول دچار گسیختگی شوند، به این معنی که ورق اتصال باید گسیخته شود و از گسیختگی پیچ‌ها جلوگیری به عمل آید. ساعدی‌داریان و همکاران [۳] عملکرد اتصالات نبشی پیچی (بالا، پایین و جان) در برابر بارگذاری انفجاری را با استفاده از تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار

ANSYS بررسی کردند و نشان دادند که نواحی بحرانی اتصال و نحوه گسیختگی قابل‌شناسایی بوده و این اتصالات رفتار مشخصی در برابر بارهای انفجاری از خود نشان می‌دهند. کیانگ و همکاران [۴] هفت اتصال ورق انتهایی پر مقاومت را تحت کاهش دما از حدود  $550^{\circ}\text{C}$  تا دمای محیط مشابه مرحله سرد شدن یک پدیده آتش‌سوزی آزمایش کردند و مشاهده کردند که این اتصالات پس از آتش‌سوزی قادرند بیش از ۹۰٪ ظرفیت باربری خود را در حین سرد شدن بازیابند، که برای استفاده مجدد از سازه‌های فولادی اهمیت دارد. سیف و همکاران [۵] مدل‌سازی المان محدود اتصالات را با محوریت کنترل تغییرات ظرفیت اتصال برای دماهای مختلف و مدهای گسیختگی احتمالی انجام دادند و نشان دادند که افزایش دما از  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $400^{\circ}\text{C}$  ظرفیت اتصال را ۲۰٪ کاهش می‌دهد؛ از  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $500^{\circ}\text{C}$  کاهش ۳۰٪ و در  $600^{\circ}\text{C}$  ظرفیت نهایی اتصال به میزان ۷۰٪ از دست می‌رود. حسینی و همکاران [۶] روش حل بسته تحلیلی برای پیش‌بینی منحنی‌های لنگر-دوران و سختی-دوران اتصالات تیر I شکل به ستون لوله‌ای ارائه دادند و نتایج مدل تحلیلی با مدل اجزای محدود کوپل مکانیکی-حرارتی غیرخطی و آزمایش‌های مقیاس کوچک و بزرگ تطابق قابل قبولی داشت. وینکل و همکاران [۷] نشان دادند که این اتصالات تحت بارهای دینامیکی و دماهای بالا رفتار غیرخطی قابل‌توجهی دارند. علی و همکاران [۸] منحنی‌های لنگر-دوران اتصالات تیر I شکل به ستون‌های لوله‌ای را تحلیل و نشان دادند که این منحنی‌ها می‌توانند به بهبود طراحی سازه‌های دریایی کمک کنند. سینیدا و همکاران [۹] دریافتند که اتصالات باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که در شرایط حرارتی مختلف عملکرد بهینه داشته باشند. خادور [۱۰] اثر بارهای جانبی بر اتصالات تیر I شکل به ستون‌های لوله‌ای را بررسی و پیشنهادهایی برای بهبود طراحی ارائه کرد. پاور و همکاران [۱۱] رفتار غیرخطی اتصالات تیر I شکل به ستون‌های لوله‌ای را مطالعه و نشان دادند که تحت شرایط بارگذاری متفاوت به‌شدت تغییر می‌کند. یانگ و همکاران [۱۲] تحلیل و طراحی این اتصالات را انجام دادند و نشان دادند که بهینه‌سازی طراحی می‌تواند ایمنی و کارایی سازه‌ها را افزایش دهد. یحیایی و همکاران [۱۳] آزمایشگاهی رفتار تیر و اتصالات وصله‌ای پیچی در قاب‌های خمشی درختی تحت آتش ISO۸۳۴ را بررسی کردند و دریافتند که اتصال تیر میانی به دستک به علت گسیختگی برشی پیچ‌های وصله بالایی در دمای بالاتر از  $750^{\circ}\text{C}$  دچار خرابی می‌شود، درحالی‌که تیر خیزهای بزرگی بیش از یک‌بیستم دهانه را تجربه می‌کنند. صدر نژاد و همکاران [۱۴] اتصالات صفحه انتهایی پیچی تحت انفجار را با روش اجزای محدود بررسی کردند و دریافتند که انفجار باعث پیچش تیر می‌شود و اتصالات با تعداد پیچ بیشتر عملکرد بهتری دارند. چانگ و همکاران [۱۵] عملکرد پس از آتش‌سوزی اتصالات فولادی با اتصالات لغزش بحرانی را ارزیابی کردند و نشان دادند که پس از قرارگیری در دماهای تا  $^{\circ}\text{C}$

است و نیاز به کنترل ضوابط ویژه‌ای ندارند. از این رو، در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، اتصالات از پیش تأیید شده به شرح زیر معرفی شده‌اند: اتصال مستقیم تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)، اتصال فلنجی چهار پیچی بدون استفاده از ورق لچکی (BUEEP)، اتصال فلنجی چهار یا هشت پیچی با استفاده از ورق لچکی (BSEEP)، اتصال پیچی به کمک ورق‌های زیر سری و روسری (BFP)، اتصال جوشی به کمک ورق‌های روسری و زیر سری (WFP) و اتصال مستقیم تقویت نشده‌ی جوشی (WUF-W).

از بین اتصالات از پیش تأیید صلاحیت شده، سه نوع اتصال پیچ‌مهره‌ای: اتصال فلنجی چهار پیچی بدون استفاده از ورق لچکی (۴E)، اتصال فلنجی چهار پیچی با استفاده از ورق لچکی (۴ES) و اتصال فلنجی هشت پیچی با استفاده از ورق لچکی (۸ES)، به منظور بررسی رفتار اتصالات فولادی پس از آتش سوزی در این پژوهش انتخاب (جدول ۱) و سپس مدل سازی و تحلیل شده‌اند. در جدول (۱) نام گذاری این نوع اتصالات به همراه نام مخفف آیین نامه و نماد آن‌ها ارائه شده است [۲۰].

جدول ۱. نام گذاری انواع اتصالات فلنجی

نماد	مخفف (آیین نامه)	نام گذاری اتصالات فلنجی
۴E	BUEEP	۴ پیچی بدون ورق سخت کننده
۴ES	BSEEP	۴ پیچی با ورق سخت کننده
۸ES	BSEEP	۸ پیچی با ورق سخت کننده

در شکل (۱)، نمای شما تیک این سه نوع اتصال نشان داده شده است. اتصال گیردار چهار پیچه برای مقادیر کم لنگر خمشی و اتصال هشت پیچه برای مقادیر زیاد لنگر خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای طراحی اتصالات، از فولادی با تنش تسلیم  $240 \text{ MPa}$ ، تنش نهایی  $370 \text{ MPa}$  و مدول الاستیسیته‌ی  $2 \times 10^5 \text{ MPa}$  استفاده شده است.

