

## بررسی اثر رخداد انفجار به هنگام آتش سوزی بر روی ستون فولادی به روش دینامیکی صریح

رمضانعلی ایزدی فرد<sup>۱\*</sup>، حامد حاجی کریمیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار، ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: ۹۶/۰۳/۲۷، پذیرش: ۹۶/۰۷/۱۶)

### چکیده

وقوع انفجار از محتمل ترین حوادثی است که به هنگام یک حادثه آتش سوزی ممکن است رخ دهد. این مقاله به کمک روش المان محدود دینامیکی صریح به بررسی پاسخ غیرخطی ستون فولادی در برابر انفجاری که به هنگام وقوع حادثه آتش سوزی رخ داده می پردازد. در این مطالعه اثر درجه حرارت سطح فولاد هنگام وقوع انفجار و پارامتر فاصله مقیاس شده در ستون فولادی به روش دینامیکی صریح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد بالا رفتن دمای لحظه انفجار به بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس، می تواند سبب تغییر مکان های بزرگ و نهایتاً فروریزش ستون فولادی گردد. همچنین نشان داده شد که افزایش دمای لحظه انفجار در انفجارهای شدیدتر تأثیر کمتری نسبت به انفجارهای با فاصله مقیاس شده بزرگتر دارد.

**کلیدواژه ها:** آتش سوزی، انفجار، روش دینامیکی صریح، آسیب، ستون فولادی

## Investigation of the Explosion Effect During Fire on Steel Column via Dynamic Explicit Method

R. A. Izadifard\*, H. Hajikarimian

Imam Khomeini Int. University

(Received: 17/06/2017; Accepted: 08/10/2017)

### Abstract

The explosion occurrence is the most likely events that may occur during a fire incident. This paper studies on nonlinear response of steel column against an explosion during fire event by using dynamic explicit finite element scheme. In this study, the effect of temperature of steel surface at the moment of explosion and scaled distance parameter are investigated. The results show that increasing temperature to more than 400 °C may cause large displacements and ultimately led to collapse the column. It is shown that increasing the temperature of the instant explosion for more intense explosions is less effective than explosions with larger scaled distance (Z).

**Keywords:** Fire, Explosion, Dynamic Explicit Method, Damage, Steel Column

\*Corresponding Author E-mail: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

## ۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، پژوهشگران مطالعات گسترده‌ای را پیرامون اثر حریق بر روی سازه‌ها انجام داده‌اند. هو و همکاران [۱] با توسعه روش عددی و با استفاده از تحلیل شبیه‌استاتیکی با المان‌های چسبنده، اتصالات ساده‌ی فولادی را مدل‌سازی و مقاومت و شکل‌پذیری این اتصالات را در شرایط آتش‌سوزی مورد بررسی قرار دادند. به دلیل مشکلات عدم همگرایی پاسخ در روش نیوتن-رافسون و روش ریکس محققان از روش دینامیکی صریح جهت شبیه‌سازی‌های شبه‌استاتیکی اتصالات تحت حریق استفاده نمودند.

حاجی کریمیان و همکاران [۲] با بررسی لرزه‌ای تعدادی قاب خمشی فولادی که پیش‌تر در برابر بار حریق پایدار مانده بودند، نشان دادند که قاب‌ها با تجربه‌ی آتش‌سوزی، هنگامی که تحت بار لرزه‌ای قرار می‌گیرند، در برش پایه‌ی مشخص، تغییر مکان بیشتری در مقایسه با حالت بدون تجربه بار حرارتی از خود نشان می‌دهند.

ونگ و همکاران [۳] در مطالعه‌ای به معرفی روشی برای محاسبه‌ی درجه حرارت بحرانی (به هنگام کمانش و شکست) ستون فولادی که در معرض بارگذاری محوری فشاری قرار داشته و به صورت یکنواخت حرارت دیده، پرداخته‌اند. منظور از درجه حرارت کمانش، دمایی است که ستون مقید شده پایداری خود را موقتاً بر اثر افزایش بار محوری از دست می‌دهد درحالی‌که درجه حرارت شکست به دمایی اطلاق می‌شود که در آن بار محوری ستون به سطح اولیه باز می‌گردد. اثر سه پارامتر مختلف برای طراحی ستون، شامل سختی محوری، بار محوری اولیه و لاغری ستون بر روی درجه حرارت بحرانی ستون به روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته است. به موازات مطالعات فوق، تحقیقات مبسوط در خصوص اثر بارگذاری انفجار بر تیرها [۴ و ۵]، ستون‌ها [۶ و ۷] و دریای آزاده فولادی [۸ و ۹] بدون حضور حریق انجام شده است.

اثرات توأم حریق و انفجار موضوع مهمی است که نظر برخی از محققان را به خود متوجه کرده است. ونگ و همکاران [۱۰] طی یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی پس از اعمال آتش استاندارد به مدت ۶۵ و ۱۰۵ دقیقه به ستون‌های RPC-FST<sup>۱</sup>، آن‌ها را در معرض بار انفجاری قرار داده و اثر مدت آتش‌سوزی و میزان خرج شارژ انفجاری را بر روی پاسخ دینامیکی و مودهای شکست مورد

تحلیل و بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد هرچه مدت آتش‌سوزی و یا خرج انفجاری بیشتر باشد تغییر شکل جانبی ستون بیشتر افزایش می‌یابد. مطالعه‌ای عددی بر روی تیرهای فولادی یک‌بار تحت اثر انفجار پس از اتمام حریق و بار دیگر تحت اثر افزایش حرارت ناشی از حریق پس از وقوع انفجار انجام شد و نشان داده شد درجه حرارت بحرانی تیر در حالت انفجار پس از آتش‌سوزی از حالت آتش‌سوزی به دنبال انفجار کمتر است [۱۱]. در پژوهشی دیگر یک ستون فولادی پس از تحمل یک انفجار در معرض حریق قرار گرفته و با استفاده تعریف شاخص آسیب مورد بررسی واقع شد. در این پژوهش از نرم‌افزار LS-DYNA برای مدل‌سازی و از حل گر دینامیکی غیرخطی صریح تحلیل عددی استفاده شده است.

در این تحقیق با لحاظ پارامترهای آسیب برای مدل ماده فولادی و بررسی نتایج برای سطوح مختلف آسیب، روابطی برای پیش‌بینی آسیب ستون فولادی تحت اثر بارگذاری حریق و انفجار ارائه شد [۱۲]. چن و لی یو [۱۳] با فرض سناریویی مشخص، یک قاب فولادی را ابتدا در معرض بار انفجاری قرار داده و سپس بار ناشی از حریق را بر آن اعمال کردند. برای اعضای بحرانی که مستقیماً تحت اثر بار انفجار و حریق بودند از المان Shell (بدون لحاظ آسیب) و برای سایر اعضا از المان Beam استفاده شد. وقتی قاب تنها در معرض حریق قرار داشت، ستون‌ها در یک مود ترکیبی از کمانش پیچشی-جانبی و کمانش موضعی دچار شکست شدند ولی هنگامی که تحت آتش‌سوزی پس از انفجار قرار گرفته بودند تغییر شکل دائمی، کمانش موضعی و پلاستیک شدگی ناشی از انفجار مقاومت ستون و قاب را در برابر حریق کاهش داد.

