

ارزیابی پاسخ قاب خمشی فولادی در برابر آتش سوزی پس از انفجار

حسین سلیمی مظفرآبادی^۱، سید احمد حسینی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

*hoseini@mut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

چکیده

آتش سوزی و انفجار اغلب هم افزایی دارند. آتش سوزی ممکن است پس از وقوع انفجار رخ دهد و یا اینکه ابتدا آتش سوزی رخ دهد و به دنبال آن انفجار ایجاد شود. عواقب سناریوی ترکیبی آتش و انفجار در رابطه با هر یک از اجزا باید در طراحی یا ارزیابی سازه در نظر گرفته شود. تجزیه و تحلیل آتش و انفجار باید باهم انجام شود و آثار یکی بر دیگری با دقت تجزیه و تحلیل شود. در اغلب تحقیقات و دستورالعمل های طراحی، پدیده آتش سوزی و انفجار مستقل از هم مورد بررسی قرار می گیرند و اندرکنش آن ها کمتر مورد ملاحظه قرار می گیرد. در این تحقیق به این مهم پرداخته می شود و آتش سوزی پس از انفجار و اندرکنش و هم افزایی این دو پدیده با هم مطالعه می شود. سازه مورد مطالعه یک سازه فولادی دو طبقه با کاربری های مختلف (مسکونی، اداری و ...) می باشد که تحت انفجارهای مختلف و به تبع آن تحت آتش سوزی ناشی از تجهیزات داخل ساختمان قرار می گیرد. بارگذاری انفجاری با استفاده از نمودارهای دستورالعمل UFC 3-340-02 و بار آتش با استفاده از مفهوم چگالی آتش و روابط آیین نامه های EUROCODE 1 و EUROCODE 3 محاسبه شده است. برای شبیه سازی بارگذاری انفجاری و حرارتی، از نرم افزار اجزای محدود آباکوس و تحلیل دینامیکی توأم حرارتی- تغییر شکل استفاده شده است. دمای ناشی از آتش سوزی، به صورت آتش طبیعی بکار رفته است و مرحله سرمایش و پس از سرمایش آتش سوزی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. پس از راستی آزمایی شبیه سازی پیشنهادی با دو کار آزمایشگاهی معتبر، تحلیل پاسخ سازه در برابر انواع بارهای انفجاری و آتش سوزی های متعاقب توسط مدل عددی انجام شد. نتایج این بررسی ها نشان داد که پاسخ و تغییر شکل سازه در تحلیل ترکیبی زنجیره ای (اعمال اندرکنش انفجار و آتش سوزی روی سازه) نسبت به تحلیل ترکیبی مستقل (تحلیل مستقل سازه در برابر انفجار و آتش و جمع زدن پاسخ ها باهم) تا ۱۵٪ افزایش دارد و در نظر گرفتن اندرکنش انفجار و آتش نه تنها مهم بلکه ضروری می باشد و عدم در نظر گرفتن این اندرکنش در اغلب موارد موجب پاسخ های کمتر از واقعیت سازه و در نتیجه سبب طراحی غیر ایمن خواهد شد.

واژگان کلیدی: انفجار، آتش سوزی، نرم افزار اجزای محدود آباکوس، اندرکنش میان انفجار و آتش سوزی، حوادث چندگانه زنجیره ای.

۱- مقدمه

در سال‌های گذشته تحقیقات زیادی در خصوص چگونگی تغییر شکل سازه‌ها در برابر بارگذاری انفجاری و بار ناشی از آتش‌سوزی به صورت جداگانه انجام شده است؛ اما در بیشتر این تحقیقات تأثیر حوادث زنجیره‌ای مانند انفجار و آتش‌سوزی پس از آن لحاظ نشده است.

آتش‌سوزی و انفجار اغلب هم‌افزایی دارند. آتش‌سوزی ممکن است پس از وقوع انفجار رخ دهد و یا اینکه ابتدا آتش‌سوزی رخ دهد و به دنبال آن انفجار ایجاد شود. عواقب سناریوی ترکیبی آتش و انفجار در رابطه با هر یک از اجزا باید در طراحی یا ارزیابی سازه در نظر گرفته شود. تجزیه و تحلیل آتش و انفجار باید باهم انجام شود و آثار یکی بر دیگری با دقت تجزیه و تحلیل شود. در اغلب تحقیقات و دستورالعمل‌های طراحی، پدیده آتش‌سوزی و انفجار مستقل از هم مورد بررسی قرار می‌گیرند و اندرکنش آن‌ها کمتر مورد ملاحظه قرار می‌گیرد [1]. با توجه به اهمیت آتش‌سوزی پس از انفجار و اندرکنش و هم‌افزایی که این دو پدیده بر همدیگر دارند در این تحقیق به این مهم پرداخته می‌شود.

طبق بررسی‌های انجام شده، اغلب تحقیقات صورت گرفته راجع به اندرکنش انفجار و آتش، به صورت در نظر گرفتن آثار مستقل این دو بارگذاری، تأثیر یکی از این دو بارگذاری و حذف بارگذاری دومی و ... می‌باشد؛ مانند تحقیقات تاری‌نژاد و همکاران [2] و مقاله بختیاری و آشتیانی [3] که به ترتیب به صورت مجزا در حوزه انفجار و آتش‌سوزی انجام شده‌اند.

عزالدين و همکاران [4] در سال ۲۰۰۰، اولین تلاش را برای تجزیه و تحلیل یکپارچه انفجار و آتش قاب‌های فولادی با استفاده از یک روش تطبیقی انجام دادند. پس از آن‌ها، لیو و چن [5] به بررسی تعامل میان بار انفجار و آتش روی عملکرد ستون‌ها و قاب‌های فولادی دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش حل دینامیکی ضمنی آباکوس پرداختند. مطالعه مقاومت سازه در برابر آتش پس از انفجار برای ستون‌ها و یک قاب فولادی سه‌بعدی در سال ۲۰۰۸، از جمله نتایج تحقیقاتی ریچارد لیو [6] بود. پس از آن یانگ دینگ و همکاران [7] یک روش عددی برای پیش‌بینی آسیب یکپارچه ستون لوله‌ای

فولادی تحت بار انفجار و تأثیر آتش‌سوزی پس از آن معرفی نمودند. پس از آن ونکاتش کودور و عرب‌لویی [8] عملکرد آتش روی اعضای سازه‌ای را هنگام بارگذاری لرزه‌ای و انفجاری در اثر لایه‌لایه شدن عایق آتش بررسی نمودند. سپس در تحقیقی در سال ۲۰۱۷، دانیل فورنی و همکاران [9] روشی را برای یک رویکرد واقع‌بینانه از خطرات چندگانه به منظور مطالعه ظرفیت تحمل مقاومت پسماند ستون‌های فولادی تحت شرایط آتش‌سوزی و به دنبال آن انفجار ارائه کردند. چن و همکاران [10, 11] در سال ۲۰۱۷، به بررسی مقاومت ستون‌های لوله‌ای فولادی پر شده با بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC-FST) در برابر انفجار پس از قرار گرفتن در معرض آتش استاندارد ISO-834 با استفاده از مدل بهبودیافته گریگوریان در قالب کارهای آزمایشگاهی پرداختند؛ سپس در سال ۲۰۱۹ در ادامه کار قبلی خود یک روش تحلیلی برای ارزیابی سطح آسیب ستون‌های RPC-FST که در معرض آتش ناشی از بارگذاری انفجار می‌باشد معرفی کردند. گراسیمیدیس [12] نیز در مقاله‌ای تاب‌آوری یک قاب فولادی چندطبقه را با توجه به خطرات چندگانه که شامل یک سناریوی آتش‌سوزی پس از وقوع حادثه‌ای دیگر (انفجار، سیل، زلزله و ...) است، مورد مطالعه قرار داد. به دنبال آن بررسی روش مسیر بار جایگزین در نادیده گرفتن عامل اولیه ایجاد خرابی پیش‌رونده در قاب‌های فولادی مهاربندی‌شده در طی رخداد یک انفجار و آتش پس از آن از مطالعات جلالی و همکاران [13] بود. در انتها در سال ۲۰۲۱، بررسی آسیب مکانیکی در صفحه پانل دیواری بتن مسلح در معرض آتش‌سوزی پس از انفجار توسط وزنت ماتساکر و تاناگاتا روی [14] با یک مطالعه عددی صورت گرفت.

همان‌طور که ملاحظه شد فقدان انجام تحقیقات در حوزه اندرکنش انفجار و آتش‌سوزی پس از آن به ویژه در سازه‌های فولادی وجود دارد و تأثیر در نظر گرفتن این اندرکنش و مقایسه آن با تحلیل مستقل انفجار و آتش‌سوزی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین حوادث مربوط به فروریزش برج‌های تجارت جهانی در سال ۱۳۸۰ در منطقه منتهن نیویورک، حادثه ساختمان پلاسکو در چهارراه استانبول تهران

یک مینا برای مقایسه، مواد منفجره مختلف با ماده منفجره TNT معادل و مقایسه می‌شوند. پارامتر فاصله مقیاس شده Z برای محاسبه اثر انفجار بر مینای وزن معادل TNT طبق رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (1)$$

در این رابطه، Z فاصله مقیاس شده برحسب متر بر کیلوگرم به توان یک‌سوم، R فاصله از محل انفجار برحسب متر و W وزن ماده منفجره معادل TNT برحسب کیلوگرم می‌باشد.