### ۳. آزمون‌های آتش

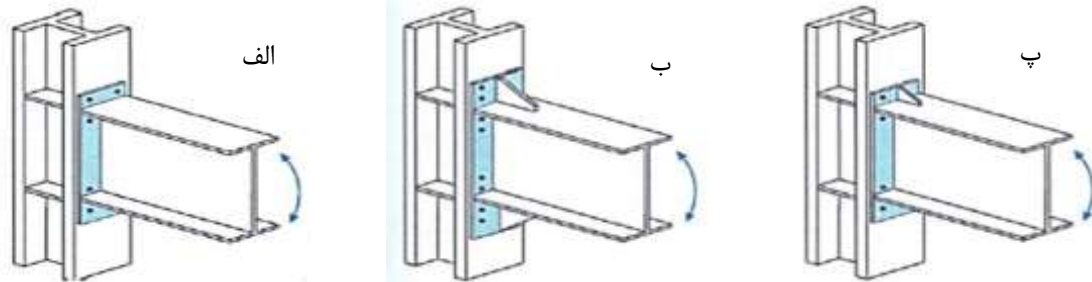
برای ارزیابی رفتار و مشخصات مصالح و اجزای ساختمانی در برابر آتش، از آزمون‌های آتش استفاده می‌شود. با توجه به اینکه هیچ دو حادثه‌ی حریق دقیقاً یکسان نیستند و حتی تکرار سناریوهای حریق در آزمایشگاه‌های پیشرفته مستلزم رعایت دقت فراوانی است، بسیاری از کشورها در این زمینه استانداردهای مخصوص خود را دارند. در عین حال، رویکرد اغلب کشورها به سمت پذیرش استانداردهای واحد اروپایی (EN) یا بین‌المللی (ISO) و تدوین استانداردهای ملی مطابق با آن‌ها است. یک آتش طبیعی در یک فضای بسته، در صورتی که مواد سوختنی و اکسیژن به میزان کافی موجود باشد، از سه مرحله‌ی رشد، اشتعال و فروکش تشکیل شده است.

۸۰۰، اتصالات تغییر شکل باقیمانده تیر یا انحراف ستون نداشتند و ویژگی‌های فولاد همچنان الزامات طراحی دمای اتاق را برآورده کردند. یامان و همکاران [۱۶] تأثیر پوشش‌های مقاوم در برابر آتش بر عملکرد ساختاری اتصالات T فولادی پیچ‌دار را بررسی کردند و نشان دادند که این پوشش‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر رفتار حرارتی و ساختاری اتصالات داشته باشند. لی و همکاران [۱۷] مقاومت ضربه‌ای اتصالات تیر-ستون فولادی قاب الاستیک در شرایط آتش را با تحلیل کوپل ترمو-مکانیکی در نرم‌افزار ABAQUS بررسی کردند و نشان دادند که افزایش دما از  $150^\circ\text{C}$  تا  $750^\circ\text{C}$  مقاومت ضربه‌ای را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، به ویژه در شرایطی که ناحیه آتش یا شدت ضربه بزرگ‌تر باشد. عبدالله و همکاران [۱۸] رفتار اتصال صلب جوش شده تیر به ستون فولادی در سناریو آتش موضعی را بررسی کردند و دریافتند که موقعیت منبع آتش و اندازه جوش بر دوران و خرابی اتصال اثر مستقیم دارد و گسیختگی معمولاً از ناحیه جوش زیر تیر آغاز می‌شود. دای و همکاران [۱۹] رفتار حرارتی و سازه‌ای اتصالات برشی انتهای تیر را در شرایط آتش محفظه بزرگ بررسی کردند و نشان داد که گرمایش ناهمگن در آتش طبیعی باعث کاهش قابل توجه سختی و مقاومت اتصالات شده و عملکرد کلی قاب فولادی تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اتصالات فولادی آسیب دیده در برابر بارهای حرارتی، رفتاری متفاوت از سازه‌های سالم از خود بروز می‌دهند. با وجود مطالعات متعدد در زمینه‌ی عملکرد اتصالات فولادی پس از آتش سوزی، به دلیل تنوع بالای انواع این اتصالات، پژوهش‌های محدودی به بررسی رفتار اتصالات از پیش تأیید صلاحیت شده که در آتش سوزی دچار آسیب شده‌اند، اختصاص یافته است. در همین راستا، پژوهش حاضر به صورت جامع رفتار اتصالات پیچی تأیید شده را تحت تأثیر آتش سوزی پس از وقوع زلزله مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین در این مطالعه، نقش لچکی در عملکرد اتصالات پیچی در دو مرحله‌ی مهم — پیش از آتش سوزی و پس از آن — تحلیل شده است تا تصویری روشن‌تر از نحوه‌ی عملکرد این اتصالات در شرایط بحرانی ارائه شود.

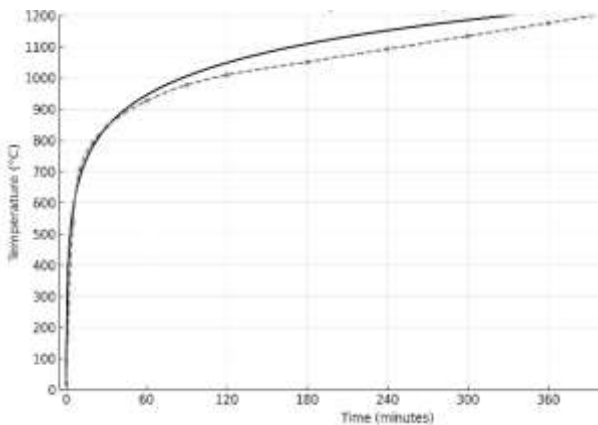
### ۲. معرفی اتصالات از پیش تأیید صلاحیت شده

در این پژوهش، به منظور بررسی رفتار اتصالات فولادی پس از آتش سوزی، مطالعاتی بر روی اتصالات پیچی انجام گرفته است. از میان انواع اتصالات پیچی، اتصالات از پیش تأیید صلاحیت شده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند که در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان معرفی شده‌اند. همان گونه که از نام این اتصالات برمی‌آید، طراحی و اجرای آن‌ها بر اساس روابط و فرمول‌های بیان شده در این آیین نامه و با رعایت ضوابط مربوطه در مناطق لرزه خیز شدید امکان پذیر



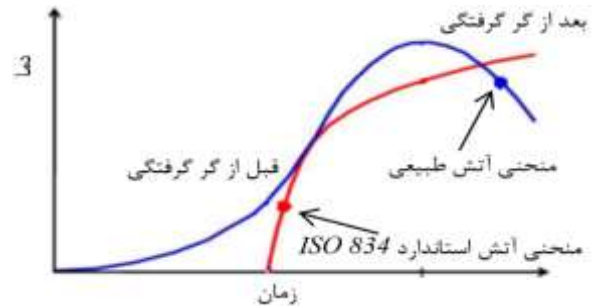
شکل ۱. انواع اتصالات گیردار ورق انتهایی متداول (الف) ۴ پیچه بدون ورق سخت‌کننده (ب) ۸ پیچه با ورق سخت‌کننده (پ) ۴ پیچه با ورق سخت‌کننده [۲۱].

مرحله در هر نوع مدل‌سازی عددی، ایجاد هندسه‌ی مدل است، اجزای مختلف مدل (اتصالات) در ماژول Part نرم‌افزار ABAQUS ساخته شده‌اند. این اجزا شامل ستون I شکل، تیر I شکل، ورق انتهایی، سخت‌کننده‌های تیر، سخت‌کننده‌های ستون، ورق‌های تکیه‌گاه و پیچه‌ها هستند که هر کدام مطابق اندازه‌ی واقعی مدل‌سازی شده‌اند. در جدول (۲)، مشخصات هندسی مقاطع ساخته شده در مدل‌های عددی مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۳. مقایسه بین منحنی‌های دو آیین‌نامه ASTM E119 و ISO ۸۳۴ [۲۲].