مشاهدات نشان می‌دهد حوادث انفجار و آتش‌سوزی در بسیاری از موارد، دو حادثه جدایی‌ناپذیر از یکدیگر هستند. وقوع آتش‌سوزی در آزمایشگاه‌ها، انبار مهمات، پارکینگ‌ها و در محل‌هایی که مواد با قابلیت انفجاری حساس به دما وجود داشته باشد می‌تواند سبب انفجار به هنگام حادثه‌ی آتش‌سوزی شود. از این رو در این پژوهش (برخلاف تحقیقات قبل که حریق پس از انفجار و یا انفجار پس از اتمام آتش‌سوزی بررسی شده است) ستون فولادی به هنگام افزایش دما، در معرض سناریوهای مختلف انفجاری قرار گرفته و پس از آن نیز آتش‌سوزی تداوم یافته است. این مسئله چالشی را ایجاد می‌کند که به دلیل نیاز حل مسئله‌ی انفجار به استفاده از حل گر دینامیکی صریح، بحث حریق نیز با استفاده از این حل گر باید مورد تحلیل واقع شود.

<sup>۱</sup> Reactive Powder Concrete Filled Steel Tubular

## ۲. روش دینامیکی صریح

شبه‌سازی مسائلی که به صورت استاتیکی و دینامیکی ضمنی دچار مشکلات عدم همگرایی هستند و یا مسائلی که در آن‌ها تغییر شکل‌های بزرگ رخ می‌دهد استفاده از الگوریتم حل گر صریح معادلات می‌تواند جایگزینی برای الگوریتم استاندارد باشد [۱۴]. دستگاه معادلاتی (۱) که با استفاده از الگوریتم صریح که در آن پاسخ در لحظه  $t_{n+1}$  بر اساس کمیت‌های داده‌شده در لحظه  $t_n$  به صورت روابط (۲) به دست می‌آید:

$$[M]\{\ddot{U}\} - \{F\}_{int} - \{F\}_{ext} = 0 \quad (۱)$$

$$\{\ddot{U}\}_n = [M]^{-1}[\{F\}_{int} + \{F\}_{ext}]_n \quad (۲-الف)$$

$$\{\dot{U}\}_{n+1/2} = \{\dot{U}\}_{n-1/2} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \{\ddot{U}\}_n \quad (۲-ب)$$

$$\{U\}_{n+1} = \{U\}_n + \Delta t_{n+1} \{\dot{U}\}_{n+1/2} \quad (۲-ج)$$

که در آن  $\{\ddot{U}\}_n$  بردار شتاب در لحظه  $t_n$ ،  $\{\dot{U}\}_{n+1/2}$  بردار سرعت در نیمه گام و  $\{U\}_{n+1}$  بردار تغییر مکان در لحظه  $t_{n+1}$  است. پایداری و دقت روش صریح وابسته به گام زمانی انتخابی است. حداکثر گام زمانی که می‌توان با توجه به محدودیت پایداری حل گر صریح در نظر گرفت از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۵ و ۱۶]:

$$\Delta t \leq \min \left( L_e \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}} \right) \quad (۳)$$

که در آن  $L_e$  طول مشخصه کوچک‌ترین المان،  $\rho$  چگالی ماده،  $\lambda$  و  $\mu$  ثوابت لامه هستند که بر حسب مدول الاستیسیته و نسبت پواسون قابل تعریف هستند. در این رابطه بازه  $\Delta t$  به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که موج از روی المان پرشی نداشته باشد. همچنین گام زمانی پایدار می‌تواند بر حسب فرکانس حداکثر کل مدل به گونه‌ای تعریف شود که بر اساس معیار نایکوئیست (Nyquist stability criterion) رابطه (۴) را ارضا کند:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \left( \sqrt{1 + \xi_{max}^2} - \xi_{max} \right) \quad (۴)$$

که در آن،  $\xi_{max}$  نسبت میرایی مربوط به  $\omega_{max}$  است. به دو صورت گام زمانی ثابت و گام زمانی تمام خودکار می‌توان گام زمانی را در حل گر صریح نرم‌افزار آباکوس کنترل نمود.

## ۳. مشخصات مدل‌سازی

برای بررسی اثر انفجار به هنگام آتش‌سوزی، ستونی فولادی جعبه‌ای با مقطع  $40 \times 40$  (سانتی مترمربع) و ضخامت  $1/5$  سانتی متر با شرایط تکیه‌گاهی یک سر گیردار-یک سر لغزنده گیردار در نظر گرفته شده است. در تمامی شبه‌سازی‌ها قبل از اعمال هرگونه باری ستون تحت  $20$  درصد ظرفیت بار محوری خود قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی و حل مسئله از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده و حل گر از نوع Explicit انتخاب گردید. اثرات غیرخطی هندسی در فرایند تحلیل لحاظ شده است. برای شبه‌سازی مدل اجزا محدودی، از المان C3D8R استفاده شده که قابلیت در نظر گرفتن آسیب و نیز حذف المان را دارا است. این المان یک المان شش وجهی با  $8$  گره بوده و فرمولاسیون آن از نوع انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با کنترل hourglass است و با رفتار غیرخطی مصالح فولادی سازگاری دارد [۱۷]. پس از انجام تحلیل حساسیت مش اندازه در نظر گرفته‌شده برای دانه‌بندی جهت مش‌بندی مدل برابر  $2$  سانتی متر تعیین گردید.

### ۳-۱- مدل ماده فولاد

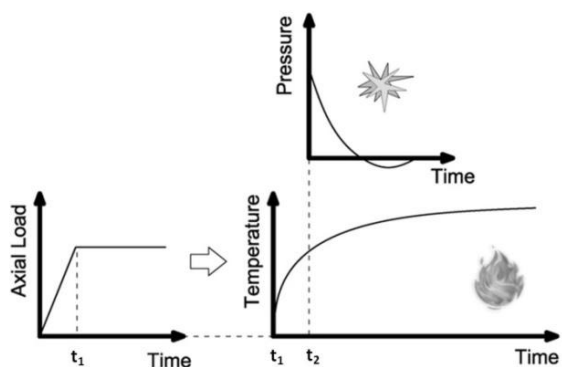
مدل ماده در نظر گرفته‌شده برای فولاد از نوع Classical Metal Plasticity بوده و در آن مشخصات پلاستیک و سایر مشخصات ترمومکانیکی فولاد بر حسب حرارت‌های مختلف در نرم‌افزار تعریف می‌گردد. در این مدل از رفتار سخت‌شوندگی الاستوپلاستیک استفاده می‌شود. فولاد مورد استفاده در شبه‌سازی عددی از نوع S355 با مقاومت تسلیم  $355$  مگاپاسکال در دمای محیط است. مشخصات مکانیکی وابسته به دمای این نوع فولاد با توجه به یوروکد [۱۸] استخراج شده است که نسبت به مشخصات در دمای محیط قابل محاسبه است. مشخصات مکانیکی فولاد S355 در درجه حرارت  $20^\circ\text{C}$  در جدول (۱)، نمودار ضرایب کاهندگی مشخصات مکانیکی فولاد در شکل (۱-الف) و نمودارهای تنش-کرنش این نوع فولاد در درجه حرارت‌های مختلف در شکل (۱-ب) ارائه شده است. مشخصات ترمومکانیکی رسانش حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی در مدل در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی فولاد S355 در دمای  $20^\circ\text{C}$  [۱۹]