برای تعیین پارامترهای موج انفجار می‌توان از منحنی‌های ارائه شده در دستورالعمل UFC 3-340-02 استفاده کرد. بر اساس این منحنی‌ها و با توجه به فاصله مقیاس شده می‌توان پارامترهایی مانند بیشینه فشار انفجار در فاز مثبت و منفی، مدت زمان فاز مثبت و منفی انفجار، ضربه ناشی از انفجار در فاز مثبت و منفی را تعیین نمود.

۲-۱-۲- ضریب افزایش دینامیکی

برای در نظر گرفتن تأثیر نرخ کرنش در افزایش مقاومت مصالح، یک ضریب افزایش دینامیکی (DIF) به مقادیر مقاومت استاتیکی اعمال می‌شود. ضریب افزایش دینامیکی تابعی از نوع مصالح و سرعت کرنش است. این ضریب همچنین به نوع تنش نیز بستگی دارد؛ زیرا مقدار بیشینه این تنش‌ها در زمان‌های مختلفی اتفاق می‌افتد و تنش‌های خمشی ممکن است خیلی سریع رخ دهند، درحالی‌که برش‌های بیشینه ممکن است تحت نرخ کرنش پایین به نسبت دیرتر رخ دهند.

۲-۲-آتش سوزی

آتش‌سوزی عبارت است از سوختن مواد سوختنی یا آتشی ناخواسته که در لحظه وقوع از کنترل خارج شده و معمولاً با دود، حرارت و نور همراه است. بر اساس آیین‌نامه‌های Eurocode 1 و Eurocode 3 [16, 17]، چگونگی رفتار و گسترش آتش در سازه‌ها را با دو حالت آتش‌سوزی استاندارد و آتش‌سوزی طبیعی می‌توان مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق از مفهوم آتش‌سوزی طبیعی برای گسترش آتش در قاب خمشی فولادی استفاده شده است. در آتش‌سوزی طبیعی، باسخ

در دی‌ماه ۱۳۹۵ و تخریب بانک‌ها در استان‌های تهران، اصفهان، یزد و ... ناشی از حوادث آبان‌ماه ۱۳۹۸ و در اثر انفجار و آتش‌سوزی پس از آن، ضرورت مطالعه اندرکنش انفجار و آتش‌سوزی را بیش از پیش مشخص می‌نماید؛ بنابراین در این تحقیق پاسخ سازه‌های قاب خمشی فولادی در برابر انفجار سطحی و آتش‌سوزی پس از آن (در ساختمان‌هایی با کاربری‌های مختلف و به صورت آتش طبیعی) و مقایسه آن با حالت بدون اندرکنش مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگام اعمال دمای آتش‌سوزی، کل مراحل آتش (گرمایش، سرمایش و پس از سرمایش) در نظر گرفته می‌شود.

۲- مبانی علمی تحقیق

٢-١- انفجار

به طورکلی، انفجار نتیجه آزاد شدن بسیار سریع مقدار زیادی انرژی در یک فضای محدود است. در فعل‌وانفعالات انفجار ماده شیمیایی، مقادیر زیادی انرژی به‌صورت گرما و فشار در مدت زمان بسیار کوتاه آزاد می‌شود.

مطابق با دستورالعمل UFC 3-340-02 [15] (که یکی از مهم‌ترین مراجع طراحی سازه‌ها در برابر انفجارهای اتفاقی است) فشار ناشی از انفجار فاکتور اصلی در تعیین پاسخ و طراحی اعضای بیرونی سازه می‌باشد. در شکل (۱) منحنی فشار - زمان ناشی از موج انفجار نشان داده شده است.

شکل ۱. منحنی فشار - زمان ناشی از موج انفجار [15]

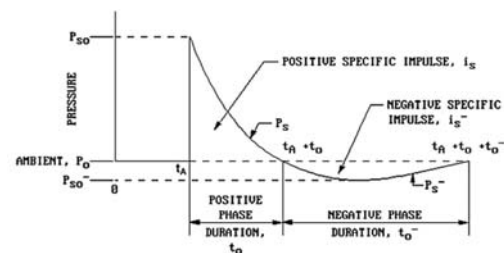


Fig .1. The pressure-time curve caused by the blast wave [13]

۲-۱-۱- بارگذاری انفجاری

به منظور محاسبه پارامترهای موج انفجار معمولاً از روشی به نام روش فاصله مقیاس بندی شده استفاده می شود. برای داشتن

ب) فاز سرد شدن آتش‌سوزی

پس از اتمام فاز گرم شدن با توجه به مقدار بیشینه مدت زمان پارامتری آتش‌سوزی (t_{max}^*) یکی از روابط ۵ تا ۷ برای فاز سرد شدن آتش‌سوزی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- برای $t_{max}^* \leq 0.5h$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - xt_{max}^*) \quad (5)$$

- برای $0.5h \leq t_{max}^* \leq 2.0h$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - xt_{max}^*) \quad (6)$$

- برای $t_{max}^* \geq 2.0h$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - xt_{max}^*) \quad (7)$$

که در روابط فوق، θ_{max} بیشینه دمایی است که در طول فاز گرم شدن به دست می‌آید و $t_{max} = t_{max}^* / \Gamma$ و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t_{max} = \max \left[\frac{0.2 \times 10^{-3} q_{t,d}}{O}, t_{lim} \right] \quad (8)$$

در رابطه ۸، t_{lim} به نرخ رشد آتش بستگی دارد؛ مقادیر t_{lim} در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر t_{lim} [16]

Occupancy	Fire Growth Rate	t_{lim} (min)
Transport (Public Space)	Slow	25
Dwelling, Hospital (Room), Hotel (Room), Office, Classroom of School	Medium	20
Library, Shopping Center, Theatre (Cinema)	Fast	15

Table 1. t_{lim} values [16]

در آتش‌های کنترل‌شده با سوخت، t_{max} برابر t_{lim} می‌باشد، اما در آتش‌های کنترل‌شده با تهویه، t_{max} برابر با $\frac{0.2 \times 10^{-3} q_{t,d}}{O}$ است. اگر $t_{max} > t_{lim}$ ، $x = 1$ و اگر $t_{max} < t_{lim}$ ، $x = \frac{t_{lim}}{t_{max}}$ می‌شود.

دما - زمان در یک قسمت آتش‌گرفته تابعی از اندازه آن قسمت، نوع آن قسمت (با توجه به مواد سوختنی موجود در آن) و ذخیره هوا برای اشتعال می‌باشد.

چگونگی گسترش آتش‌سوزی را می‌توان به سه قسمت تقسیم‌بندی کرد: پیش از فلاش‌اُور (که به نام فاز رشد هم شناخته می‌شود)، پس از فلاش‌اُور (آتش‌سوزی کاملاً توسعه یافته) و فاز خاموشی (مطابق شکل ۲) [18].

به منظور محاسبه پاسخ دما - زمان آتش‌سوزی از روابط ۲ تا ۸ که در زیر ارائه شده است برای فاز گرم شدن و سرد شدن آتش‌سوزی بر اساس آیین‌نامه Eurocode 1 [16] استفاده می‌شود.

الف) فاز گرم شدن آتش‌سوزی

دمای گاز θ_g می‌تواند به وسیله‌ی معادله زیر به یک زمان پایه پارامتری t^* که تابعی از زمان حقیقی t (برحسب ساعت)، تهویه و اینرسی مرز بخش می‌باشد، مربوط شود:

شکل ۲. فازهای موجود در یک آتش‌سوزی کاملاً توسعه‌یافته [18]

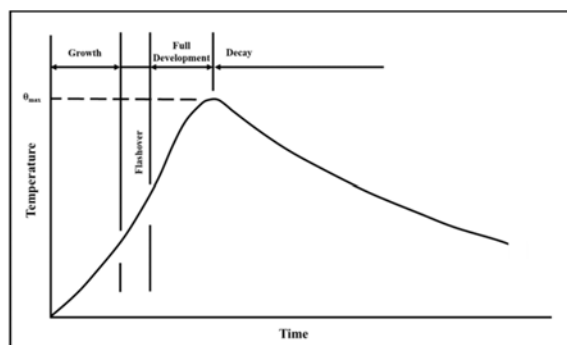


Fig. 2. Phases in a fully developed fire [18]

$$\theta_g = 20 + 1325[1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}] \quad (2)$$

که در آن t^* و Γ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t^* = t\Gamma \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160}\right)^2} \quad (4)$$

در رابطه ۴، O ضریب بازشو و $b = \sqrt{\rho c \lambda}$ اینرسی گرمایی مرز بخش می‌باشد.

۲-۲-۱- مشخصات مصالح در دمای بالا

الف) فاز آتش سوزی

با توجه به افزایش دمای محیط هنگام آتش سوزی و به دنبال آن افزایش دمای سازه فولادی، باید تغییر خواص حرارتی و مکانیکی سازه‌ها هنگام آتش سوزی را متناسب با این افزایش دما مطابق با آیین‌نامه Eurocode 3 [17] لحاظ نمود.