اجزا ساخته شده در ماژول Part، در ماژول Assembly با دقت در کنار یکدیگر سرهم‌گذاری می‌شوند. در شکل (۳) هندسه مدل ساخته شده پس از سرهم‌گذاری قابل مشاهده است.



شکل ۲. مقایسه رفتار حریق با منحنی افزایش دمای استاندارد [۲۲].

برای مقایسه‌ی بین منحنی‌های افزایش دما در برخی آیین‌نامه‌های معتبر که تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است، می‌توان منحنی‌های ASTM E119 و ISO ۸۳۴ را مورد بررسی قرار داد. این تمایز در شکل (۳) قابل مشاهده است. در این شکل نمودار ASTM E119 با خط چین و ISO ۸۳۴ با خط پیوسته نشان داده شده‌اند.

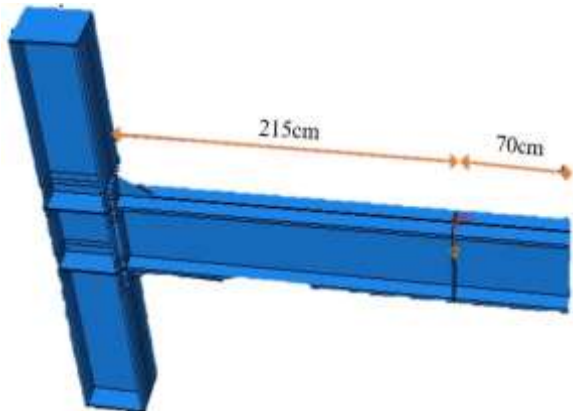
#### ۴. نحوه مدل‌سازی نمونه‌ها در ABAQUS

در این پژوهش، برای حل مسئله از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ABAQUS، که یک نرم‌افزار مهندسی شناخته شده و بسیار پرکاربرد در جهان است، استفاده شده است. سهولت و دقت این نرم‌افزار به حدی است که بسیاری از محققان در دانشگاه‌های معتبر جهان به استفاده از آن پرداخته‌اند. با توجه به اینکه اولین

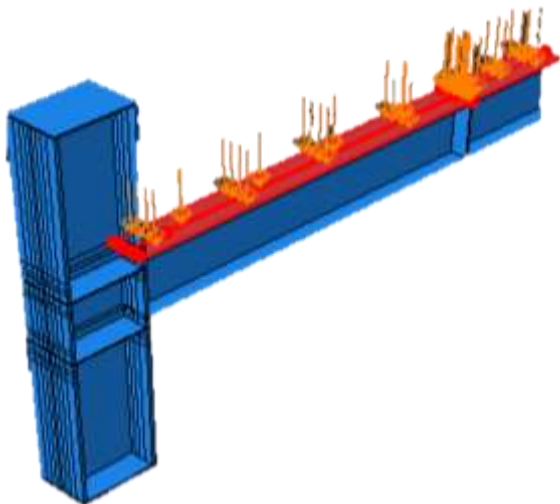
جدول ۲. مشخصات هندسی مقاطع در مدل‌های عددی.

اتصال	مقطع تیر (cm)	مقطع ستون (cm)	قطر پیچ (cm)	ابعاد ورق انتهایی (cm)	ابعاد سخت‌کننده ورق انتهایی (لچکی) (cm)			ضخامت سخت‌کننده ستون (cm)	ضخامت سخت‌کننده تیر (cm)	ضخامت ورق انتهایی ستون (cm)
					*	*	*			
εe	۴۲×۰/۸ و ۲۰×۲	۴۴×۱/۵ و ۳۰×۲	۳	۶۶×۲۲×۳.۵	*	*	*	۱	۱	۱
εes	۴۲×۰/۸ و ۲۰×۲	۴۴×۱/۵ و ۳۰×۲	۳	۶۶×۲۰×۳.۵	۲۲×۱۲×۰.۸			۱	۱	۱
λes	۵۵×۰/۸ و ۲۵×۲/۵	۴۴×۱/۵ و ۳۰×۲	۲/۷	۹۷×۲۵×۴	۳۷×۲۱×۱.۵			۱	۱	۱

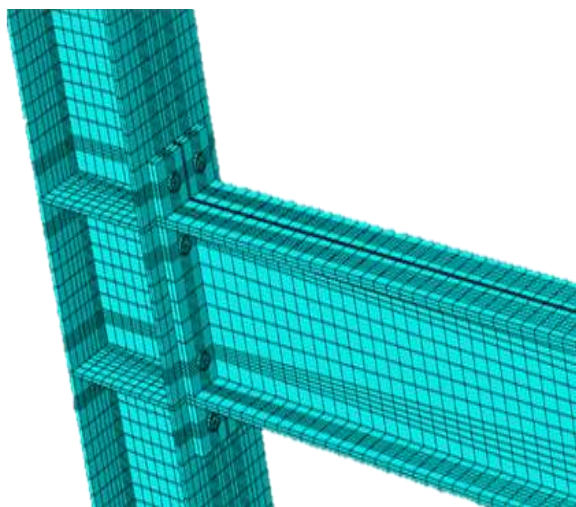
این المان یک المان سه‌بعدی و هشت‌گره‌ای است که به‌طور هم‌زمان دارای درجات آزادی جابه‌جایی و دما است. المان C3D8T در تحلیل توأم مکانیکی-حرارتی به کار گرفته می‌شود. در شکل (۷) مش بندی اتصالات مدل‌سازی شده آورده شده است.



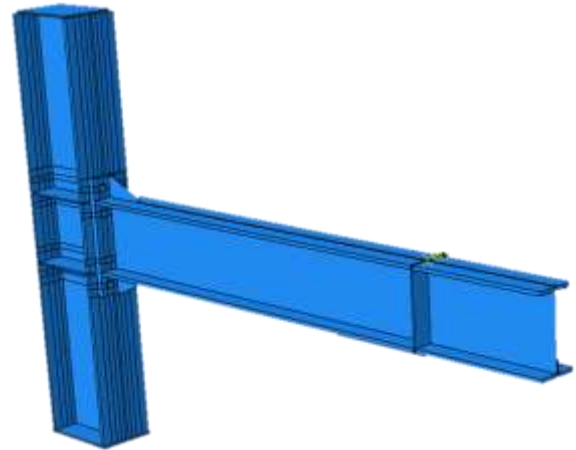
شکل ۵. بار متمرکز در فاصله ۷۰ سانتی‌متری از انتهای تیر.



شکل ۶. بار گسترده دال بر روی تیر در Step-۱.



شکل ۷. مش بندی اتصال Fe



شکل ۴. هندسه مدل نمونه Fe.

در مازول Step مراحل تحلیل به‌صورت پیوسته تعریف شده است. مطابق جدول (۳) این مسئله دارای دو گام حل است. در Step-۱ که به‌صورت Static, General تعریف شده است، بار ثقلی و بار گسترده اعمال می‌شوند. در Step-۲ نیز که به‌صورت Coupled temp-displacement تعریف شده است، اثر حرارت و بار منفرد به‌طور هم‌زمان همراه با اعمال بار ثقلی و گسترده وارد می‌شود.