مقدار	پارامتر
۷۸۵۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۲۱۰	مدول یانگ (GPa)
۰/۳	نسبت پواسون
$1/4 \times 10^{-5}$	ضریب انبساط حرارتی میانگین ( $^\circ\text{C}$ )

### ۲-۳. مراحل تحلیل

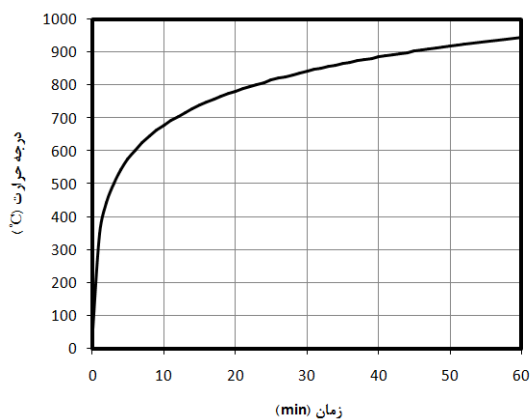
ابتدا بار محوری به صورت شبه استاتیکی بر ستون فولادی اعمال شده است. بار محوری به صورت خطی و افزایشی بر نمونه وارد شده و پس از رسیدن به مقدار ۲۰ درصد ظرفیت بار محوری، ستون فولادی در معرض آتش‌سوزی قرار می‌گیرد. به هنگام آتش‌سوزی در دماهای مشخص انفجار با شدت‌های مختلف رخ می‌دهد. اعمال آتش‌سوزی تا زمانی که ستون فروبریزد ادامه می‌یابد. مراحل تحلیل مدل به صورت شماتیک در شکل (۲) ارائه شده است. از حل گر دینامیکی صریح برای حل مسئله استفاده شده است.



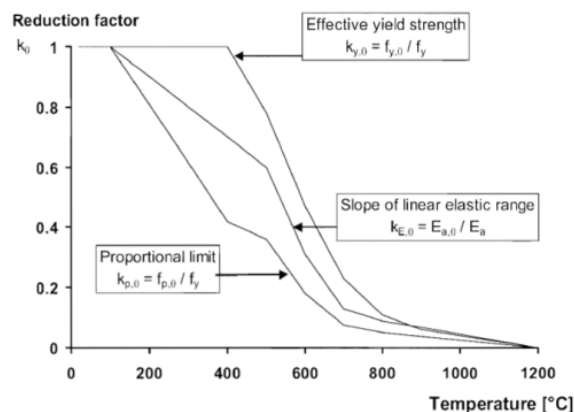
شکل ۲. مراحل بارگذاری و تحلیل مدل

### مرحله ۱: شبیه‌سازی آتش‌سوزی

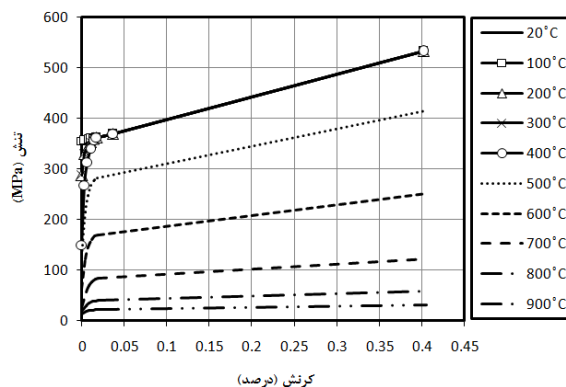
پس از بارگذاری محوری بر روی ستون، آتش‌سوزی اعمال می‌شود. برای شبیه‌سازی اثر حریق بر سازه نیاز به انتخاب و به‌کارگیری یک منحنی حریق است. منحنی حریق یک منحنی دما-زمان بوده که تغییر تدریجی درجه حرارت را با گذشت زمان جهت نمایش محیطی که سازه در آن قرار گرفته نشان می‌دهد. برای اعمال آتش‌سوزی بر ستون فولادی از منحنی حریق ISO834 [۲۱] استفاده گردید که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. منحنی حریق ISO 834



الف) ضرایب کاهش‌دهی رابطه تنش کرنش فولاد در درجه حرارت‌های بالا [۱۸]



ب) نمودار تنش کرنش فولاد S355 در درجه حرارت‌های بالا

شکل ۱. مشخصات ترمومکانیکی فولاد S355 مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

در حل گر صریح نرم‌افزار آباکوس دو روش برای لحاظ کردن اثر شکست المان پیشنهاد شده است: روش اول حذف المان گسیخته شده از مش‌بندی مدل و روش دوم حفظ المان و تنظیم تنش المان به مقدار صفر در گام بعدی تحلیل است [۲۰]. در این مطالعه در شبیه‌سازی عددی از روش اول استفاده شده است. برای آسیب و گسیختگی در مدل از معیار آسیب برشی استفاده شده است. مقادیر کرنش شکست، نسبت تنش برشی حداکثر و نرخ کرنش در لحظه شکست به همراه تغییر مکان پلاستیک موثر که بر پایه‌ی مقدار کرنش پلاستیک معادل در نقطه‌ی شکست به دست می‌آید در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای شکست فولاد S355 [۲۰]

پارامتر	مقدار
کرنش شکست	۰/۲۹۵
نسبت تنش برشی	۱/۸۵
نرخ کرنش ( $sec^{-1}$ )	۳۲۰
تغییر مکان پلاستیک موثر، $u^{pl}$ (m)	۰/۰۰۰۴۱۵
کرنش پلاستیک معادل در نقطه شکست، $\epsilon^{pl}$	۰/۱۶۵

و ۶۰۰ درجه سلسیوس باشد. از طرف دیگر انفجار محتمل می‌تواند شدت‌های مختلفی داشته باشد. شدت بارگذاری انفجاری اعمال شده به ستون با افزایش ماده منفجره و کاهش فاصله از مرکز انفجار افزوده خواهد شد. بدین منظور با تعریف فاصله مقیاس شده (Z) از رابطه (۶) بیش فشار (P<sub>s</sub> بر حسب kPa) تولیدشده از انفجار W کیلوگرم ماده TNT در فاصله R متری از مرکز ماده منفجره از رابطه (۷) قابل محاسبه است [۲۳].

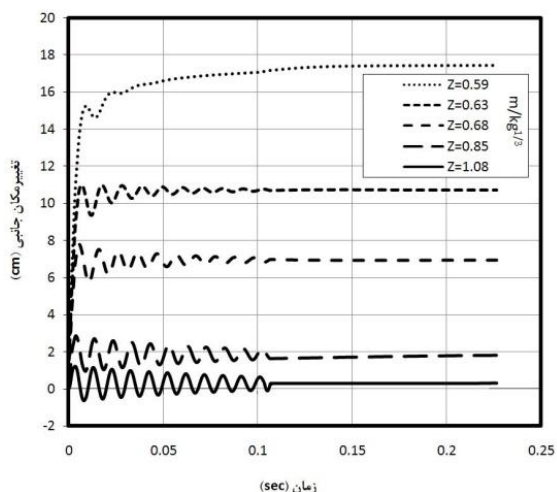
$$Z = R/W^{1/3} \quad (6)$$

$$X = \log_{10}(Z) \quad (7)$$

$$\log_{10}[\log_{10} P_s] = -0.1319X^2 - 0.3231X + 0.4644 \quad (8)$$

در این پژوهش برای پوشش بازه‌ی متعارفی از انفجارهای داخلی ساختمان‌ها، فواصل مقیاس شده‌ی ۰/۱۰۸، ۰/۱۸۵، ۰/۲۶۸، ۰/۴۳ و ۰/۵۹ (m/kg<sup>1/3</sup>) برای اعمال انفجار در نظر گرفته شد.