ب) فاز پس از آتش سوزی

رابطه‌ی تنش کرنش فولاد برای تحلیل پس از آتش سوزی به‌وسیله‌ی تائو و همکاران [19] به شکل زیر ارائه شده است (روابط ۹ تا ۱۱):

$$f_{yT} = \begin{cases} f_y & T \leq 500^\circ\text{C} \\ \left[\frac{1 - 2.33 \times 10^{-4}(T - 500)}{-3.88 \times 10^{-7}(T - 500)^2} \right] f_y & T > 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{uT} = \begin{cases} f_u & T \leq 500^\circ\text{C} \\ [1 - 1.95 \times 10^{-4}(T - 500)] f_u & T > 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{sT} = \begin{cases} E_s & T \leq 500^\circ\text{C} \\ [1 - 1.3 \times 10^{-4}(T - 500)] E_s & T > 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (11)$$

پارامترهای استفاده شده در روابط فوق، f_{yT} مقاومت تسلیم فولاد در دمای T ، f_{uT} مقاومت نهایی فولاد در دمای T ، E_{sT} مدول الاستیسیته فولاد در دمای T و T دمای پیشینه آتش سوزی در فاز گرم شدن می‌باشد.

پ) فاز سرد شدن آتش سوزی

مشخصات مکانیکی پس از آتش سوزی فولاد ممکن است حالت خاصی از ویژگی‌های مرحله سرد شدن در نظر گرفته شود، به طوری که عبارات عددی مشابه روابط تنش - کرنش فولاد برای مرحله پس از آتش سوزی ممکن است برای مرحله سرد شدن استفاده شود [20]. ویژگی‌های مکانیکی در مرحله سرد شدن تحت تأثیر دو مقدار دما می‌باشد، دمای فعلی و دمای پیشینه قبلی. ولی ویژگی‌های مکانیکی پس از آتش سوزی فقط تحت تأثیر دمای پیشینه قبلی می‌باشد؛ زیرا دمای فعلی مساوی دمای محیط است. در این تحقیق روش ذیل، بر پایه مطالعات یانگ و همکاران [20] به کار رفته است:

فولاد از دمای پیشینه T_{max} به دمای فعلی (T) قبل از رسیدن به دمای محیط T_0 سرد می‌شود. تنش جاری شدن و کرنش جاری

شدن فولاد در مرحله سرد شدن (دمای T) با درونیابی خطی بین مقادیر دمای پیشینه قبلی (T_{max}) و تنش و کرنش جاری شدن در مرحله پس از آتش سوزی (دمای محیط T_0) به دست می‌آید، معادلات درونیابی به شکل زیر است (روابط ۱۲ تا ۱۴):

$$f_{yc(T, T_{max})} = f_{y(T_{max})} - \frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_0} \times [f_{y(T_{max})} - f_{yp(T_{max})}] \quad (12)$$

$$\varepsilon_{yc(T, T_{max})} = \varepsilon_{y(T_{max})} - \frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_0} \times [\varepsilon_{y(T_{max})} - \varepsilon_{yp(T_{max})}] \quad (13)$$

$$E_{sc(T, T_{max})} = \frac{f_{yc(T, T_{max})}}{\varepsilon_{yc(T, T_{max})}} \quad (14)$$

$f_{yc(T, T_{max})}$ ، $\varepsilon_{yc(T, T_{max})}$ و $E_{sc(T, T_{max})}$ به ترتیب مقاومت تسلیم، کرنش و مدول یانگ فولاد در فاز سرد شدن می‌باشند.

۳- روش تحقیق و شبیه سازی

۳-۱- معرفی مدل و سناریوهای تحقیق

در این تحقیق یک ساختمان فولادی ۲ طبقه برای شبیه سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختمان مورد مطالعه در زمینی به مساحت ۲۲۵ مترمربع به ابعاد ۱۵ متر در ۱۵ متر و در شهر تهران در نظر گرفته شده است. در ساختمان مذکور ارتفاع هر طبقه ۳ متر و عرض هر دهانه ۵ متر می‌باشد. خاک محل احداث، خاک نوع ۲ است. کاربری سیستم باربری جانبی که برای این ساختمان در نظر گرفته شده است از نوع سیستم قاب خمشی فولادی می‌باشد. نمای کلی قاب خمشی فولادی در شکل (۳) ارائه شده است. سازه هدف این تحقیق قاب میانی شماره ۲ می‌باشد.

مقاطع استفاده شده برای تیرهای طبقه اول و دوم به ترتیب از نوع HEB 160 و HEB 600 می‌باشد که برای مقاومت در برابر بارهای انفجاری تقویت شده‌اند. همچنین ستون‌ها از نوع BOX 200×200×10 هستند. بار مرده و زنده اعمال شده بر سازه بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات انفجارها

Blast	Equivalent Weight of TNT, W (Kg)	Distance from The Explosive, R (m)	Scaled Distance, Z (m/Kg ^{1/3})
1	2993	20	1.38
2	2005	20	1.58
3	1200	20	1.87
4	594	20	2.36

Table 2. Characteristics of explosions

شکل ۳. نمای کلی قاب خمشی مورد مطالعه

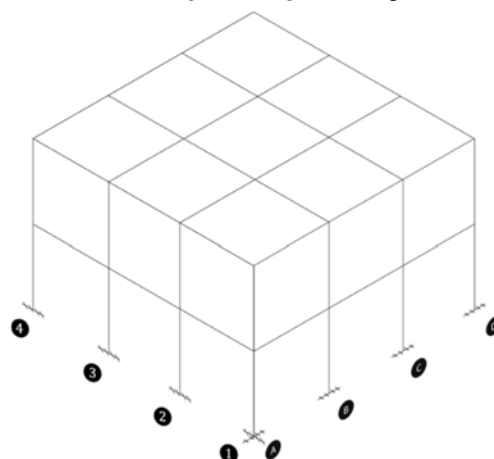


Fig. 3. Overview of the studied bending frame

در این تحقیق برای مطالعه انفجار و آتش سوزی پس از آن بر روی سازه، دو سناریوی مختلف برای موقعیت انفجار و آتش-سوزی در نظر گرفته شده است که با استفاده از دو روش ترکیبی مستقل و روش ترکیبی زنجیره‌ای مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرند.

الف) سناریو اول

مطابق شکل (۴)، ابتدا در فاصله ۲۰ متری از سازه یک انفجار سطحی که در محدوده انفجارهای دور است به عنوان حادثه اولیه رخ می‌دهد سپس در دهانه سمت چپ در طبقه دوم آتش سوزی به عنوان حادثه دومین اتفاق می‌افتد.

ب) سناریو دوم

در سناریوی دوم، انفجاری مشابه موقعیت سناریو ۱ به عنوان حادثه اولیه رخ می‌دهد سپس در دهانه وسط در طبقه اول آتش سوزی به عنوان حادثه دومین اتفاق می‌افتد. باید به این نکته اشاره نمود که انفجار به چهار صورت مختلف با چهار وزن مختلف TNT معادل صورت می‌گیرد که در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین آتش سوزی‌ها بر اساس کاربری که دارند به چهار دسته مختلف مسکونی، مرکز خرید، اداری و تئاتر (سینما) تقسیم‌بندی می‌شوند.

شکل ۴. سناریو اول تحقیق

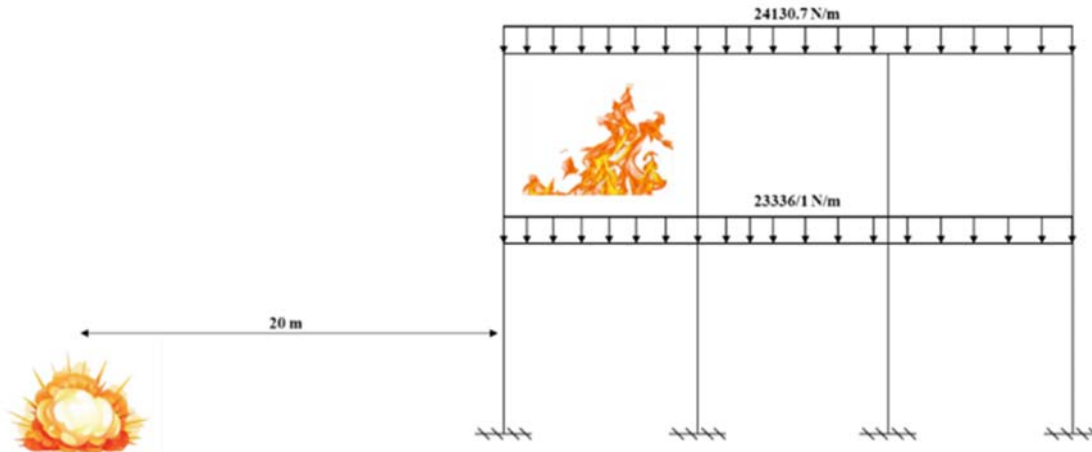


Fig. 4. The first research scenario

جدول ۳. مشخصات مصالح مصرفی در بارگذاری انفجاری

Component	F_y (MPa)	DIF	F_{dy} (MPa)	F_u (MPa)	DIF	F_{du} (MPa)
Beam	353	1.19	420	510	1.05	535.5
Column	353	1.12	395.4	510	1.05	535.5

Table 3. Specifications of materials used in explosive loading

۳-۲- مشخصات مصالح مصرفی

در قاب فولادی مورد استفاده در این تحقیق از فولاد ST52 استفاده شده است همان‌طور که پیش‌تر شرح داده شد وقتی سازه تحت بارگذاری دینامیکی (مثل انفجار) قرار می‌گیرد، مقاومت مصالح افزایش یافته و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای مقاومت سازه‌ای را بالا می‌برد. ضرایب افزایش دینامیکی و مقاومت دینامیکی افزایش یافته فولاد برای شبیه‌سازی‌های مربوط به انفجار، مطابق دستورالعمل UFC 3-340-02 [15] در جدول (۳) آورده شده است.