جدول ۳. گام‌های تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS

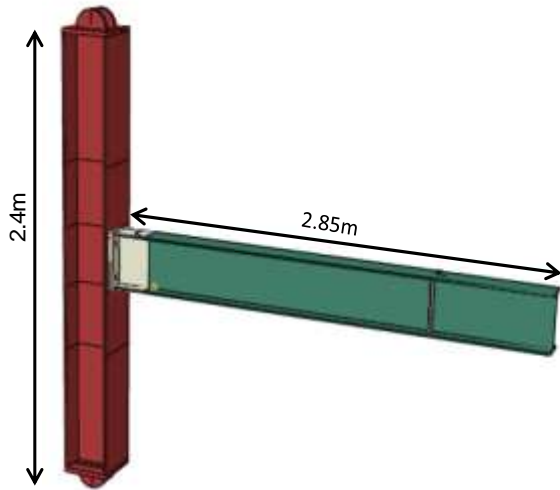
Name	Procedure	Nlgeom	Time
Initial	(Initial)	N/A	N/A
Step-۱	Static, General	ON	۱
Step-۲	Coupled temp-displacement	ON	۱۸۸

به‌منظور اعمال شرایط مرزی مدل، تکیه‌گاه‌های بالا و پایین ستون به‌صورت تکیه‌گاه ساده در نظر گرفته شده‌اند. برای تکیه‌گاه پایین، در هر دو Step-۱ و Step-۲، هر سه راستای X, Y و Z بسته شده‌اند، اما برای تکیه‌گاه بالا، در Step-۲، راستای Y باز گذاشته شده است تا ستون بتواند وارد حل شود و مدل‌سازی پاسخ بهتری ارائه دهد. در مازول Interaction، نحوه‌ی ارتباط بین اجزای اتصال تعریف شده است. برای تعریف تماس اجزایی که به یکدیگر برخورد دارند، از تماس سطح به سطح استفاده شده است.

مطابق شکل (۵) در فاصله ۷۰ cm از انتهای تیر، بار متمرکز ۲۰ kN اعمال شده است. بار دال به‌صورت بار گسترده در Step-۱ به مقدار ۶۰ kN و در Step-۲ به مقدار ۷۲ kN، که مطابق شکل (۶)، بر روی تیر اعمال شده است.

مش بندی در مازول Mesh انجام گرفته است. این مازول دارای ابزاری است که امکان مش بندی اجزای ایجاد شده در قسمت‌های Part و Assembly را فراهم می‌کند. برای مش بندی تیر، ستون، ورق انتهایی، پیچ‌ها و سخت‌کننده‌ها از المان هشت‌گره‌ای C3D8T استفاده شده است. المان انتخابی به‌منظور مدل‌سازی اجزای تیر، ستون، سخت‌کننده المان C3D8T است.

است. خصوصیات مصالح سازه فولادی در دماهای مختلف در مدل مرجع جهت صحت‌سنجی در جدول (۴) آورده شده است. مطابق با مقاله مرجع، بار منفرد ۲۰ KN در فاصله‌ی ۷۰۰ mm از انتهای تیر بر اتصال اعمال می‌شود.



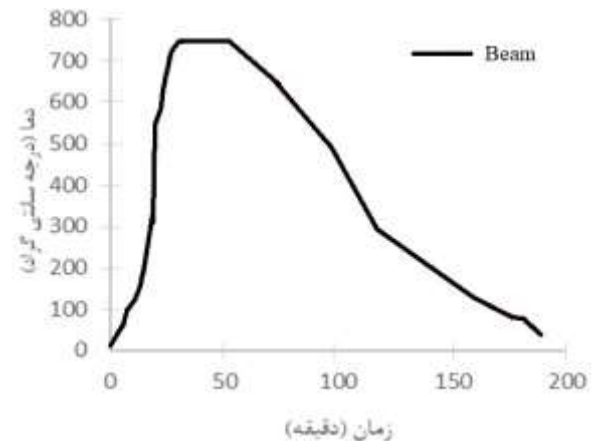
شکل ۱۰. شکل کلی و مشخصات نمونه مرجع جهت صحت‌سنجی [۲۴].

جدول ۴. خصوصیات مصالح سازه فولادی در دمای مختلف در مدل مرجع جهت صحت‌سنجی.

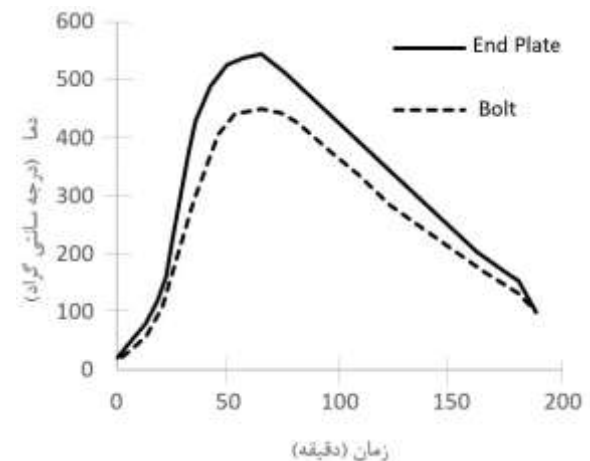
دما (درجه سلسیوس)	E (GPa)	Fy (MPa)	Fu (MPa)
۲۰	۲۱۰	۳۸۸	۴۹۴
۱۰۰	۱۹۲	۳۷۳	۴۹۰
۲۰۰	۱۸۹	۴۳۹	۵۷۱
۳۰۰	۱۷۷	۳۹۲	۵۷۰
۴۰۰	۱۶۸	۳۶۱	۴۷۸
۵۰۰	۱۲۴	۳۱۸	۳۷۱
۶۰۰	۱۰۵	۲۱۵	۲۲۲
۷۰۰	۳۹	۱۱۸	۱۴۷
۸۰۰	۱۸	۴۸	۵۱
۹۰۰	۲	۴۸	۳۷
۱۰۰۰	۱	۲۷	۲۹

برای رسیدن به جواب مطلوب در هنگام گرفتن خروجی در ماژول Visualization، انتخاب سازه‌ی مش تأثیر زیادی در نتیجه به‌دست‌آمده دارد و باید موضوع استقلال از مش بررسی شود. در این پژوهش برای بررسی موضوع استقلال از مش، سازه‌ی مش مقاله مرجع که ۰/۰۴۷ است انتخاب شده است. در شکل (۱۱) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی تغییر مکان وسط تیر آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای رسیدن به خروجی‌های منطبق با مقاله مرجع و نتایج آزمایشگاهی، سازه در نظر گرفته شده (۰/۰۴۷) در مقاله مرجع، خروجی (تغییر مکان وسط تیر) مناسبی را می‌دهد و مدل ساخته شده دارای مقدار خطایی کمتر از ۵٪ نسبت به مقاله مرجع و نتایج آزمایشگاهی است.

بار حرارتی اعمال شده به تیر مطابق شکل (۸) است. صفحه‌ی انتهایی و پیچ‌ها اتصال تحت بار حرارتی مطابق شکل (۹) قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه آتش طبیعی از ۳ مرحله: رشد، اشتعال و فروکش تشکیل شده است. لذا در این پژوهش بارهای حرارتی اعمالی به اعضای اتصال پس از رسیدن به بیشینه‌ی دما، فروکش می‌کنند.



شکل ۸. منحنی دما-زمان اعمال شده به تیر [۲۳].