ابتدا بدون در نظر گرفتن حریق و در دمای محیط، ستون تحت انفجار با شدت‌های مختلف قرار گرفته و نمودار تغییر مکان جانبی ستون در شکل (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با وجود تغییر مکان زیاد، ستون حتی تحت انفجار شدید با فاصله مقیاس شده ۰/۵۹ m/kg<sup>1/3</sup>، همچنان پایدار مانده و به تغییر مکان ماندگاری رسیده است.



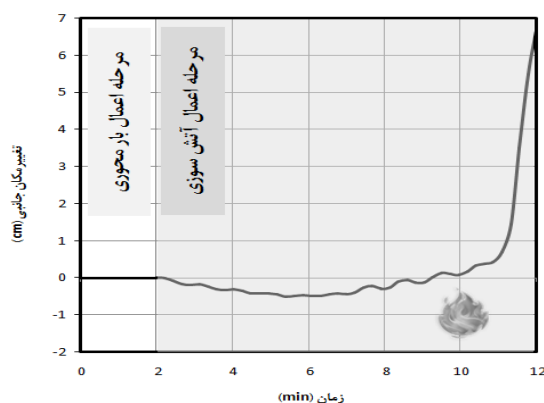
شکل ۵. تاریخچه زمانی تغییر مکان وسط تیر

### ۳-۲-۳. صحت‌سنجی

در مطالعه‌ی پیرامون بررسی لرزه‌ای یک قاب فولادی که آتش‌سوزی را تجربه کرده، صحت‌سنجی رفتار اعضای فولادی در برابر حریق ارائه شده است [۲]. بدین منظور قاب فولادی ۵ دهانه و ۴ طبقه دو بعدی در معرض حریق قرار گرفت. از منحنی پارامتری حریق برای اعمال آتش‌سوزی استفاده شده است. ارتفاع هر طبقه ۳/۶ متر، طول دهانه‌ها برابر ۶/۶ متر و کاربری ساختمان از نوع اداری بوده است. از فولاد با مقاومت تسلیم ۲۷۵ MPa و

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (5)$$

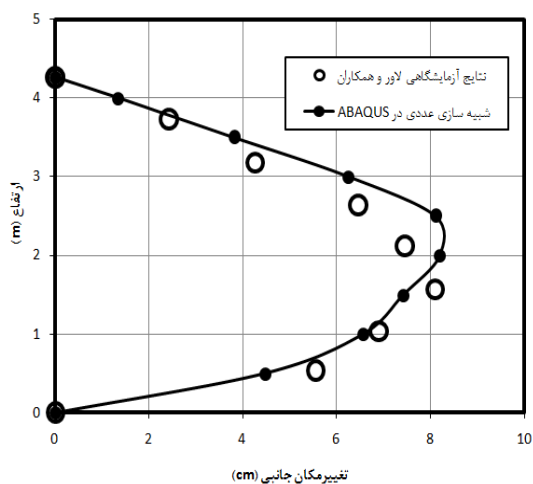
که در آن،  $t$  زمان بر حسب دقیقه و  $T_0$  دمای اولیه محیط به سلسیوس (۲۰ °C) است. محل وقوع انفجار و محل حادثه آتش‌سوزی در یک طرف ستون است. با توجه به این که تحلیل دینامیکی صریح به تنهایی اثر رسانایی و انتقال حرارت را در نظر نمی‌گیرد فرض شده است که درجه حرارت در بال پشتی ستون گرم شده برابر ۷۰ درصد دمای بال و جان ستون در سمت حریق باشد. به دلیل رسانایی حرارتی بالای فولاد به هر وجه حرارت به صورت یکنواخت اعمال شده است. جهت بررسی حالت بحرانی مسئله فرض بر این است که ستون فولادی بدون هرگونه پوشش مقاوم در برابر حریق باشد. یک مدل که صرفاً در معرض آتش‌سوزی بوده برای مقایسه نتایج مدل‌های اصلی، شبیه‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفت. نمودار تغییر مکان جانبی ستون فولادی مورد مطالعه تحت اثر حریق در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با شروع آتش‌سوزی ابتدا ستون تغییر مکان منفی (در جهت محل اعمال حریق) را تجربه می‌کند که به دلیل اثر انبساط حرارتی بیشتر وجه ستون در سمت محل وقوع حریق بوده و سپس با افزایش حرارت به دلیل از دست رفتن بیشتر مقاومت و سختی این سمت از ستون، کاهش طول ناشی از نیروی محوری بر افزایش طول ناشی از انبساط حرارتی غلبه کرده و در نتیجه جهت انحنای ستون عوض می‌شود. به دنبال آن تغییر مکان رشد صعودی پیدا کرده و این روند ادامه می‌یابد تا جایی که ستون فولادی نرم شده و فرو بریزد.



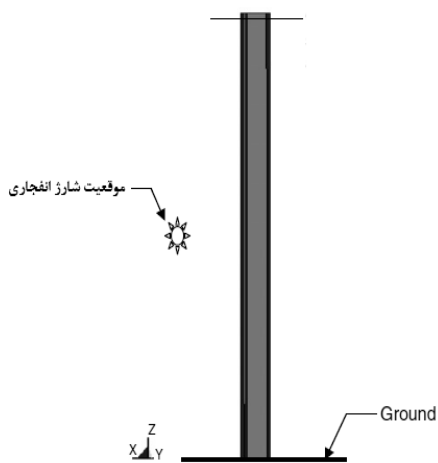
شکل ۴. نمودار تغییر مکان جانبی ستون مورد مطالعه تحت آتش‌سوزی

### مرحله ۲: شبیه‌سازی انفجار

از روش CONWEP برای اعمال بار انفجار بر ستون استفاده شده است. این روش مدل تجربی کینگری و بولماش [۲۲] بوده و حاصل آزمایش‌های انفجاری زیادی بر روی بازه گسترده‌ای از خرج‌های انفجاری است. با توجه به تعریف مسئله، انفجار در زمان‌های مختلفی پس از وقوع حریق رخ می‌دهد. این زمان‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دمای محیط معادل ۲۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰



الف) مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی



ب) نمای جانبی مدل مک‌کنل و براون [۲۵]

شکل ۷. صحت‌سنجی مدل مک‌کنل و براون

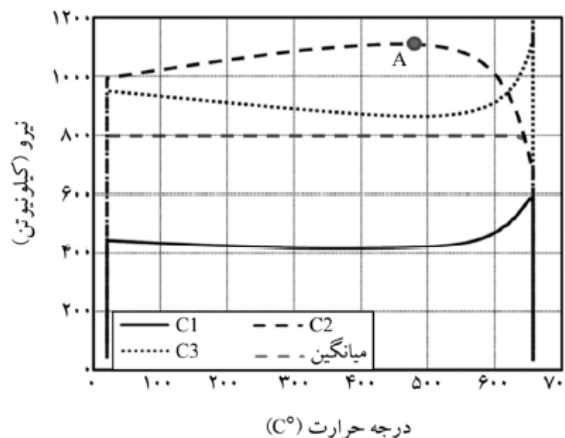
#### ۴. نتایج و بحث

پارامترهای اثر درجه حرارت سطح فولاد در لحظه شروع انفجار، تأثیر انفجار با شدت‌های مختلف به هنگام آتش‌سوزی عضو، تغییر مکان‌های ایجادشده و نحوه تغییر شکل مدل‌ها در حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مقایسه‌ای بین اثر حریق و انفجار صورت گرفت.