بیان این مسئله ضروری است که میزان خواص مکانیکی فولاد پس از انفجار، به علت تغییر شکل‌ها و خرابی‌های محتمل کاهش پیدا می‌کند؛ اما از آنجایی که رابطه و تحقیق جامعی در خصوص میزان دقیق این کاهش وجود ندارد در این تحقیق فرض می‌شود خواص مکانیکی فولاد که قرار است مورد شبیه‌سازی تحت بار آتش‌سوزی پس از انفجار خارجی قرار گیرد، در ابتدای آتش‌سوزی، به‌صورت فولاد با مشخصات سالم و بدون در نظر گرفتن افت مقاومت ناشی از انفجار می‌باشد و تنها میزان تنش، کرنش و تغییر شکل از شبیه‌سازی انفجار به شبیه‌سازی آتش‌سوزی پس از آن انتقال می‌یابد. در این مقاله از

مدل رفتاری غیرخطی دوخطی یا همان Bilinear استفاده شده است و در مورد مدل خرابی نیز باید بیان نمود که از مدل خرابی جانسون - کوک و ضرایب آن برای سازه‌ی فولادی استفاده شده است.

۳-۳- چگونگی بارگذاری

الف) بارگذاری انفجاری

عوامل مؤثر بر بارگذاری انفجاری وارد بر سازه شامل بزرگی انفجار، موقعیت انفجار نسبت به سازه مورد نظر (ارتفاع و فاصله)، شکل هندسی و اندازه سازه، راستا و زاویه سازه نسبت به جبهه موج انفجار و سطح زمین و وضعیت سازه نسبت به سطح زمین (روزمینی، زیرزمینی و مدفون) است. بارهای انفجاری رو به انفجار و نیز بارهای وارد بر وجه پشتی سازه به سه صورت، به کف طبقات، کف طبقه بام و عمود بر ستون وارد می‌شوند. همچنین بر تیر بام با توجه به سطح بارگیر آن بارهای انفجاری به صورت عمود بر تیر وارد می‌شوند. در شکل (۵) چگونگی اعمال بارهای گسترده حاصل از بارهای انفجاری به قاب مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۴. مقادیر بیشینه بارهای وارد شده بر قاب برای ۴ حالت انفجار

Z (m/ Kg ^{1/3})	F ₁ (MN /m ²)	F ₂ (MN /m ²)	F ₃ (MN /m ²)	F ₄ (MN /m ²)	F ₅ (MN /m ²)	F ₆ (MN /m ²)	F ₇ (MN /m ²)
1.38	14.8	7.39	2.71	1.87	2.86	1.43	0.71
1.58	9.87	4.94	1.81	1.45	2.19	1.09	0.54
1.87	5.89	2.95	1.08	1.07	1.55	0.77	0.38
2.36	2.97	1.49	0.55	0.66	0.97	0.48	0.24

Table 4. The maximum loads applied to the frame for 4 explosion modes

شکل ۶. نمودار فشار - زمان بار انفجاری وجه جلویی قاب

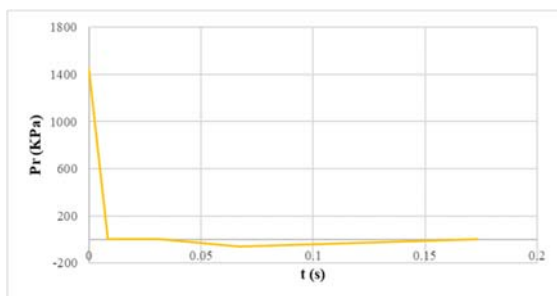


Fig. 6. Pressure-time explosive load diagram of the front face of the frame

شکل ۷. نمودار فشار - زمان بار انفجاری وارد به سقف

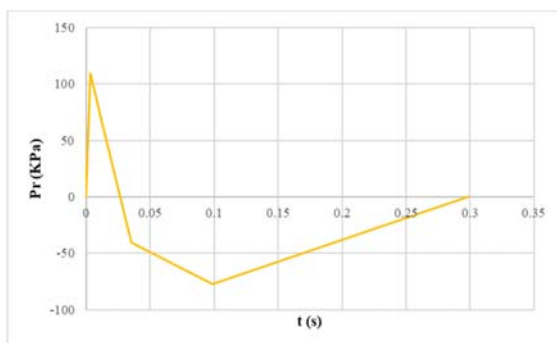


Fig. 7. Pressure-time diagram of the explosive load entering the roof

شکل ۸. نمودار فشار - زمان بار انفجاری وارد بر وجه پشتی

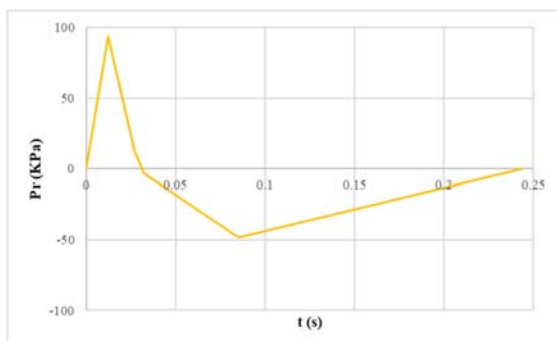


Fig. 8. Pressure-time diagram of the explosive load on the back face

F₁: نیروی گسترده وارد به کف طبقات در وجه رو به انفجار است که با ضرب فشار انفجار در ارتفاع بارگیر طبقات قاب به دست می‌آید.

F₂: نیروی گسترده وارد به کف طبقه بام در وجه رو به انفجار است که با ضرب فشار انفجار در ارتفاع بارگیر طبقه بام قاب به دست می‌آید.

F₃: نیروی گسترده وارد بر وجه رو به انفجار روی ستون است که با ضرب فشار انفجار در بعد ستون به دست می‌آید.

F₄: نیروی گسترده وارد بر سقف قاب است که با ضرب فشار انفجار در عرض بارگیر تیرهای سقف به دست می‌آید.

F₅: نیروی گسترده وارد به کف طبقات در وجه پشت به انفجار است که با ضرب فشار انفجار در ارتفاع بارگیر طبقات قاب به دست می‌آید.

F₆: نیروی گسترده وارد به کف طبقه بام در وجه پشت به انفجار است که با ضرب فشار انفجار در ارتفاع بارگیر طبقه بام قاب به دست می‌آید.

F₇: نیروی گسترده وارد بر وجه پشت به انفجار روی ستون است که با ضرب فشار انفجار در بعد ستون به دست می‌آید.

شکل ۵. چگونگی اعمال بارهای حاصل از انفجار به قاب

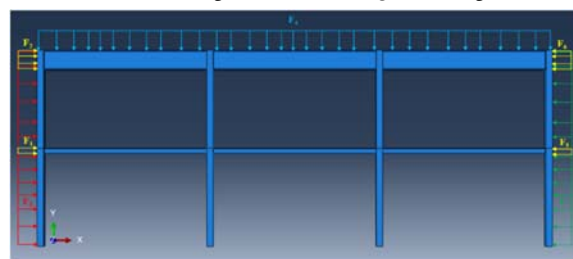


Fig. 5. Way to apply loads resulting from the explosion to the frame

مقادیر بیشینه بارهای وارد شده بر قاب برای چهار حالت انفجار در جدول (۴) آورده شده‌اند. همچنین در شکل‌های (۶ تا ۸) نمودارهای فشار - زمان مربوط به بارگذاری انفجاری برای انفجار اول با توجه به روابط و نمودارهای دستورالعمل UFC 3-340-02 در وجه جلویی قاب، سقف قاب و وجه پشتی قاب نشان داده شده است.

ب) بارگذاری ناشی از آتش سوزی

به منظور طراحی قاب فولادی در معرض آتش سوزی ابتدا باید نمودار دما - زمان آتش سوزی را محاسبه نمود تا از الگوی رفتاری و دمایی حریق در زمان‌های مختلف اطلاع پیدا کرد. در این تحقیق از آتش طبیعی یا پارامتریک استفاده می‌شود که بیانگر رفتاری مشابه با رفتار آتش سوزی‌های واقعی می‌باشد. در اینجا به بررسی مراحل شش‌گانه محاسبه نمودار دما - زمان برای کاربری مسکونی آتش سوزی طبق آیین‌نامه Eurocode 1 پرداخته می‌شود.