شکل ۹. منحنی دما-زمان اعمال شده به صفحه انتهایی و پیچ‌ها [۲۳].

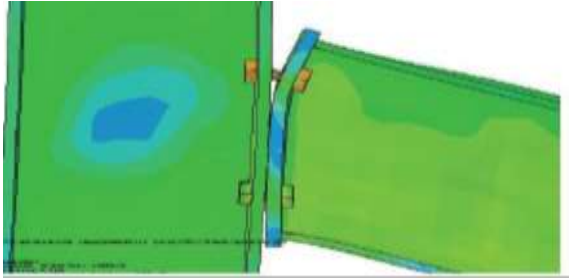
#### ۴. صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی رفتار اتصالات فولادی پس از آتش‌سوزی، از مدل ساخته شده در تحقیق روح‌الله رهنورد و همکاران [۲۴] که آن‌ها هم هندسه و شرایط مرزی را بر اساس نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط والد و همکاران [۲۳]، انجام داده بودند، استفاده شده است. آن‌ها یک ستون به ارتفاع ۲/۴m و یک تیر طره به طول ۲/۸۵m مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی در مقیاس واقعی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی کردند (شکل ۱۰). مقطع تیر اتصال IPE ۳۰۰ و مقطع ستون اتصال HEA ۳۰۰ است.

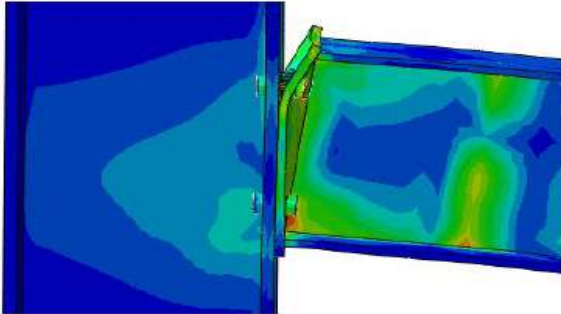
از فولادی با تنش تسلیم ۳۸۸MPa و تنش نهایی ۴۸۵MPa برای مصالح تیر، ستون و ورق انتهایی در مدل‌سازی استفاده شده است. برای اتصال تیر به ستون از پیچ‌های M ۸.۸ بهره گرفته شده



الف



ب

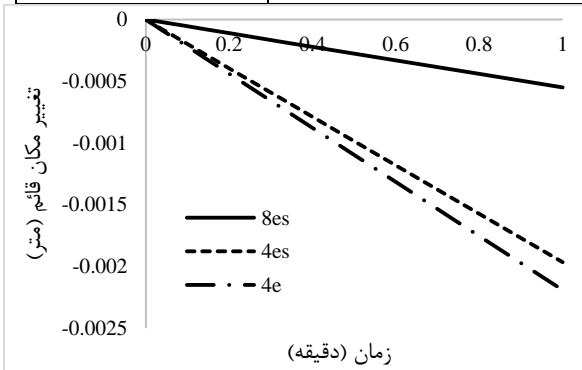


پ

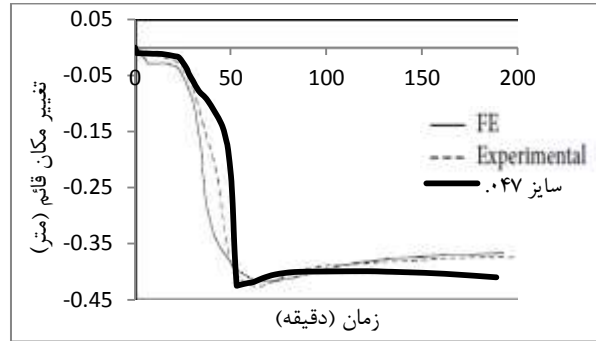
شکل ۱۲. نتایج مربوط به تنش‌ها و محل خرابی در اتصال جهت صحت سنجی: الف) نمونه آزمایشگاهی مرجع ب) مدل اجزا محدود مقاله مرجع ب) مدل اجزا محدود پژوهش حاضر.

جدول ۵. مقایسه تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در سه اتصال تا قبل از شروع آتش‌سوزی.

نوع اتصال	تغییر مکان وسط تیر (mm)
۸es	۰/۶
۴es	۲
۴e	۲/۲



شکل ۱۳. مقایسه تغییر مکان وسط تیر در سه اتصال تا قبل از شروع آتش‌سوزی.



شکل ۱۱. مقایسه نمودار تغییر مکان وسط تیر در مدل‌سازی پژوهش حاضر با نتایج مقاله مرجع و نمونه آزمایشگاهی

تغییر شکل‌های ایجادشده در ناحیه‌ی اتصال برای نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود مقاله و مدل اجزا محدود در تحقیق حاضر در شکل (۲۳) نشان می‌دهند که شکل خرابی نمونه آزمایشگاهی مرجع، مدل اجزا محدود مقاله مرجع و مدل اجزا محدود ساخته‌شده جهت صحت‌سنجی بسیار به هم نزدیک است [۲۳].

### ۵. مقایسه و تحلیل خروجی

#### ۵.۱. مقایسه‌ی تغییر مکان وسط تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، در Step-۱ که به صورت Static General تعریف‌شده، میزان تغییر مکان وسط تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی، به صورت خطی تا زمان ۱ min افزایش می‌یابد. تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در سه اتصال، در زمان ۱ min، مطابق با جدول (۵) است.

بر اساس شکل (۱۳) از ابتدای شروع بارگذاری، تغییر مکان وسط تیر در سه اتصال تا قبل از شروع آتش‌سوزی، آغاز شده و به تدریج افزایش پیدا می‌کند تا در زمان حدود ۱ min به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. تأثیر لچکی بر روی تغییر مکان نقطه وسط تیر از زمان آغاز بارگذاری کاملاً مشهود است، به طوری که ماکزیمم تغییر مکان در اتصال ۴es برابر ۲ mm و در ۴e برابر ۲/۲ mm است. هرچند باگذشت زمان اختلاف نمودارها بیشتر می‌شود اما در زمان ۱ min لچکی باعث کاهش ۹٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es نسبت به اتصال ۴e در وسط تیر شده است. در Step-۱ که به صورت Static General تعریف‌شده است، کاملاً مشهود است که قوی بودن اتصال ۸es نسبت به دو اتصال ۴es و ۴e باعث بهبود عملکرد در تمام لحظات از شروع بارگذاری تا پایان ۱ min شده است. به طوری که در این اتصالات، با این ابعاد که مطابق با همه‌ی الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان می‌باشند، مقدار تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در اتصال ۸es تغییر زیادی نداشته و حدود ۰/۶ mm است و در این زمان نسبت به اتصال ۴es، ۷۰٪ و نسبت به اتصال ۴e، ۷۵٪ تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر کاهش می‌یابد.