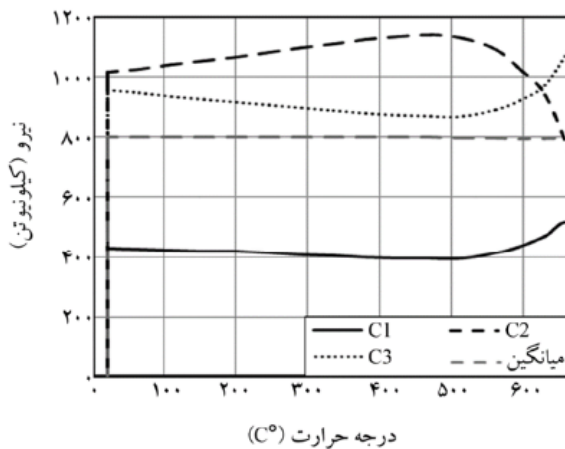
##### ۴-۱. اثر درجه حرارت

به منظور تأثیر درجه حرارت سطح فولاد در لحظه شروع انفجار، فرض شده است انفجار با شدت‌های مختلف در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به وقوع بپیوندد. برای مثال، در شکل (۸) تغییر شکل جانبی ستون متناظر با شروع انفجار در حرارت‌های مختلف در زمانی که دمای ستون به ۶۳۰ درجه سلسیوس رسیده، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای شروع انفجار، تغییر مکان‌های جانبی ستون بیشتر شده است.

نسبت پواسون ۰/۳ استفاده شد و مشخصات مکانیکی وابسته به دمای فولاد با توجه به یوروکد ۳ [۱۸] به‌دست آمد. نمودار صحت‌سنجی انجام‌شده در شکل (۶) ارائه شده است. در این شکل نیروهای محوری طبقه همکف تحت سناریوی متقارن حریق (آتش‌سوزی در دهانه کناری) مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که شبیه‌سازی از دقت مطلوبی برخوردار است.



الف) نیروهای محوری نمونه سان و همکاران [۲۴]

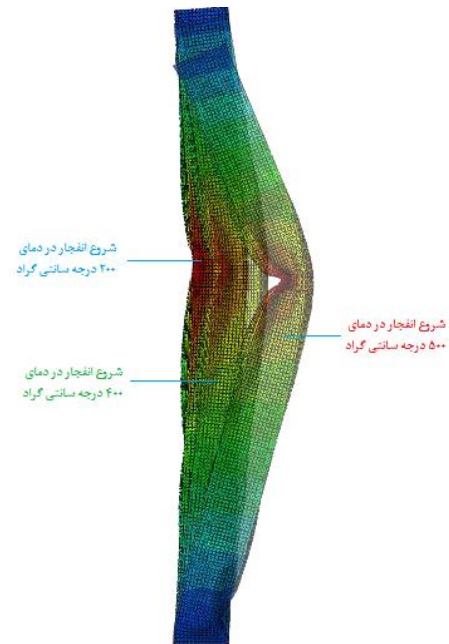


درجه حرارت (C°)

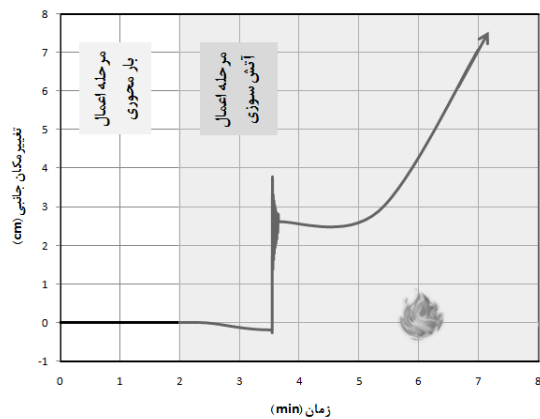
ب) نیروهای محوری مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس [۲] شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای صحت‌سنجی رفتار سازه فولادی در برابر حریق

به منظور صحت‌سنجی رفتار ستون فولادی در برابر بار انفجاری پژوهش مک‌کنل و براون [۲۵] مورد توجه و بررسی قرار گرفت. ستونی با مقطع W360×122 به ارتفاع ۴/۳ متر پس از تحمل ۶۷۰ نیوتن بار محوری تحت بار انفجار قرار می‌گیرد. ستون در محل اعمال بار محوری دارای درجه آزادی تغییر در راستای قائم است، مابقی درجات آزادی بسته شده‌اند. نمایی از مدل به همراه نمودار مقایسه‌ای تغییر مکان جانبی نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی در شکل (۷) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام‌شده از دقت کافی برخوردار است.

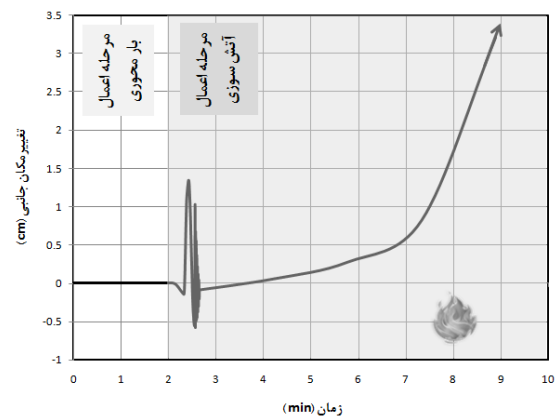
نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی ستون برای انفجار با  $Z=0.85 \text{ m/kg}^{1/3}$  به ازای شروع انفجار در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۹) داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش دمای لحظه انفجار، تغییر مکان حداکثر به هنگام انفجار افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت افزایش درجه حرارت شروع انفجار، شیب نمودار و سرعت تخریب را افزایش می‌دهد که به دلیل نرم شدگی و کاهش مقاومت ناشی از حرارت است و می‌توان نتیجه گرفت اثرات تخریبی ناشی از انفجار در حرارت‌های بالا بیشتر بوده و می‌تواند منجر به فروریزش سریع‌تر سازه گردد. در درجه حرارت  $600^\circ\text{C}$  شوک ناشی از انفجار توأم با حرارت به تخریب ستون منجر می‌شود و تغییر مکان با شیب تندی افزایش می‌یابد. به دلیل بازه زمانی کوچک انفجار نسبت به مدت اعمال حریق، حالت موجی شکل ناشی از انفجار به صورت فشرده نمایش داده شده، به همین خاطر در شکل (۱۰)، نمایی شماتیک برای بیان بهتر خروجی مسئله ارائه شده است.