گام اول - محاسبه مساحت کل بازشوهای عمودی (A_v)، مساحت کل بخش (A_t) و مساحت کف بخش (A_f):

در هر بخش ۲ پنجره وجود دارد و ابعاد هر پنجره $1/5 \times 1/5$ متر می‌باشد.

$$\begin{cases} A_v = 2 \times 1.5 \times 1.5 = 4.5 \text{ m}^2 \\ A_f = 5 \times 5 = 25 \text{ m}^2 \\ A_t = 2(3 \times 5) + 2(5 \times 5) + 2(5 \times 3) = 110 \text{ m}^2 \end{cases}$$
گام دوم - محاسبه ضریب بازشو (O)، اینرسی گرمایی مرز بخش (b) و پارامتر Γ :

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{4.5 \times \sqrt{1.5}}{110} = 0.0501 \text{ m}^{\frac{1}{2}}$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}$$

$$\rightarrow \begin{cases} b_1 = \sqrt{2400 \times 900 \times 1.6} = 1859 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{\frac{1}{2}} \text{ K} \\ b_2 = \sqrt{7850 \times 439.8 \times 53.3} = 13565.2 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{\frac{1}{2}} \text{ K} \end{cases}$$

$$b_1 < b_2 \rightarrow b = b_1 = 1859 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{\frac{1}{2}} \text{ K}$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160}\right)^2} = \frac{\left(\frac{0.0501}{1859}\right)^2}{\left(\frac{0.04}{1160}\right)^2} = 0.589$$

که h_{eq} ارتفاع متوسط بازشوها می‌باشد.

گام سوم - محاسبه مقدار چگالی بار آتش ($q_{f,d}$) و چگالی بار آتش سوزی طراحی ($q_{t,d}$):

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times m \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_n$$

$$\rightarrow q_{f,d} = 780 \times 0.8 \times 1.1 \times 1 \times 4.56 = 3130 \text{ MJ/m}^2$$

$$q_{t,d} = q_{f,d} \times \frac{A_f}{A_t}$$

$$\rightarrow q_{t,d} = \frac{3130 \times 25}{110} = 711.4 \text{ MJ/m}^2$$

مسکونی

که در آن $q_{f,k}$ ، m ، δ_{q1} ، δ_{q2} و δ_n به ترتیب چگالی بار آتش بر واحد سطح، ضریب احتراق، ضریب اندازه بخش، ضریب کاربری و ضریب ناشی از اقدامات آتش‌نشانی می‌باشد.

گام چهارم - تعیین بیشینه زمان حقیقی (t_{max}) و بیشینه زمان پارامتری (t_{max}^*):

$$t_{max} = \max \left[\left(\frac{0.2 \times 10^{-3} \times q_{t,d}}{O} \right), t_{lim} \right]$$

$$t_{max} = \max[2.84, 0.33] = 2.84 \text{ h or } 170.4 \text{ min}$$

مسکونی $\rightarrow t_{max}^* = t_{max} \times \Gamma$

$$t_{max}^* = 170.4 \times 0.589 = 100.4 \text{ min or } 1.673 \text{ h}$$

مسکونی

گام پنجم - در این گام دما برحسب سانتی‌گراد تا بیشینه زمان پارامتری بر اساس رابطه شماره ۲ برای فاز رشد محاسبه می‌شود.

گام ششم - تعیین رابطه فاز خاموشی بر اساس بیشینه مدت زمان آتش سوزی پارامتری در فاز رشد:

با توجه به این‌که بیشینه مدت زمان آتش سوزی پارامتری برای کاربری مسکونی بین ۰/۵ تا ۲ ساعت می‌باشد برای فاز خاموشی از رابطه ۶ استفاده می‌شود.

مقادیر دما - زمان برای چهار کاربری مسکونی، مرکز خرید، اداری و تئاتر (سینما) مطابق روابط بالا محاسبه شده و نمودارهای دما - زمان برای دو کاربری مسکونی و تئاتر (سینما) برای نمونه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌ها مشهود می‌باشد کاربری‌ها در میزان مدت زمانی که آتش سوزی طول می‌کشد مؤثر هستند (کاربری مسکونی بیشترین مدت و کاربری تئاتر (سینما) کمترین مدت به طول می‌انجامد) و هر چقدر که این مدت زمان افزایش یابد به تبع آن دما سازه نیز افزایش یافته و موجب می‌شود که خرابی و صدمه وارد شده به قاب بیشتر شود.

می‌گیرد یعنی تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌های ناشی از انفجار به آتش‌سوزی پس از آن منتقل می‌شود و از این طریق آثار انفجار روی سازه به بخش تحلیل آتش‌سوزی منتقل می‌شود. برای انتقال آثار انفجار بر سازه به مرحله بعدی تحلیل، باید کلیه آثار از قبیل تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌های ناشی از انفجار و همچنین مصالح تغییر یافته پس از انفجار منتقل شود که در این تحقیق همه موارد، به غیر از مصالح تغییر یافته (به علت فقدان تحقیقات معتبر در این حوزه)، لحاظ شده است.

شبیه‌سازی‌ها در این تحقیق با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام می‌شود. قطعات استفاده شده در تیرها و ستون‌ها از نوع قطعه‌های توپر سه بعدی^۱ و شکل‌پذیر می‌باشند. نوع تحلیل‌های صورت گرفته در مرحله انفجار و آتش‌سوزی به ترتیب تحلیل دینامیکی صریح^۲ و تحلیل توأمان جابه‌جایی-دما^۳ می‌باشد. نوع المان‌ها برای مش‌بندی در انفجار و آتش‌سوزی به ترتیب C3D8R و C3D8T است. برای انتقال نتایج حادثه انفجار بر روی فاز گرمایش آتش‌سوزی پس از آن (در روش ترکیبی زنجیره‌ای) و همچنین انتقال نتایج حاصل از فاز گرم شدن آتش‌سوزی بر روی فاز سرمایش آتش‌سوزی و تعریف مشخصات مکانیکی فولاد به صورت جداگانه برای هر فاز از قسمت Predefined Field در منوی بارگذاری نرم‌افزار آباکوس بهره برده می‌شود. به این صورت که شبیه‌سازی در فاز گرمایش آتش‌سوزی با خواص مکانیکی مختص به آن انجام شده سپس نتایج این قسمت را در یک شبیه‌سازی دیگر به عنوان شرایط اولیه (با بهره‌گیری از قسمت Predefined Field و تعریف Initial State) برای فاز سرمایش در نظر گرفته و مشخصات مکانیکی مربوط به فاز سرمایش آتش‌سوزی را تعریف نموده و ادامه شبیه‌سازی تا پایان آن صورت می‌پذیرد. همچنین شبیه‌سازی انفجار تا زمان پایا شدن پاسخ سازه در اثر انفجار

شکل ۹. نمودار دما - زمان کاربری مسکونی

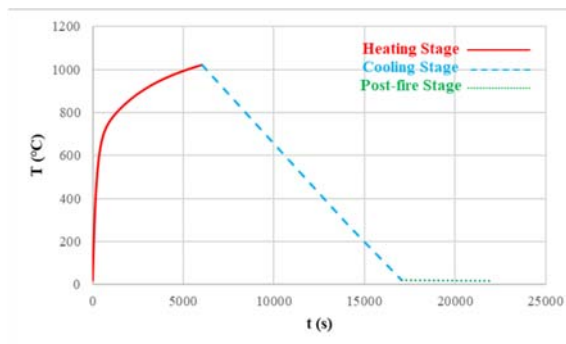


Fig. 9. Temperature-Time chart of the dwelling occupancy

شکل ۱۰. نمودار دما - زمان کاربری تئاتر (سینما)

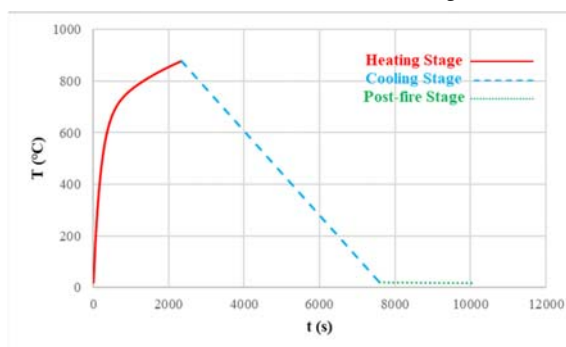


Fig. 10. Temperature-Time chart of the theatre (cinema) occupancy

۳-۴- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در این تحقیق با دو رویکرد مختلف انجام می‌شود: روش ترکیبی مستقل و روش ترکیبی زنجیره‌ای. در روش ترکیبی مستقل ابتدا هر حادثه به صورت مستقل شبیه‌سازی شده و سپس تغییر شکل‌های مربوط به حادثه انفجار و حادثه آتش‌سوزی که به صورت جداگانه شبیه‌سازی شده‌اند، با یکدیگر جمع می‌شوند. این روش دارای خطا می‌باشد زیرا که انجام این کار، مشابه اصل جمع آثار قوا، زمانی مجاز است که رفتار مصالح در محدوده‌ی خطی باشد اما انفجار و آتش‌سوزی در بسیاری از موارد رفتار مصالح را وارد محدوده غیرخطی می‌نماید؛ بنابراین در این روش فرض بر این است که رفتار مصالح خطی است؛ در صورتی که در واقعیت خطی نیست و خطا از اینجا تولید می‌شود.