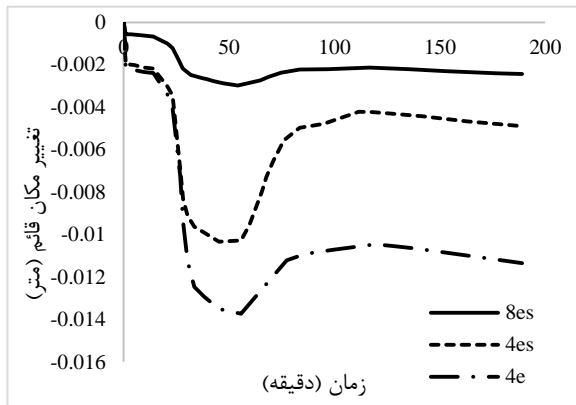
### ۳.۵. مقایسه‌ی تغییر مکان وسط تیر در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی

مقدار تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی، در زمان ۵۵ min که بیشترین دمای اعمالی به اتصال را دارد، مطابق با جدول (۷) است.

**جدول ۷.** مقایسه‌ی تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی.

نوع اتصال	تغییر مکان (mm)
۸es	۳
۴es	۱۰/۳
۴e	۱۳/۷

نمودار تغییر مکان وسط تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی در شکل (۱۵) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که شکل کلی تغییر مکان وسط تیر در سه اتصال مشابه همدیگر است. به طوری که از ابتدای آتش‌سوزی تغییر مکان در سه اتصال شروع شده و به تدریج افزایش پیدا می‌کند تا در زمان حدود ۵۵ min به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. رفتار دو اتصال ۴es و ۴e تا زمان ۳۰ min که دمای حدود  $750^{\circ}\text{C}$  است، کاملاً مشابه یکدیگر است و از این زمان به بعد، تأثیر لچکی بر روی تغییر مکان نقطه وسط تیر کاملاً مشهود است که در ماکزیمم تغییر مکان در اتصال ۴es برابر  $10/3\text{ mm}$  و در ۴e برابر  $13/7\text{ mm}$  است. یعنی لچکی باعث کاهش ۲۵٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es نسبت به اتصال ۴e در وسط تیر شده است. در ادامه با کاهش دمای اعمالی بر اتصال، تغییر مکان وسط تیر نیز کاهش می‌یابد و در انتهای آتش‌سوزی تغییر شکل ماندگار در اتصال ۴es برابر  $5\text{ mm}$  و در اتصال ۴e برابر  $11\text{ mm}$  است، یعنی لچکی باعث کاهش ۵۵٪ تغییر شکل ماندگار در انتهای آتش‌سوزی در اتصال ۴es نسبت به اتصال ۴e در وسط تیر شده است.



**شکل ۱۵.** مقایسه‌ی تغییر مکان وسط تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی

### ۲.۵. مقایسه‌ی تغییر مکان انتهای تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی

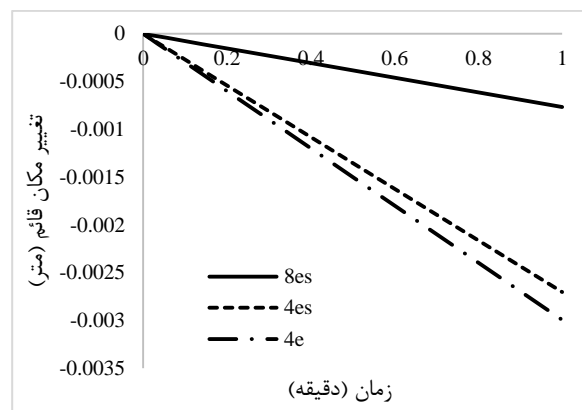
در شکل (۱۴) تغییر مکان در انتهای تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی ارائه شده است. در Step-۱ که به صورت Static General تعریف شده، میزان تغییر مکان انتهای تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی، به صورت خطی تا زمان ۱ min افزایش می‌یابد. تغییر مکان ماکزیمم انتهای تیر در سه اتصال، در زمان ۱ min، مطابق با جدول (۶) است.

**جدول ۶.** مقایسه‌ی تغییر مکان ماکزیمم انتهای تیر در سه اتصال تا قبل از شروع آتش‌سوزی.

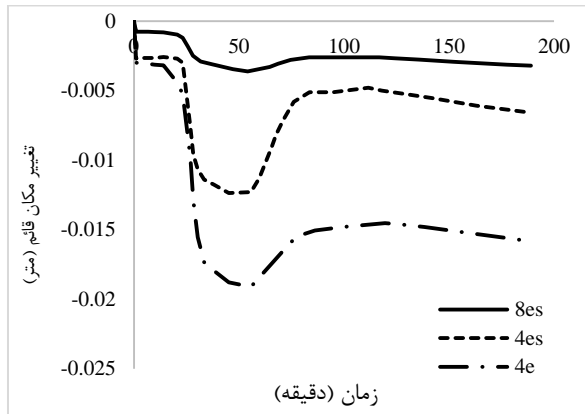
نوع اتصال	تغییر مکان انتهای تیر (mm)
۸es	۰/۷
۴es	۲/۷
۴e	۳

نمودار تغییر مکان انتهای تیر تا قبل از شروع آتش‌سوزی نشان می‌دهد که تغییر مکان در سه اتصال در زمان حدود ۱ min به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. به طوری که ماکزیمم تغییر مکان انتهای تیر در اتصال ۴es برابر  $2/7\text{ mm}$  و در ۴e برابر  $3\text{ mm}$  است. هرچند با گذشت زمان اختلاف نمودارها بیشتر می‌شود اما در زمان ۱ min لچکی باعث کاهش ۱۰٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es نسبت به اتصال ۴e در انتهای تیر شده است.

در Step-۱ که به صورت Static General تعریف شده است نیز کاملاً مشهود هست که قوی بودن اتصال ۸es نسبت به دو اتصال ۴es و ۴e باعث بهبود عملکرد در همه‌ی لحظات از شروع بارگذاری تا پایان ۱ min شده است. به طوری که در این اتصالات نیز، با این ابعاد که مطابق با همه‌ی الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان می‌باشند، مقدار تغییر مکان ماکزیمم انتهای تیر در اتصال ۸es تغییر زیادی نداشته و حدود  $0/7\text{ mm}$  است و در این زمان نسبت به اتصال ۴es، ۷۴٪ و نسبت به اتصال ۴e، ۷۶٪ کاهش مشاهده می‌شود.



**شکل ۱۴.** مقایسه‌ی تغییر مکان انتهای تیر در سه اتصال تا قبل از شروع آتش‌سوزی.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی تغییر مکان انتهای تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی.

همانند بررسی تغییر مکان وسط تیرک املا مشهود است که قوی بودن اتصال 8es نسبت به دو اتصال 4es و 4e، باعث بهبود عملکرد در همه‌ی لحظات از شروع تا پایان آتش‌سوزی شده است. به‌طوری‌که این اتصالات نیز، با این ابعاد که مطابق با همه‌ی الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان هستند، مقدار تغییر مکان ماکزیمم انتهای تیر در اتصال 8es تغییر زیادی نداشته و حدود  $3/6\text{ mm}$  است و در این زمان نسبت به اتصال 4es،  $70\%$  و نسبت به اتصال 4e،  $80\%$  کاهش می‌یابد. در انتهای آتش‌سوزی تغییر شکل ماندگار در اتصال 8es برابر  $3/2\text{ mm}$  است یعنی نسبت به اتصال 4es،  $50\%$  و نسبت به اتصال 4e،  $80\%$  کاهش می‌یابد.

#### ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار اتصالات پیچی تحت اثرات حرارتی ناشی از آتش‌سوزی برای اتصال تیر به ستون فولادی شبیه‌سازی شده و جایجایی نقاط مختلف اتصال قبل و بعد از آتش‌سوزی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به همین منظور به کمک نرم‌افزار ABAQUS، اتصال فلنجی چهار پیچی بدون استفاده از ورق لچکی (4es)، اتصال فلنجی چهار پیچی با استفاده از ورق لچکی (4es) و اتصال فلنجی هشت پیچی با استفاده از ورق لچکی (8es) مدل‌سازی و تحت بارگذاری حرارتی تحلیل گردیده‌اند. روند پردازش مدل‌سازی در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول پردازش (Step-1) که به صورت Static General تعریف شده و تا قبل از شروع آتش‌سوزی را در برمی‌گیرد. در ادامه با شروع فرایند آتش‌سوزی در مرحله دوم پردازش (Step-2) که به صورت Couped Temp-Displacement تعریف شده است که نتایج زیر به‌دست آمده است:

۱- نمودار تغییرات جایجایی تیر در Step-1، به صورت خطی است. در ادامه، با شروع فرایند آتش‌سوزی در Step-2، روند تغییرات تغییر مکان نقاط وسط و انتهای تیر، مطابق با پروفیل‌های

کاملاً مشهود است که قوی بودن اتصال 8es نسبت به دو اتصال 4es و 4e، باعث بهبود عملکرد در همه‌ی لحظات از شروع تا پایان آتش‌سوزی شده است. به‌طوری‌که این اتصالات با این ابعاد که مطابق با همه‌ی الزامات مبحث دهم مقررات ملی ساختمان می‌باشند، مقدار تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در اتصال 8es تغییر چندانی نداشته و حدود  $3\text{ mm}$  است و در این زمان نسبت به اتصال 4es،  $70\%$  و نسبت به اتصال 4e،  $78\%$  کاهش می‌یابد. در انتهای آتش‌سوزی تغییر شکل ماندگار در وسط تیر در اتصال 8es برابر  $2/5\text{ mm}$  است یعنی نسبت به اتصال 4es،  $50\%$  و نسبت به اتصال 4e،  $77\%$  کاهش می‌یابد.

#### ۴.۵. مقایسه‌ی تغییر مکان انتهای تیر در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی

مقدار تغییر مکان ماکزیمم انتهای تیر در سه اتصال، در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی، در زمان  $55\text{ min}$  که بیشترین دمای اعمالی به اتصال را دارد، مطابق با جدول (۸) ارائه شده است.

جدول ۸. مقایسه‌ی تغییر مکان ماکزیمم نقطه انتهای تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی.

نوع اتصال	تغییر مکان (mm)
8es	3/8
4es	12/5
4e	19

نمودار تغییر مکان انتهای تیر در سه اتصال در طول مدت‌زمان آتش‌سوزی در شکل (۱۶) نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که الگوی کلی تغییر مکان انتهای تیر در سه اتصال همانند تغییر مکان وسط تیر، مشابه یکدیگر است. از ابتدای آتش‌سوزی تغییر مکان در سه اتصال شروع شده و رفته‌رفته افزایش پیدا می‌کند تا در زمان حدود  $55\text{ min}$  به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. رفتار دو اتصال 4es و 4e تا زمان  $25\text{ min}$  که در دمای حدود  $700^\circ\text{C}$  است، کاملاً مشابه یکدیگر است و از این زمان به بعد، تأثیر لچکی بر روی تغییر مکان نقطه انتهای تیر کاملاً مشهود است که در ماکزیمم تغییر مکان در اتصال 4es برابر  $12/5\text{ mm}$  و در 4e برابر  $19\text{ mm}$  است. یعنی لچکی باعث کاهش  $35\%$  تغییر مکان ماکزیمم در اتصال 4es، نسبت به اتصال 4e در انتهای تیر شده است. در ادامه با کاهش دمای اعمالی بر اتصال، تغییر مکان نقطه انتهای تیر نیز کاهش می‌یابد و در انتهای آتش‌سوزی تغییر شکل ماندگار در اتصال 4es برابر  $6/5\text{ mm}$  و در اتصال 4e برابر  $15/5\text{ mm}$  است. یعنی لچکی باعث کاهش  $58\%$  تغییر شکل ماندگار در انتهای آتش‌سوزی در اتصال 4es، نسبت به اتصال 4e در انتهای تیر شده است.