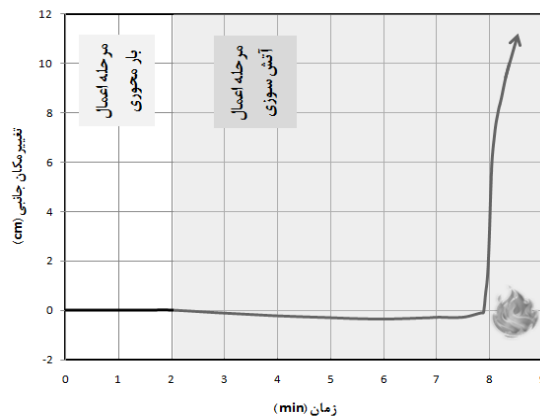
شکل ۸. تغییر شکل جانبی ستون مورد مطالعه در دمای  $630^\circ\text{C}$  تحت انفجار ( $Z=0.85 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) به ازای شروع انفجار در درجه حرارت‌های مختلف



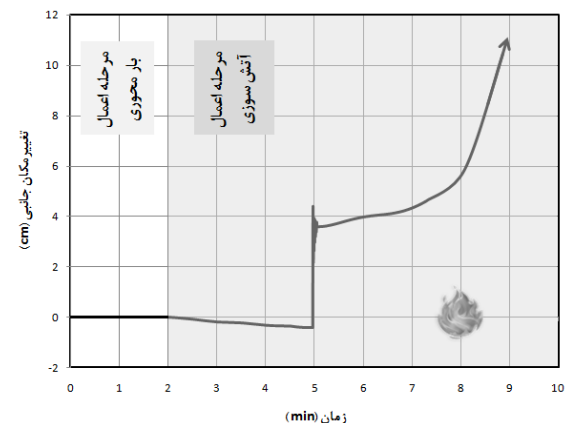
ب) شروع انفجار در  $400^\circ\text{C}$



الف) شروع انفجار در  $200^\circ\text{C}$



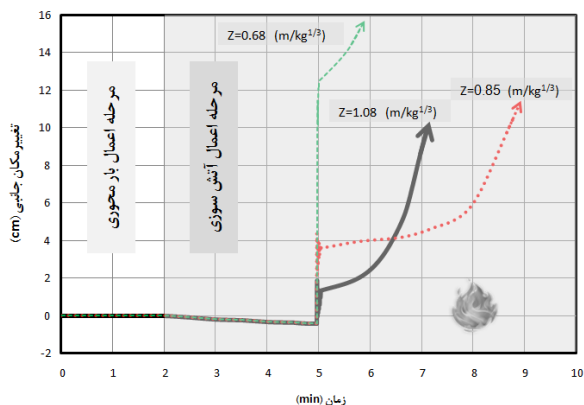
د) شروع انفجار در  $600^\circ\text{C}$



ج) شروع انفجار در  $500^\circ\text{C}$

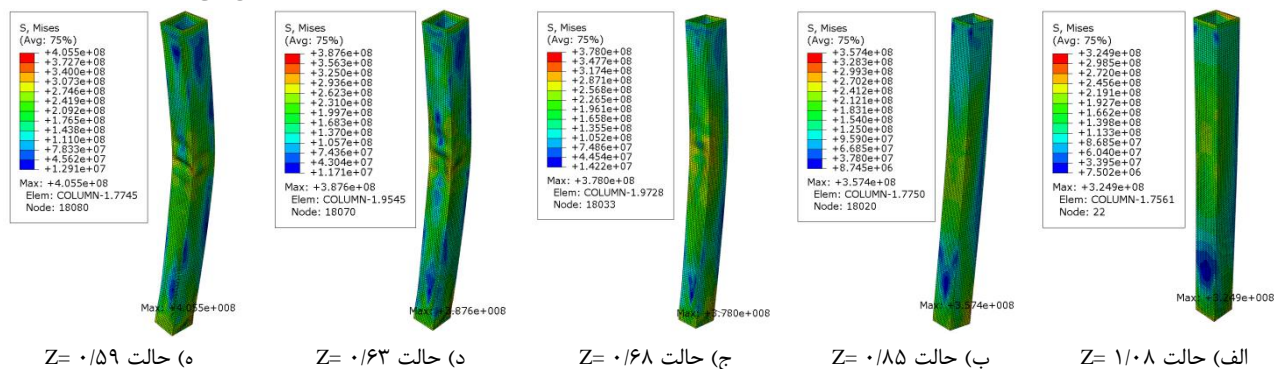
شکل ۹. نمودار تاریخچه زمانی انفجار ( $Z=0.85 \text{ m/kg}^{1/3}$ ) با لحظه‌های مختلف شروع واکنش به هنگام آتش سوزی

زمانی تغییر مکان جانبی ستون تحت اثر شدت انفجارهای مختلف که در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس رخ داده‌اند را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار می‌توان دریافت که به ازای شروع انفجار در حرارت‌های بالا، افزایش میزان شدت انفجار به افزایش تغییر مکان حداکثر انفجار منجر می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار تغییر مکان جانبی به ازای شدت انفجارهای مختلف برای حالت شروع انفجار در دمای ۵۰۰ °C

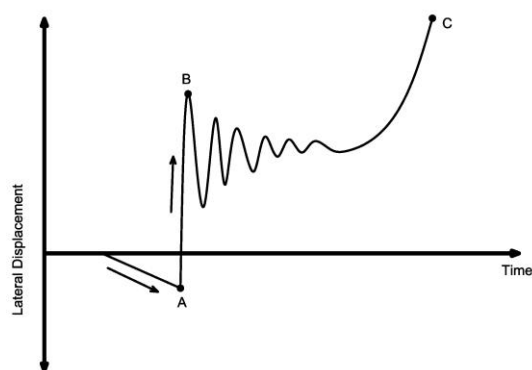
دیگرام تنش فون مایزس ستون مورد مطالعه تحت اثر شدت انفجارهای مختلف برای حالت شروع انفجار در دمای ۵۰۰ درجه میزان تنش فون مایزس کاهش می‌یابد. با وجود تغییرات چشمگیر تغییر شکل ستون، به دلیل کاهش سختی ماده افزایش تنش فون مایزس هنگامی که تغییر مکان حداکثر گذرا رخ می‌دهد به میزان کمی مشاهده می‌شود. در تمامی حالت بیش‌ترین تنش فون مایزس در پشت و در پای ستون مورد مطالعه رخ می‌دهد.



شکل ۱۲. دیگرام تنش فون مایزس تحت اثر انفجارهای مختلف برای حالت شروع انفجار در دمای ۵۰۰ °C

جانبی حداکثر ستون به شدت افزایش می‌یابد که موجب فروریزش ستون خواهد شد. مشاهده می‌شود که شروع انفجار در درجه حرارت‌های کمتر از ۵۰۰ °C، با فواصل مقیاس شده کمتر از ۰/۸۵  $m/kg^{1/3}$  کمترین تغییر مکان جانبی را خواهد داشت و در صورت اطفای حریق، احتمال پایدار ماندن ستون نسبت به سایر حالات به مراتب بیشتر خواهد بود.