در روش ترکیبی زنجیره‌ای، برعکس روش ترکیبی مستقل، شبیه‌سازی‌های انفجار و آتش‌سوزی پشت سر هم صورت

1 Solid

2 Dynamic, Explicite

3 Coupled Temperature-Displacement

صفحات و هدف مقاله که تأثیر انواع انفجارها و آتش‌سوزی‌ها روی یکدیگر می‌باشد این رویه در پیش گرفته شده است.

شکل ۱۴. سناریو اول - تغییر شکل قائم در میانه تیر طبقه اول - روش

ترکیبی مستقل - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

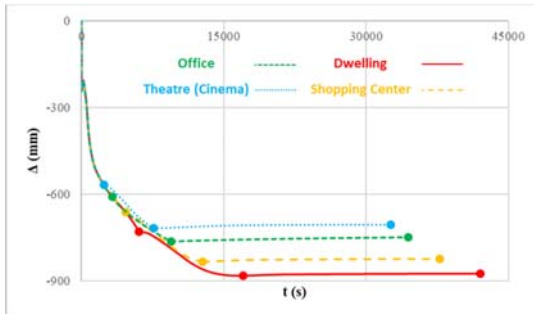


Fig. 14. First scenario - vertical deformation in the middle of the first floor beam - independent composite method - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

شکل ۱۵. سناریو اول - تغییر شکل قائم در میانه تیر طبقه اول - روش

ترکیبی زنجیره‌ای - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

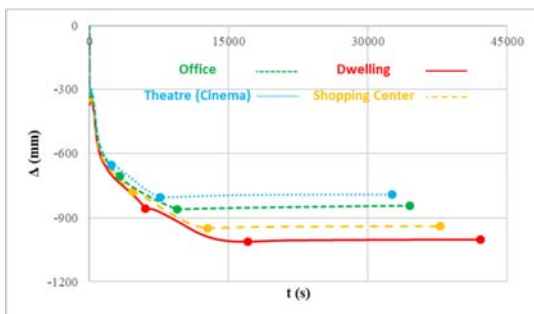


Fig. 15. First scenario - vertical deformation in the middle of the first floor beam - chain combination method - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

شکل ۱۶. سناریو دوم - تغییر شکل قائم در میانه تیر طبقه اول - روش

ترکیبی مستقل - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

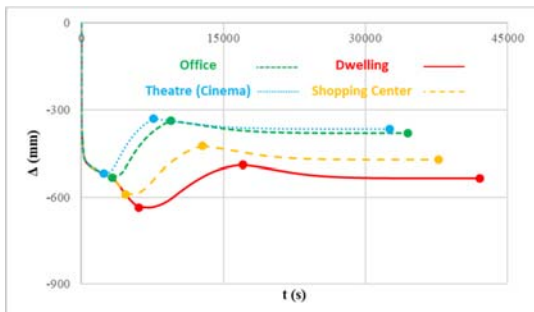


Fig. 16. Second scenario - vertical deformation in the middle of the first floor beam - independent composite method - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

شکل ۱۲. اتصالات شبیه‌سازی شده برای درستی‌آزمایی آتش‌سوزی

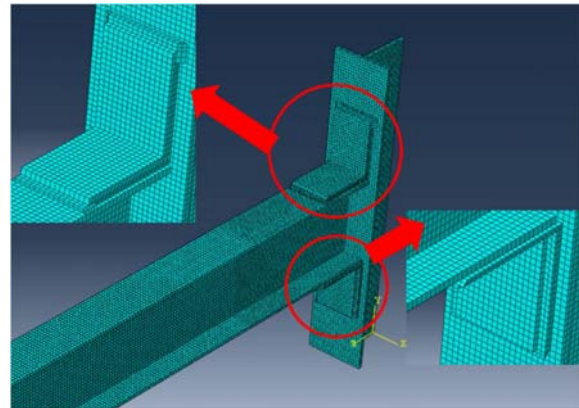


Fig. 12. Simulated connections for fire verification

شکل ۱۳. مقایسه بین نمودار دوران-دمای اتصال فولادی مدل

آزمایشگاهی ساعدی و یحیایی [21] با شبیه‌سازی صورت گرفته در این تحقیق

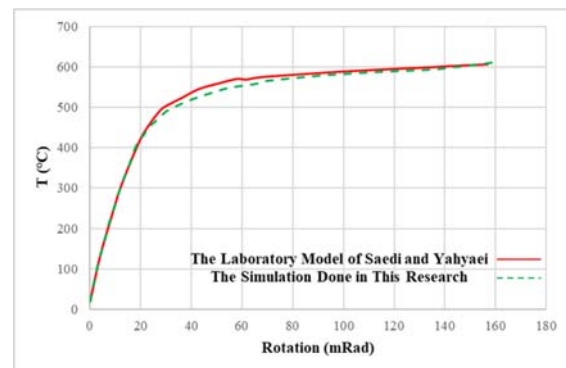


Fig. 13. Comparison between the rotation-temperature diagram of the steel connection of the laboratory model of Saedi and Yahyaei [21] with the simulation done in this research

۴- نتایج و بحث

در این قسمت از مقاله به بررسی تغییر شکل قائم در میانه تیر طبقه اول در سناریو اول و دوم پرداخته می‌شود. علت این موضوع که تغییر شکل میانه تیر ملاک ارزیابی می‌باشد این است که سعی شده تا ارزیابی رفتاری و عملکردی سازه مد نظر قرار گیرد که عملکرد سازه در آیین‌نامه‌های طراحی - عملکردی بر اساس دوران تیرها و ستون‌ها صورت می‌پذیرد و دوران نیز تابعی از تغییر شکل میانه المان‌ها می‌باشد. البته این توضیحات بیانگر کم اهمیت بودن سایر معیارهای مقایسه پاسخ سازه‌ها با یکدیگر نیست و به خاطر محدودیت در تعداد

که سبب می‌شود تغییر شکل کاربری بیشینه شود چگالی بار آتش طراحی یا به تعبیر بهتر میزان مواد سوختنی موجود در هر کاربری می‌باشد و بر اساس محاسبات صورت گرفته بر مبنای آیین‌نامه Eurocode 1 بیشینه مقدار چگالی بار آتش طراحی به ترتیب مربوط به کاربری مسکونی، مرکز خرید، اداری و تئاتر (سینما) است.

در جدول (۷) به بررسی و مقایسه تغییر شکل‌های قائم و افقی در میانه تیر طبقه اول برای هر دو سناریو پرداخته شده است. این تغییر شکل‌ها فقط ناشی از انفجار و برای ۴ حالت مختلف فاصله مقیاس شده بوده است. مبتنی بر این نتایج با افزایش مقدار فاصله‌ی مقیاس شده میزان تغییر شکل‌ها کاهش می‌یابد که قابل پیش‌بینی بود. همچنین تغییر شکل‌های سناریو دوم نسبت به سناریو اول در وسط دهانه تیر طبقه اول در حالت قائم بیشتر است زیرا تأثیر بار انفجاری وارد بر وجه جلویی و پشتی قاب در سناریو دوم بیشتر است و برای تغییر شکل افقی عکس این حالت روی می‌دهد.

جدول ۶. مقادیر تغییر شکل ناشی از آتش‌سوزی

Displacement (mm)					
Analysis Method		Z=1.38 m/kg ^{1/3}			
		Dwellin g	Shoppin g Center	Offic e	Theatre (Cinema)
First Scenari o	Independent Composite	-648.5	-599.6	- 522.9	-480.5
	Chain Combinatio n	-777.4	-715.9	- 618.6	-567.1
Second Scenari o	Independent Composite	-165.6	-104.4	-11.2	10.4
	Chain Combinatio n	-242	-169.2	-57.6	-40.2

Table 6. Deformation values caused by fire

جدول ۷. تغییر شکل نهایی قاب ناشی از انفجار برای تیرهای طبقه اول در سناریوها

Z ($\text{m/kg}^{1/3}$)	Deformation of First Scenario		Deformation of Second Scenario	
	Vertical (mm)	Horizontal (mm)	Vertical (mm)	Horizontal (mm)
1.38	-224.6	163.9	-368.6	85.8
1.58	-135.3	68.5	-236.8	26.8
1.87	-125.2	23.2	-150.1	9.1
2.36	-108.8	5	-115.9	-0.7

Table 7. Final frame deformation due to explosion for first floor beams in scenarios

شکل ۱۷. سناریو دوم - تغییر شکل قائم در میانه تیر طبقه اول - روش

ترکیبی زنجیره‌ای - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

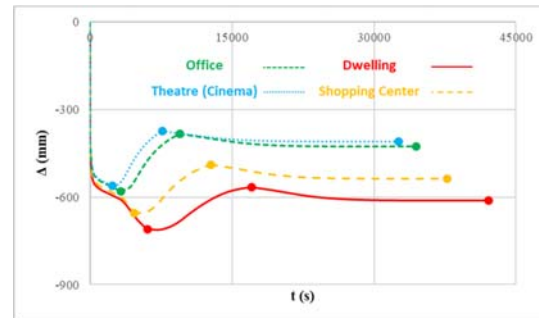


Fig. 17. Second scenario - vertical deformation in the middle of the first floor beam - chain combination method - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش ترکیبی مستقل و روش ترکیبی زنجیره‌ای در شکل‌های (۱۴ تا ۱۷) آورده شده است. دایره‌های موجود در شکل‌های (۱۴ تا ۱۷) به ترتیب مشخص‌کننده انتهای فازهای گرمایش، سرمایش و پس از آتش‌سوزی می‌باشند و تغییر شکل ناشی از انفجار در ۴/۲ ثانیه از ابتدای نمودارها نشان داده شده است.

