

## A parametric study of the cyclic behavior of concrete shear wall after fire

Abbas Rezaeian<sup>1</sup>, Farhad Hosseinlou<sup>2\*</sup>, Bijan Bahadori Birgani<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Master's degree in structural engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

### ABSTRACT

For concrete structures exposed to fire and thermal load, in addition to researching their residual bearing capacity, it is also important to study their seismic performance after fire. Therefore, in the present research, the mechanical and cyclical behavior of concrete shear wall after fire has been studied using finite element method and ABAQUS software. Since, according to studies, the most important factor in the behavior of concrete in fire is the heating time, so this parameter is considered as the main variable of the research. In this parametric study, the variables of shear wall thickness (geometric parameter) and aggregate type (technical parameter) are considered as effective factors in the behavior of concrete in fire. In this regard, 7 models have been investigated. The results of the research showed that increasing the fire duration parameter increases the heat flux and temperature on the surface of the concrete wall and steel rebars. The results of the research show that the maximum von Mises stress of the concrete wall has increased by 22.7% and 44.446%, respectively, by increasing the duration of the fire from 0 to 90 and 150 minutes. Increasing the duration of fire reduces the yield strength and ultimate strength of steel bars by 17% and 15%, respectively. Yield strain, rupture strain and ultimate strain have also increased by 32.5%, 5.05% and 5.4%, respectively.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 12 November 2023

**Revise Date:** 05 June 2024

**Accept Date:** 15 September 2024

### Keywords:

Cyclic behavior,  
fire,  
concrete shear wall,  
thermal flux,  
parametric study

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424140.3260>

\*Corresponding author: Farhad Hosseinlou

Email address: [F.Hosseinlou@scu.ac.ir](mailto:F.Hosseinlou@scu.ac.ir)

## مطالعه پارامتری رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتنی پس از آتش

عباس رضائیان<sup>۱</sup>، فرهاد حسینلو<sup>۲\*</sup>، بیژن بهادری بیرگانی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

### چکیده

برای سازه‌های بتنی در معرض آتش‌سوزی و بار حرارتی نه تنها تحقیق در مورد ظرفیت تحمل باقیمانده آن‌ها لازم است، بلکه مواردی که روی عملکرد چرخه‌ای پس از آتش‌سوزی تمرکز دارند نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به این نکته، در تحقیق حاضر رفتار مکانیکی و چرخه‌ای دیوار برشی بتنی بعد از آتش‌سوزی با استفاده از روش عددی اجزای محدود و نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجا که طبق مطالعات مهمترین عامل در رفتار بتن در آتش‌سوزی زمان حرارت دهی می‌باشد، لذا این پارامتر به عنوان متغیر اصلی تحقیق در نظر گرفته شده است. در مطالعه پارامتری حاضر، متغیرهای ضخامت دیوار برشی (پارامتر هندسی) و نوع سنگدانه (پارامتر فنی) به عنوان عوامل موثر در رفتار بتن در آتش‌سوزی در نظر گرفته شده‌اند. در این راستا، ۷ مدل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق نشان با افزایش مدت زمان آتش‌سوزی از ۰ به ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه، ماکسیمم تنش فون میسز دیوار بتنی به ترتیب ۲۲/۷ و ۴۴/۴۴۶ درصد افزایش یافته است. افزایش مدت زمان آتش‌سوزی، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میلگردهای فولادی را به ترتیب ۱۷٪ و ۱۵٪ کاهش می‌دهد. کرنش تسلیم، کرنش گسیختگی و کرنش نهایی نیز به ترتیب ۳۲/۵٪، ۵/۰۵٪ و ۵/۴٪ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: رفتار چرخه‌ای، آتش، دیوار برشی بتنی، شار حرارتی، مطالعه پارامتری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424140.3260">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424140.3260</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.424140.3260">10.22065/jsce.2024.424140.3260</a>	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۶/۲۶	۱۴۰۳/۰۶/۲۶	۱۴۰۳/۰۳/۱۶	۱۴۰۲/۰۸/۲۱
فرهاد حسینلو					*نویسنده مسئول:	
F.Hosseinlou@scu.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