مطابق شکل (۱۰)، تا نقطه‌ی A (لحظه‌ی شروع انفجار) تغییر مکان کاهش می‌یابد که به دلیل انبساط حرارتی بیشتر یک طرف ستون است. پس از وقوع انفجار تغییر مکان ناشی از انفجار بر اثر انبساط حرارتی غالب شده و نمودار با شیب زیادی سیر صعودی طی می‌کند تا به مقدار حداکثر خود (نقطه B) برسد. با گذشت زمان از دامنه تغییر مکان ناشی از انفجار کاسته شده و اثر موجی شکل انفجار بر نتایج از بین می‌رود. پس از انفجار، حرارت آتش‌سوزی موجب افزایش تغییر مکان شده و با گذشت زمان شیب تغییرات افزایش می‌یابد تا در نقطه C ستون فرو می‌ریزد.



شکل ۱۰. نمودار شماتیک تغییر مکان جانبی ستون فولادی تحت اثر انفجار به هنگام آتش‌سوزی

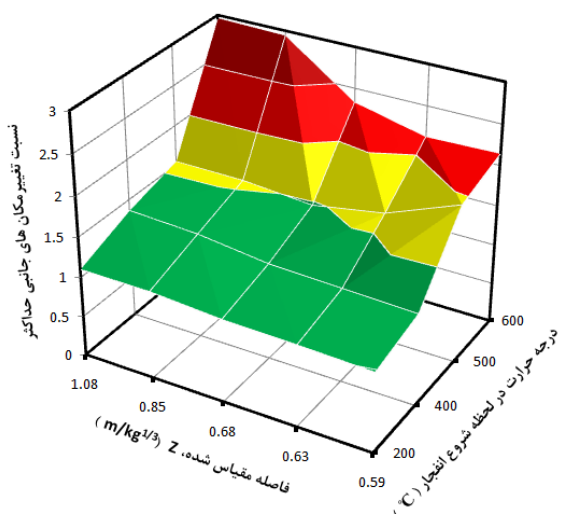
#### ۴-۲. اثر انفجار

به منظور بررسی تأثیر شدت انفجار به هنگام آتش‌سوزی، بار انفجاری با فواصل مقیاس شده‌ی ۰/۸، ۰/۸۵، ۰/۶۸، ۰/۶۳ و ۰/۵۹ ( $m/kg^{1/3}$ ) بر ستون اعمال شده است. شکل (۱۱) تاریخچه

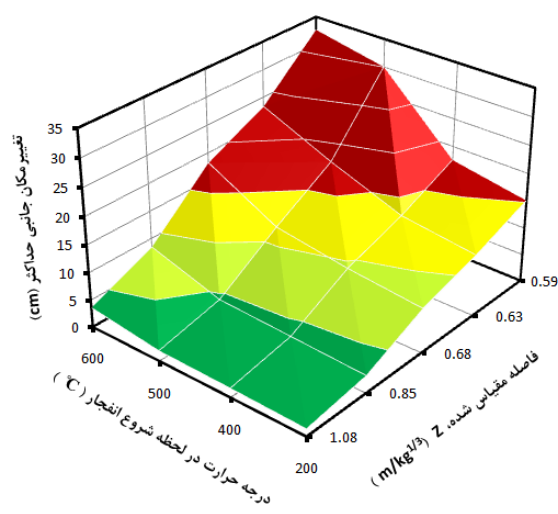
#### ۴-۳. مقایسه اثر حریق و انفجار

برای بررسی مقایسه میزان تأثیر حریق و انفجار بر ستون فولادی، نمودار سه بعدی تغییر مکان جانبی بر حسب فاصله مقیاس شده و درجه حرارت سطح ستون به هنگام وقوع انفجار در شکل (۱۳) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۳-الف) با افزایش درجه حرارت شروع انفجار و کاهش فاصله مقیاس شده، تغییر مکان





ب) نمودار سه بعدی نسبت تغییر مکان حداکثر انفجار به هنگام آتش‌سوزی به انفجار در دمای  $20^{\circ}\text{C}$



الف) نمودار سه بعدی تغییر مکان حداکثر

شکل ۱۳. نمودار سه بعدی اثر فاصله مقیاس شده و درجه حرارت در لحظه شروع انفجار بر تغییر مکان جانبی حداکثر ستون

هنگامی که از  $500^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس عبور کند تأثیرات بسیار شدیدی بر تغییر مکان جانبی ستون خواهد گذاشت. مقادیر عددی تغییر مکان حداکثر در Z های مختلف و دماهای مشخص لحظه شروع انفجار در جدول (۳) داده شده است. در جدول (۴) مدت زمان مقاومت ستون فولادی مورد مطالعه در برابر انفجار به هنگام یک حادثه آتش‌سوزی بر حسب دقیقه ارائه شده است. مطابق این جدول مشاهده می‌شود در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  در فواصل مقیاس شده کمتر از  $1/0.8\text{ m/kg}^{1/3}$  به محض وقوع انفجار ستون ناپایدار شده و فرو می‌ریزد.

### ۵. نتیجه‌گیری

جهت بررسی تأثیر رخداد انفجار به هنگام یک حادثه آتش‌سوزی، یک ستون فولادی با مقطع قوطی، در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی و توسط حل گر دینامیکی صریح مورد تحلیل قرار گرفت. ابتدا ستون در معرض بار محوری قرار گرفته و سپس حرارت آن به واسطه وقوع آتش‌سوزی افزایش می‌یابد. از منحنی حریق ISO834 برای اعمال حریق استفاده گردید. همچنان که درجه حرارت ستون به سبب وقوع حریق بالا می‌رود فرض گردید هر بار در دماهای مشخص انفجار با شدت‌های مختلف رخ دهد. از روش CONWEP جهت شبیه‌سازی اثر انفجار بر ستون استفاده شد. پس از انفجار نیز آتش‌سوزی تا زمانی که ستون فرو بریزد ادامه یافت. نتایج نشان داد که دمای لحظه انفجار خصوصاً در دماهای بیش از  $500^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس، می‌تواند سبب تغییر مکان‌های بزرگ و نهایتاً فروریزش ستون فولادی گردد. مشاهده

به منظور مقایسه‌ی اثر انفجار به هنگام حریق و انفجار در دمای محیط، نمودار سه بعدی نسبت تغییر مکان‌های جانبی حداکثر ناشی از انفجار به هنگام آتش‌سوزی به انفجار در دمای محیط در شکل (۱۳-ب) ارائه شده است. مطابق شکل (۱۳-ب)، برای وقوع انفجار در دمای بین  $200$  تا  $400^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس نسبت به حالت انفجار در دمای محیط کمترین میزان اختلاف مشاهده می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد لحظه وقوع انفجار به هنگام آتش‌سوزی

جدول ۳. مقادیر تغییر مکان حداکثر (cm) در Z و دماهای مختلف

شروع انفجار		$Z\text{ (m/kg}^{1/3}\text{)}$				
$T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$		۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۸۵	۱/۰۸
۲۰ (بدون آتش‌سوزی)		۱۵/۲۵	۱۰/۹۸	۷/۸۱	۲/۸۶	۱/۲۱
۲۰۰		۱۵/۱۵	۱۱/۲۱	۸/۱۱	۳/۱۴	۱/۳۴
۴۰۰		۱۷/۵۶	۱۲/۹۵	۹/۴۶	۳/۷۸	۱/۶۶
۵۰۰		۳۰/۰۸	۱۷/۷۷	۱۱/۴۷	۴/۴۰	۱/۸۸
۶۰۰		۳۲/۷۲	۲۳/۳۰	۱۸/۲۰	۸/۴۳	۳/۶۲

جدول ۴. مدت زمان (min) مقاومت ستون مورد مطالعه در برابر انفجار به هنگام آتش‌سوزی\*

$Z\text{ (m/kg}^{1/3}\text{)}$		$T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$				
$T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$		۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۸۵	۱/۰۸
۲۰۰		۴/۳۷۵	۵	۵/۸۳	۶/۶۶۷	۷/۵
۴۰۰		۳	۴/۵	۵/۷۵	۶/۶۶۷	۷/۰۸
۵۰۰		۳	۳/۷۵	۴/۸۴	۶/۲۵	۶/۶۶۷
۶۰۰		۵/۸۷۵	۵/۸۷۵	۵/۸۷۵	۵/۸۷۵	۶/۵۸

\* زمان از لحظه شروع آتش‌سوزی محاسبه شده است.