- [۴] Qiang, X.; Jiang, X.; Bijlaard, F. S.; Kolstein, H.; Luo, Y. "Post-Fire Behavior of High Strength Steel Endplate Connections—Part ۱: Experimental Study"; J. Constr. Steel Res. ۲۰۱۵, ۱۰۸, ۸۲-۹۳. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۱۴.۱۰۰.۲۸
- [۵] Seif, T. M. M. "Finite Element Modeling of Steel Moment Connections with Fracture for Structural Fire Analyses"; Eng. J., ۲۰۱۶, ۵۳, ۱, ۴۷-۶۰. DOI: ۱۰.۶۲۹۱۳/engj.v۵۳i۱.۱۰۹۳
- [۶] Hosseini, S. A.; Zeinodini, M.; Amin Taheri, T. "Analytical Solution of the Response of the I-Shaped Beam to the Tubular Column Connections at High Temperature"; Amirkabir J. Civ. Eng. ۲۰۲۵, in press (In Persian). DOI: ۱۰.۲۲۰۶۰/ceej.۲۰۲۵.۲۲۷۹۷.۸۰۵۲
- [۷] De Winkel, G. D.; Wardenier, J. "Parametric Study on the Static Behaviour of I-Beam to Tubular Column Connections under in-Plane Bending Moments"; Tubular Struct. ۲۰۲۱, ۳۱۷-۳۲۴. DOI: ۱۰.۱۲۰۱/۹۷۸۰۲۰۳۷۳۵۰۱۵-۴۷
- [۸] Ali, M. N. A. S. "Experimental Moment-Rotation Behavior of Semi-Rigid Beam-to-Column Connections"; Master's thesis, Eastern Mediterranean University EMU, ۲۰۱۵. <http://hdl.handle.net/۱۱۱۲۹/۴۰۵۲>
- [۹] Cinitha, A.; Nandhini, V. "Experimental Studies on Steel Beam-to-Column Connections under Elevated Temperature"; Adv. Appl. Mech. Eng. ۲۰۲۰, ۳۳۵-۳۴۲. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۹۸۱-۱۵-۱۲۰۱-۸\_۳۸
- [۱۰] Khador, M. "Cyclic Behavior of External Diaphragm Joint Between Steel I-Section Beam and Circular Hollow Section Column"; Doctoral dissertation, University of Warwick, ۲۰۱۵. <http://webcat.warwick.ac.uk/record=b۲۷۰۳۸۰۱~S۱>
- [۱۱] Pawar, G. D.; Dawari, V. B. "Seismic Design of Bolted Beam to Column Connections in Tubular Steel Structures—A Review"; Mater. Today ۲۰۲۳, ۲۲-۳۴. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.matpr.۲۰۲۳.۰۳.۱۵۰
- [۱۲] Yang, J.; Sheehan, T.; Dai, X.; Lam, D. "Structural behavior of Beam to Concrete-Filled Elliptical Steel Tubular Column Connections"; Struct. ۲۰۱۷, ۹, ۴۱-۵۲. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.istruc.۲۰۱۶.۰۹.۰۰۵
- [۱۳] Yahyai, M.; Rezaeian, A.; Safaeian, M. "Response of Steel Box Columns in Fire Conditions"; J. Struct. Constr. Eng. ۲۰۱۷, ۴, ۱۰۱-۱۱۲ (In Persian). DOI: ۱۰.۲۲۰۶۵/jsce.۲۰۱۷.۴۴۳۳۳
- [۱۴] Sadrnejad, S. A.; Ziaei, M. "Behavior of Beam-Column Bolted End-Plate Connections under Blast"; J. Adv. Def. Sci. Technol. ۲۰۱۳, ۴, ۹۳-۱۰۱ (In Persian). DOI: ۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۶۷۶۲۹۳۵.۱۳۹۲.۴.۲.۳.۵
- [۱۵] Chang, H. Y.; Lee, C. Y.; Chen, C. H.; "Post-Fire Performance Evaluation of Steel Connections Under a Column-Loss Scenario"; J. Constr. Steel Res. ۲۰۲۳, ۱۹۸, ۱۰۷-۱۱۸. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۲۳.۱۰۷۱۱۸
- دمایی وارد شده ابتدا روند افزایشی داشته و سپس کاهش پیدا می‌کند.
- ۲- در Step-۱، تأثیر لچکی بر روی تغییر مکان نقاط وسط و انتهایی تیر در دو اتصال ۴e و ۴es از همان لحظه آغاز بارگذاری کاملاً مشهود است. در نقطه وسط در زمان ۱min لچکی باعث کاهش ۹٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e شده است. در نقطه انتهایی در زمان ۱min لچکی باعث کاهش ۱۰٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e گردیده است.
- ۳- در Step-۱، مقدار تغییر مکان ماکزیمم وسط تیر در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e، ۷۰٪ و نسبت به اتصال ۴e، ۷۵٪ کاهش می‌یابد. مقدار تغییر مکان ماکزیمم انتهای تیر در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e، ۷۴٪ و نسبت به اتصال ۴e، ۷۶٪ کاهش پیدا می‌یابد.
- ۴- شکل کلی تغییر مکان وسط و انتهایی تیر در سه اتصال، مشابه همدیگر است و در زمان حدود ۵۵min به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که لچکی باعث کاهش ۲۵٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e در وسط تیر شده است. و در انتهای تیر باعث کاهش ۳۵٪ تغییر مکان ماکزیمم در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e گردیده است.
- ۵- در Step-۲، لچکی باعث کاهش ۵۵٪ تغییر شکل ماندگار در انتهای آتش‌سوزی در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e در وسط تیر شده است. و در انتهای تیر باعث کاهش ۵۸٪ تغییر شکل ماندگار در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e گردیده است.
- ۶- در انتهای آتش‌سوزی تغییر شکل ماندگار در وسط تیر در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e، ۵۰٪ و نسبت به اتصال ۴e، ۷۷٪ کاهش می‌یابد. در انتهای آتش‌سوزی تغییر شکل ماندگار در انتهای تیر در اتصال ۴es، نسبت به اتصال ۴e، ۵۰٪ و نسبت به اتصال ۴e، ۸۰٪ کاهش پیدا می‌کند.

## ۷. مراجع

- [۱] Chung, H. Y.; Lee, C. H.; Su, W. J.; Lin, R. Z. "Application of Fire-Resistant Steel to Beam-to-Column Moment Connections at Elevated Temperatures"; J. Constr. Steel Res. ۲۰۱۰, ۶۶, ۲۸۹-۳۰۳. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.jcsr.۲۰۰۹.۰۹.۰۰۹
- [۲] Santiago, A.; Da Silva, L. S.; Real, P. V.; Vaz, G.; Lopes, A. G. "Experimental Evaluation of the Influence of Connection Typology on the Behavior of Steel Structures under Fire"; Eng. J. ۲۰۰۹, ۴۶, ۲, ۸۱-۹۸. DOI: ۱۰.۶۲۹۱۳/engj.v۴۶i۲.۱۲۲۷
- [۳] Saedi-Darian, A.; Ziaei, M.; Sadrnejad, S. A.; Bashiri, M. R. "Investigation of the Behavior of Bolted Top-and-Bottom Angle Connections under Blast Loading"; Passive Defense ۲۰۱۰, ۱, ۱۱-۲۲-. (In Persian).

- [۲۱] Najarnasab, M. J. "Numerical Study of the Effect of Connection Geometry and Steel Type on the Behavior of Rigid Connection with End Plate against Fire"; Khuzestan Jihad University Higher Education Institute, ۲۰۱۶. (In Persian)
- [۲۲] Phan, L.; McAllister, T.; Gross, J.; "Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings NIST Technical Note ۱۶۸۱"; Nat'l Inst. Stan. Technol., ۲۰۱۰. DOI: ۱۰.۱۰۶۱/۴۱۱۳۰(۳۶۹)۲۱۰
- [۲۳] Wald, F.; Da Silva, L. S.; Moore, D. B.; "Experimental Behavior of a Steel Structure Under Natural Fire"; Fire Saf. J. ۲۰۰۶, ۴۱, ۷, ۵۰۹-۵۲۲. DOI: ۱۰.۱۰۱۶/j.firesaf.۲۰۰۶.۰۵.۰۰۱
- [۲۴] Rahnavard, R.; Siahpolo, N.; Naghavi, M.; "Analytical Study of Common Rigid Steel Connections Under the Effect of Heat"; Adv. Civil Eng. ۲۰۱۴, ۱, ۶۹۲۳۲۳ (In Persian). DOI: ۱۰.۱۱۰۵۰/۲۰۱۴/۶۹۲۳۲۳
- [۱۶] Yaman, Z.; Wang, L.; Zhang, L.; "Post-Fire Performance Evaluation of Bolted Steel T-Joints with Varying Fire-Resistant Coatings"; Buildings ۲۰۲۵, ۱۵, ۳۲۵۷. DOI: ۱۰.۳۳۹۰/buildings۱۵۱۱۳۲۵۷
- [۱۷] Li, Z.; Feng, Y.-T.; Xue, T.-Q. "Research on Impact Resistance of Steel Frame Beam-Column Structure Under Fire"; Buildings ۲۰۲۵, ۱۵, ۱۷, ۳۱۴۴. DOI: ۱۰.۳۳۹۰/buildings۱۵۱۷۳۱۴۴.
- [۱۸] Abdullah, A.; Lee, C.; Zhang, Y. "Behavior of Welded Beam-Column Moment Connection in Steel Structure Under Localized Fire Scenario"; Int. J. Steel Struct. ۲۰۲۳, ۲۳, ۱۵۱۳-۱۵۳۰. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۳۲۹۶-۰۲۳-۰۰۷۸۵-۵.
- [۱۹] Dai, X.; Choe, L.; Fischer, E.; et al. "Thermal and Structural Response of Beam-End Shear Connections During a Large Compartment Fire Experiment"; Fire Technol. ۲۰۲۴, ۶۰, ۳۱۷۵-۳۲۰۷. DOI: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۶۹۴-۰۲۳-۰۱۴۵۲-۱.
- [۲۰] Ministry of Housing and Urban Development. Office of the Development and Promotion of National Building Regulations. "Design and Implementation of Steel Buildings - Topic Ten"; ۲۰۱۳, ۳۱۶. (In Persian)