آتش سوزی یکی از رایج ترین بلاهای طبیعی و غیرطبیعی است و تحت تاثیر آتش، ساختار یک ساختمان می تواند تخریب یا تضعیف شود و امنیت ساختمان را در معرض خطر قرار دهد [۱]. اغلب مصالح ساختمانی در برابر افزایش حرارت، آسیب پذیری بالایی از خود نشان می دهند. بتن و فولاد نیز از این قاعده مستثنی نیستند، بطوریکه در بتن علاوه بر کاهش مقاومت، پدیده پوسته پوسته شدن نیز اتفاق می افتد. درجه حرارت بالا باعث کاهش خصوصیات مکانیکی عمومی بتن و فولاد و حتی موجب آسیب در سطح ساختاری آن ها، به دلیل قرار گرفتن در معرض حرارت می شود [۲ و ۳]. خرابی سازه بتنی در آتش سوزی با توجه به ماهیت آتش سوزی، سیستم بارگیری و نوع سازه متفاوت است. شکست می تواند در اثر از دست دادن مقاومت خمشی یا کششی، از دست دادن مقاومت برشی یا پیچشی، از دست دادن مقاومت فشاری و یا پوسته شدن بتن اتفاق بیفتد [۴]. یکی از مهمترین پدیده های تأثیرگذار بر ظرفیت تحمل سازه ای که در معرض شرایط آتش سوزی قرار دارد افت مقاومت بتن در دمای بالا، در نتیجه فرآیندهای شیمیایی - فیزیکی و آسیب های مکانیکی در داخل ریزساختار بتن است [۵]. در حقیقت، عوامل زیادی بر کاهش مقاومت بتن در دمای بالا تأثیر می گذارند، مانند نوع سنگدانه، تخلخل بتن، ابعاد عضو، زمان و میزان گرمایش و بار اعمال شده [۶-۱۰]. در بتن با مقاومت بالا، کاهش مقاومت با افزایش دما سریعتر از بتن معمولی اتفاق می افتد. از نظر عملی، با توجه به ظرفیت تحمل سازه ای، ممکن است بتن حرارت دیده تا ۵۰۰-۶۰۰ درجه سانتی گراد تخریب شده تلقی شود [۶]. در حال حاضر مهندسان با انتخاب حداقل ضخامت ها و روکش های بتنی دیوار بتنی در تمامی آیین نامه های ساختمانی، دیوارهای بتنی را برای مقاومت در برابر آتش طراحی می کنند. آیین نامه ها به سمت طراحی مبتنی بر عملکرد برای آتش سوزی پیش می روند و بنابراین مهم است که مهندسان با استفاده از روش دقیق و کارآمد مبتنی بر عملکرد، بتوانند دیوارهای بتنی را برای آتش طراحی کنند [۱۱]. تاکنون مطالعات و تحقیقات اندکی در رابطه با رفتار دیوار برشی بتنی پس از آتش سوزی نسبت به سایر موضوعات علمی صورت گرفته است. گوپرونک<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) رفتار لرزه ای دیوارهای برشی بتن مسلح پس از آتش سوزی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش حاکی از آن بود که ظرفیت باربری نمونه با نسبت آرماتور کمتر پس از قرار گرفتن در معرض دمای بالا، ۱۵/۸ درصد کاهش می یابد. با این حال، با افزایش صحیح آرماتور به دلیل بازیابی مقاومت و سختی میله های فولادی پس از خنک شدن، می توان این زوال را کاهش داد [۱۲]. وانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد لرزه ای دیوارهای برشی کوتاه بتنی پس از آتش سوزی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت دیوار برشی کوتاه با افزایش زمان قرار گرفتن در معرض آتش کاهش می یابد. قابل ذکر است که نسبت بار محوری بر بهبود ظرفیت باربری دیوار برشی کوتاه پس از آتش سوزی تأثیر مثبت دارد [۱۳]. چی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در مورد الگوهای شکست دیوارهای بتن سبک وزن تقویت شده پس از درجه حرارت بالا تحقیق کردند. نتایج تحقیق نشان داد که دیوار بتنی سبک وزن تقویت شده پس از تست مقاومت در برابر آتش، رفتار مکانیکی خود را حفظ کرده است. نتایج آزمون هم چنین نشان داد که دیوارهای بتن سبک وزن تقویت شده و دیوارهای بتنی با وزن معمولی تقویت شده الگوهای خرابی یکسانی دارند [۱۴]. ژائو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷) مقاومت در برابر آتش و رفتار لرزه ای پس از آتش دیوارهای برشی بتنی با مقاومت بالا را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، ظرفیت باربری نمونه ها، مقاومت جانبی و ظرفیت اتلاف انرژی دیوارها کاهش یافت؛ درحالی که استفاده از بتن سبک سازه ای باعث بهبود ظرفیت باربری نمونه ها در حدود ۱۰ درصد شد [۱۵]. نی<sup>۵</sup> و برلی (۲۰۱۸) رفتار لرزه ای پس از آتش سوزی دیوارهای سازه ای بتن مسلح را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که آسیب ناشی از آتش سوزی باعث کاهش ظرفیت تحمل بار و سختی دیوارهای برشی تحت بارهای چرخشی معکوس می شود [۱۶]. نی و گرنی (۲۰۲۰) بر روی عوامل موثر بر مدل سازی محاسباتی سازه های بتنی در آتش تحقیق کردند. تمرکز بر روی چالش های مدل سازی فعلی و همچنین جنبه هایی است که گاهی اوقات برای مواد بتنی و رفتار ساختاری آن ها