- [9] Izadifard, R. A.; Maheri, M. "Ductility Effects on the Behavior of Steel Structures under Blast Loading"; Iranian J. Science and technology 2010, 34, 49-62.
- [10] Wang, J.; Chen, W.; Guo, Z.; Liang, W. "Dynamic Responses of RPC-Filled Steel Tubular Columns Post Fire Under Blast Loading"; The Open Civil Engineering Journal 2016, 10, 236-245.
- [11] Xi, F. "Large Deflection Response of Restrained Steel Beams Under Fire and Explosion Loads"; Springer Plus, 2016, 5, 752.
- [12] Ding, Y.; Wang, M.; Li, Z. X.; Hao, H. "Damage Evaluation of the Steel Tubular Column Subjected to Explosion and Post-Explosion Fire Condition"; Eng. Struct. 2013, 55, 44-55.
- [13] Chen, H.; Liew, J. Y. "Explosion and Fire Analysis of Steel Frames Using Mixed Element Approach"; J. Eng. Mech. 2005, 131, 606-616.
- [14] Schaumann, P.; Kirsch, T. "Fracture Simulation in a Steel Connection in Fire"; Proceedings of Conference: Applications of Structural Fire Engineering, Prague. 2011.
- [15] Khelifa, M.; Khennane, A.; El Ganaoui, M.; Rogaume, Y. "Analysis of the Behavior of Multiple Dowel Timber Connections in Fire"; Fire Safety Journal 2014, 68, 119-128.
- [16] Albrifkani, S.; Wang, Y. C. "Explicit Modeling of Large Deflection Behavior of Restrained Reinforced Concrete Beams in Fire"; Eng. Struct. 2016, 121, 97-119.
- [17] Manual, A. U. Version 6.10. ABAQUS Inc. (2010).
- [18] Eurocode 3 (2002) Design of Steel Structures. Part 1-2: General Rules. Structural Fire Design. EN 1993-1-2. European Committee for Standardization, CEN.
- [19] Björkstam, L. O. "Single Store Steel Building Exposed to Fire: an Integrated Approach for Analytical Evaluation of Steel Structures Exposed to Fire"; Master's Thesis, Luleå University of Technology, Veljkovic, Milan, 2012.
- [20] Al-Thairy, H.; Wang, Y. C. "A Numerical Study of the Behaviour and Failure Modes of Axially Compressed Steel Columns Subjected to Transverse Impact"; Int. J. Impact Eng. 2011, 38, 732-744.
- [21] ISO (1999) 834: Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- [22] Kingery, C. N.; Bulmash, G. "Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst"; Ballistic Research Laboratories 1984.
- [23] Izadifard, R. A.; Foroutan, M. "Blast wave Parameters Assessment at Different Altitude Using Numerical Simulation"; Turkish J. Eng. Environ. Sci. 2010, 34, 25-42.
- [24] Sun, R.; Huang, Z.; Burgess, I. W. "The Collapse Behaviour of Braced Steel Frames Exposed to Fire"; J. Construct. Steel Res. 2012, 72, 130-142.
- [25] McConnell, J. R.; Brown, H. "Evaluation of Progressive Collapse Alternate Load Path Analyses in Designing for Blast Resistance of Steel Columns"; Eng. Struct. 2011, 33, 2899-2909.

گردید با افزایش دمای لحظه انفجار، تغییر مکان حداکثر به هنگام انفجار افزایش خواهد یافت. با بررسی نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان جانبی ستون دریافته شد که افزایش درجه حرارت شروع انفجار، شیب نمودار تغییر مکان جانبی - زمان و سرعت تخریب افزایش می‌دهد. بیش‌ترین آسیب مربوط به حالتی است که انفجار شدیدتر بوده و در حرارت بالاتری شروع شده بود. همچنین نشان داده شد که افزایش دمای لحظه انفجار در انفجارهای شدیدتر تأثیر کمتری نسبت به انفجارهای با فاصله‌ی مقیاس شده بزرگ تر دارد. نمودارها نشان دادند که تأثیر انفجار شدیدتر با دمای وقوع پایین تر از انفجارهای ضعیف‌تر با دمای وقوع بالاتر به نسبت انفجار در دمای محیط به مراتب کمتر است. مطابق با تحقیق انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت در انفجارهایی که به تنهایی موجب فروریزش ستون نمی‌شوند، وقوع آن‌ها در حرارت‌های بالا می‌تواند منجر به تغییر مکان‌های بزرگ و نهایتاً فروریزش سازه گردد.

## ۶ منابع

- [1] Hu, Y.; Burgess, I. W.; Davison, J. B.; Plank, R. J. "Modeling of Flexible End Plate Connections In Fire Using Cohesive Elements"; Fifth International Conference of Structures in Fire, Singapore. 2008.
- [2] Hajikarimian, H.; Hamed, F.; Izadifard, R. A. "Seismic Behavior Investigation of Rigid Steel Frames After Fire"; Bulletin of Earthquake Science and Engineering 2016, 3, 61-74 (In Persian).
- [3] Wang, P.; Wang, Y. C.; Li, G. Q. "A New Design Method for Calculating Critical Temperatures of Restrained Steel Column in Fire"; Fire Safety Journal 2010, 45, 349-360.
- [4] Izadifard, R. A.; Gholipour, R.; Hajikarimian, H. "Damage Assessment of RC Beams under Blast Loading (Experimental and Numerical Studies)"; Journal of Energetic Materials 2017, 12, 33-43. (In Persian).
- [5] Izadifard, R. A.; Kheirabadi, P. M.; Zarehani, A. "Residual Flexural Strength of Damaged RC Beams Due to Blast"; Journal of Energetic Materials 2013, 8, 1-14. (In Persian)
- [6] Zhang, F.; Wu, C.; Zhao, X. L.; Li, Z. X.; Heidarpour, A.; Wang, H. "Numerical Modeling of Concrete-Filled Double-Skin Steel Square Tubular Columns Under Blast Loading"; Journal of Performance of Constructed Facilities 2015, 29, B4015002.
- [7] Nassr, A. A.; Razaqpur, A. G.; Tait, M. J.; Campidelli, M., Foo, S. "Strength and Stability of Steel Beam Columns under Blast Load"; Int. J. Impact Eng. 2013, 55, 34-48.
- [8] Lezgi, M.; Izadifard, R. A.; Lashgari, M. R. "Evaluation of Nonlinear Response of Reinforced Concrete Frames Designed According to Earthquake Codes, Subjected to Blast Loading"; Passive Defence Science and Technology 2017, 8, 201-212. (In Persian)