با مقایسه اولیه نمودارها مشخص است که چگونگی تغییر شکل تیر طبقه اول در دو سناریو در فاز سرد شدن و فاز پس از آتش‌سوزی متفاوت است که این موضوع به تأثیر متقابل اعضایی که در هر سناریو تغییر شکل می‌دهند منصرف می‌شود. نکته دیگری که حائز اهمیت می‌باشد این است که روند تغییر شکل‌ها در دو روش مستقل و زنجیره‌ای در هر دو سناریو مشابه یکدیگر می‌باشد و تفاوت در میزان خیزهای ایجاد شده در روش‌ها است و دلیل این تفاوت نیز در نظر گرفتن کرنش، تنش و تغییر شکل ناشی از انفجار روی شبیه‌سازی حریق می‌باشد که در روش ترکیبی زنجیره‌ای در نظر گرفته شده است ولی در روش ترکیبی مستقل اعمال نشده است.

بیشترین تغییر شکل‌ها در آتش‌سوزی به ترتیب مربوط به کاربری مسکونی، مرکز خرید، اداری و تئاتر (سینما) می‌باشد (جدول ۶). دلیل این مسئله را می‌توان این‌طور بیان نمود که از آنجایی که سازه مورد شبیه‌سازی برای همه کاربری‌ها یک سازه واحد است (یعنی ضریب هوادهی و اینرسی گرمایی بخش و به تبع این دو پارامتر Γ برای کاربری‌ها یکسان است) پس عاملی

در این دو حالت تغییر شکل نهایی روش ترکیبی مستقل را ایجاد می‌نماید و نشانگر میزان تأثیر انفجار و حریق بر روی روش ترکیبی مستقل می‌باشد. به‌طور کلی میزان تأثیر انفجار نسبت به آتش‌سوزی در سناریو دوم بیشتر از سناریو اول می‌باشد و بالعکس. همچنین تغییر شکل ناشی از انفجار در دو روش با یکدیگر یکسان است و برابر با میزان مشخص شده در ستون‌های مربوط به حالت فقط انفجار شکل‌های (۱۸ و ۱۹) می‌باشد.

در شکل‌های (۱۸ تا ۲۰) به مقایسه درصد و مقدار اختلاف بین دو روش ترکیبی مستقل و روش ترکیبی زنجیره‌ای پرداخته شده است که درصد میزان این اختلاف از ۱۱/۷ تا ۱۴/۸ درصد متغیر می‌باشد (البته همان‌طور که در متن هم بیان شد میزان تغییر مصالح و افت مقاومتی بعد از انفجار (به علت فقدان تحقیقات) در تحلیل آتش‌سوزی در روش ترکیبی زنجیره‌ای لحاظ نشده است که اگر این امکان بود قطعاً این اختلاف خیلی بیشتر از ۱۵ درصد به دست می‌آمد).

شکل ۲۰. درصد اختلاف روش ترکیبی مستقل نسبت به روش ترکیبی

زنجیره‌ای - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

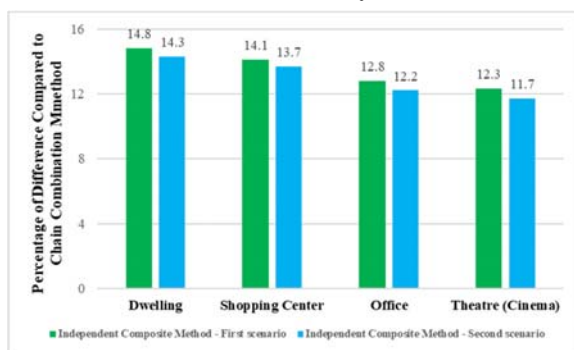


Fig. 20. Difference percentage of independent composite method compared to combined chain combination method

شکل ۱۸. سناریو اول - مقایسه بین تغییر شکل‌های ایجاد شده در میانه تیر

طبقه اول برای دو روش شبیه‌سازی - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

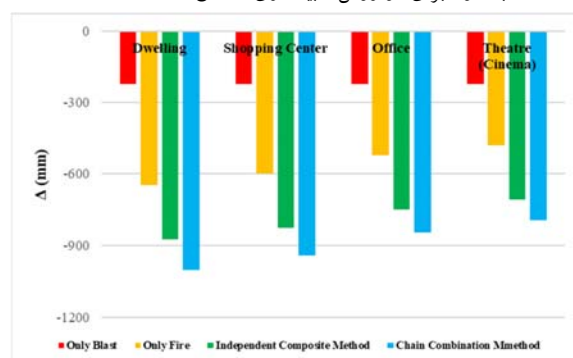


Fig. 18. First scenario - comparison between the deformations created in the middle of the first floor beam for two simulation methods - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

شکل ۱۹. سناریو دوم - مقایسه بین تغییر شکل‌های ایجاد شده در میانه تیر

طبقه اول برای دو روش شبیه‌سازی - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

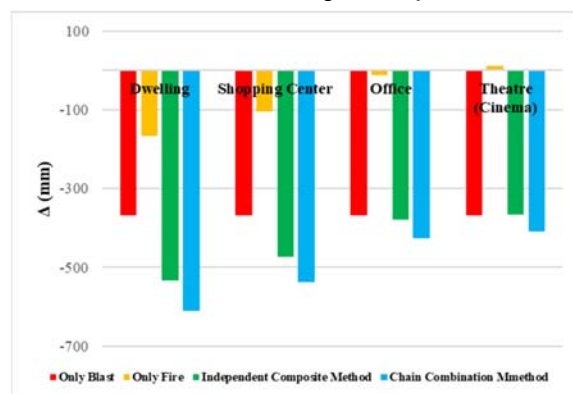


Fig. 19. Second scenario - comparison between the deformations created in the middle of the first floor beam for two simulation methods - $Z=1.38 \text{ m/kg}^{1/3}$

۵- نتیجه‌گیری
در این تحقیق ابتدا شرایط و ویژگی‌هایی که مشخصات سازه‌ای باید در برابر بارهای انفجار و آتش‌سوزی داشته باشند بررسی شد. همچنین به بررسی رفتار و چگونگی گسترش آتش در درون سازه‌ها پرداخته شد. سپس با انجام شبیه‌سازی‌هایی به این موضوع اشاره شد که امکان این‌که حوادث چندگانه‌ی زنجیره‌ای مثل انفجار و آتش‌سوزی پس از آن را به‌صورت جداگانه و دقیق شبیه‌سازی کرد وجود ندارد زیرا که پس از هر حادثه‌ای سازه تغییر شکل یافته و در قسمت‌های مختلف آن تنش‌ها و کرنش‌های متفاوتی مشاهده می‌شود و سازه ما بعد از یک حادثه به سازه جدیدی تبدیل می‌شود که به‌طور کلی مشخصات آن با سازه اولیه متفاوت است و باید هنگام شبیه‌سازی این موضوع را در نظر گرفت.

برخی از نتایج اصلی این تحقیق به شرح ذیل می‌باشند:

همچنین مقدار تغییر شکل حالت‌های مختلف برای انفجار و آتش‌سوزی جداگانه بیان شده است که مجموع خیز ایجاد شده

۴- نتیجه اصلی تحقیق که بعد از مقایسه تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌ها با یکدیگر مشخص شد در این نکته نهفته است که باید در شبیه‌سازی‌ها و طراحی‌های صورت گرفته برای حوادث چندگانه زنجیره‌ای (مثل انفجار و آتش‌سوزی پس از آن)، تغییر مشخصات سازه را پس از یک حادثه برای حادثه بعدی مد نظر قرار داد تا نتایج از دقت کافی برخوردار باشند. همچنین علاوه بر غیردقیق بودن روش ترکیبی مستقل، نتایج تحلیل سازه‌ای در این روش، کمتر از واقعیت و غیر محافظه‌کارانه می‌باشد و منجر به طراحی غیر ایمن خواهد شد؛ بنابراین در حوادث زنجیره‌ای، در نظر گرفتن تحلیل ترکیبی زنجیره‌ای نه تنها مهم بلکه ضروری می‌باشد.

۶- منابع و مراجع

- 1- RP, API., 2006. Recommended Practice for the Design of Offshore Facilities Against Fire and Blast Loading.
- 2- Tarinejad, R., Ghanbari, H., Kalate, F., 2018. Effects of blast loading on the response of concrete arch dam (Case study: Karun 4). *Modares Civil Engineering journal*, 18(1), 43-54.
- 3- Bakhtiyari, S., Jamali Ashtiani, M. 2019. Heat release rate of materials and fire modelling of Plasco building's incident.
- 4- Izzuddin, B. A., Song, L., Elnashai, A. S. and Dowling, P. J. 2000. An integrated adaptive environment for fire and explosion analysis of steel frames—Part II: verification and application. *Journal of Constructional Steel Research* 53.1: 87-111.
- 5- Liew, JY Richard and Hong Chen. 2004. Explosion and fire analysis of steel frames using fiber element approach. *Journal of structural engineering* 130.7: 991-1000.
- 6- Richard Liew, J. Y. and Hong Chen. 2004. Direct analysis for performance-based design of steel and composite structures. *Progress in structural engineering and materials* 6.4: 213-228.
- 7- Ding, Y., Wang, M., Li, Z. X., and Hao, H. 2013. Damage evaluation of the steel tubular column subjected to explosion and post-explosion fire condition. *Engineering Structures* 55: 44-55.
- 8- Arablouei, Amir, and Venkatesh Kodur. 2016. Effect of fire insulation delamination on structural performance of steel structures during fire following an earthquake or an explosion. *Fire Safety Journal* 84: 40-49.
- 9- Forni, Daniele, Bernardino Chiaia, and Ezio Cadoni. 2017. Blast effects on steel columns under fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research* 136: 1-10.

۱- دو روش ترکیبی به‌منظور شبیه‌سازی حوادث انفجار و آتش‌سوزی پس از آن ارائه شد؛ یکی روش ترکیبی مستقل و دیگری روش ترکیبی زنجیره‌ای. روش اول دقت کمتری نسبت به روش دوم داشت چرا که جمع کردن خیزها در جایی بدون خطاست که روابط میان مصالح خطی باشند نه غیرخطی. برای رفع این مشکل روش ترکیبی زنجیره‌ای ارائه شد که تغییر مقاومت مصالح از یک حادثه به حادثه دیگر را مد نظر قرار می‌دهد. همچنین درصد اختلاف دو روش برای حالت‌های مختلف تا ۱۵ درصد نیز متغیر می‌باشد (البته همان‌طور که در متن هم بیان شد میزان تغییر مصالح و افت مقاومتی بعد از انفجار (به علت فقدان تحقیقات) در تحلیل آتش‌سوزی در روش ترکیبی زنجیره‌ای لحاظ نشده است که اگر این امکان بود قطعاً این اختلاف خیلی بیشتر از ۱۵ درصد به دست می‌آمد).

۲- پس از انجام شبیه‌سازی‌هایی در خصوص آتش‌سوزی در قاب فولادی خمشی مشخص شد که مکان وقوع آتش‌سوزی نقش مهمی در میزان آسیب وارده شده به سازه دارد. چنانچه در سناریوی اول میزان خرابی و تغییر شکل سازه به‌مراتب بیشتر از سناریوی دوم بود بنابراین باید این مسئله را گوشزد نمود که در سازه‌ها اگر قرار به انبار کردن مواد اشتعال‌زا است برای کاهش خطر آتش‌سوزی، این مواد در قسمت‌هایی از سازه انبار شوند که سطح تماس کمتری با سازه دارند (مانند سناریوی دوم) تا در صورت حریق آسیب وارده به کمترین میزان برسد.

۳- از نتایج شبیه‌سازی آتش‌سوزی می‌توان دریافت هنگامی که تیرها و ستون‌هایی که در سناریوها تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند، شروع به خنک شدن می‌کنند دمای آن‌ها تا دمای محیط کاهش می‌یابد اما هم‌زمان دمای اجزای مجاور آن‌ها و قسمت‌های دورتر همان تیرها و ستون‌ها در اثر هدایت گرمایی فولاد شروع به گرم شدن می‌نماید و این بخش‌ها مدت زمان بیشتری را برای رسیدن به دمای محیط نیاز دارند. این موضوع یکی از دلایل اصلی است که باید هر سه مرحله گرمایش، سرمایش و مرحله پس از آتش‌سوزی در بررسی آتش‌سوزی‌ها مورد تحلیل قرار گیرد تا تغییر شکل‌های ایجاد شده به‌صورت دقیق استخراج شوند.

- 16- EN 1991-1-2: Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1.2: Actions on structures exposed to fire. Comite Europeen de Normalisation/British Standards Institution.
- 17- EN 1993-1-2: 2005. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Comite Europeen de Normalisation/British Standards Institution.
- 18- Yahyaei, M., Saedi-Daryan, A., 2012. Structural fire safety engineering. Darian Engineers Publications. (In Persian).
- 19- Tao, Zhong, Xing-Qiang Wang, and Brian Uy. 2013. Stress-strain curves of structural steel and reinforcing steel after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 25.9: 1306-1316.
- 20- Yang, Hua, Lin-Hai Han, and Yong-Chang Wang. 2008. Effects of heating and loading histories on post-fire cooling behaviour of concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research* 64.5: 556-570.
- 21- Yahyaei, Mahmood and Amir Saedi Daryan. 2011. The study of welded semi-rigid connections in fire. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 22.10: 783-801.
- 10- Guo, Z., Chen, W., Zhang, Y. and Zou, H. 2017. Post fire blast-resistances of RPC-FST columns using improved Grigorian model. *International journal of impact engineering* 107: 80-95.
- 11- Chen, W., Pan, J., Guo, Z. and Zou, H. 2019. Damage evaluations of fire-damaged RPC-FST columns under blast loading. *Thin-Walled Structures* 134: 319-332.
- 12- Gerasimidis, S., Khorasani, N. E., Garlock, M., Pantidis, P., & Glassman, J. 2017. Resilience of tall steel moment resisting frame buildings with multi-hazard post-event fire. *Journal of Constructional Steel Research* 139: 202-219.
- 13- Pordel Maragheh, Babak, Abdolrahim Jalali, and Seyyd Mohammad Mirhoseini Hezaveh. 2020. Effect of Initial Local Failure Type on Steel Braced Frame Buildings against Progressive Collapse. *International Journal of Engineering* 33.1: 34-46.
- 14- Roy, Tathagata, and Vasant Matsagar. 2021. Mechanics of damage in reinforced concrete member under post-blast fire scenario. *Structures*. Vol. 31. Elsevier.
- 15- U.S. Department of Defense. 2014. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. UFC 3-340-02.

Evaluating the response of the steel bending frame against fire after the explosion

H. Salimi Mozafarabadi¹, S. A. Hosseini^{2*}

1- Master's Degree, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology

2- Assistant Professor, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology

Received: 2023/01/30

Accepted: 2023/10/19

*hoseini@mut.ac.ir

Abstract

Fire and explosion are often synergistic. A fire may occur after an explosion or a fire may occur first and then an explosion occurs. The consequences of a combined fire and explosion scenario about each component must be considered in the design or evaluation of the structure. Fire and explosion analysis should be done together and the effects of one on the other should be carefully considered and calculated. In most research and design guidelines, fire and explosion phenomena are investigated independently and their interaction is less considered. In this research, this issue is addressed and the fire after the explosion and the interaction and synergy of these two phenomena are studied together. The studied structure is a two-story steel structure with different occupancies (dwelling, office, etc.), which is subjected to various surface explosions and consequently to fire caused by the equipment inside the building. Explosive loading has been calculated using UFC 3-340-02 instruction charts and fire load using the concept of fire density and relationships of EUROCODE 1 and EUROCODE 3 regulations. In order to simulate explosive and thermal loading, Abaqus finite element software and combined thermal-deformation dynamic analysis have been used. The temperature caused by the fire has been used as a natural fire, and the cooling and post-cooling stages of the fire have also been investigated. Validation of the proposed simulation, both for explosive load and fire load, was done with two valid laboratory works, and the proposed simulation with Abaqus finite element software was in acceptable agreement with the results of laboratory research. After ensuring the correctness and accuracy of the proposed numerical model, the structure response analysis against explosive loads and subsequent fires was performed by the numerical model. The results of these investigations showed that the response and deformation of the structure in the chain combined analysis (applying the interaction of explosion and fire on the structure) is increased by 15% compared to the independent combined analysis (independent analysis of the structure against explosion and fire and collecting the responses together); Therefore, in the simulations and designs made for multiple chain accidents (such as explosion and subsequent fire), the change of the structure's characteristics after one incident for the next incident should be considered so that the results have sufficient accuracy. Also, in addition to the inaccuracy of the independent composite method, the results of the structural analysis in this method are less than reality and non-conservative and will lead to an unsafe design; Therefore, in chain events, considering chain combination analysis is not only important but also necessary. Also, the results of the fire analysis showed that the location of the fire plays an important role in the amount of damage to the structure. If in the first scenario (fire in the first bay and the second floor of the frame), the damage and deformation of the structure were much higher than in the second scenario (fire in the second bay and the first floor of the frame). Therefore, it should be noted that if flammable materials are to be stored in structures to reduce the risk of fire, these materials should be stored in parts of the structure that have less contact surface with the structure (such as the second scenario) so that in case of fire, damage to the reach the minimum amount.

Keywords: Explosion, fire, Abaqus finite element software, Interaction between explosion and fire, multiple cascading incidents.