1 Gui-rong

2 Wang

3 Chi

4 Xiao

5 Ni

در دمای بالا نادیده گرفته می‌شوند. سرانجام، مقاله با بحث در مورد محدودیت‌ها، نیازهای تحقیق و فرصت‌ها با توجه به مدل‌سازی محاسباتی سازه‌های بتنی در آتش خاتمه یافت [۱۷]. توسعه اخیر تکنیک‌های عددی به جای آزمایش‌های فیزیکی چالش‌برانگیز، چشم اندازه‌های هیجان‌انگیزی را برای اصلاح پیش‌بینی رفتار سازه تحت آتش فراهم کرده است. از این رو، وانگ و همکاران (۲۰۲۳) بر روی یک روش شبیه‌ساز خرابی سازه تحت آتش از طریق انجام تحلیل آسیب اعضای محلی و شبیه‌سازی فروپاشی اجزای سازه باقی‌مانده متمرکز شدند. آن‌ها رفتار آسیب و شکست زیرسازه در معرض آتش بر اساس یک مدل آسیب الاستوپلاستیک مبتنی بر انرژی برای بتن در دماهای بالا را شبیه‌سازی کردند. روش توسعه‌یافته پیشنهادی، امکان شبیه‌سازی یکپارچه کل فرآیند آسیب اجزای محلی و فروپاشی کل سازه بتنی تحت آتش را فراهم می‌کند [۱۸]. هم‌چنین در مطالعه‌ای دیگر، رضائیان و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد لرزه‌ای سازه اسکله از نوع دلفین در معرض شرایط پس از آتش‌سوزی را بررسی کردند [۱۹]. اخیراً مطالعاتی مبنی بر بررسی رفتار سیستم دال تیرچه بتنی پیش‌تنیده در شرایط حریق، بررسی اثر بارگذاری آتش بر رفتار اتصالات با صفحه انتهایی پیچ و مهره تیر به ستون و اتصال T شکل، ارزیابی عددی اتصالات بتن مسلح تحت آتش‌سوزی پس از زلزله و هم‌چنین ارزیابی اثر تعداد، جنس و پیکربندی بولت‌ها بر اتصالات پیچ‌دار صلب تحت حریق صورت گرفته است [۲۰-۲۳]. با توجه به مطالب ذکر شده و اهمیت موضوع رفتار چرخه‌ای سازه‌های بتنی پس از آتش‌سوزی، تحقیقات کمی در حوزه مطالعه پارامتری<sup>۶</sup> روی رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی بعد از آتش صورت گرفته است. بنابراین برای سازه‌های بتنی قرار گرفته در معرض آتش‌سوزی و بار حرارتی، نه تنها تحقیق در مورد ظرفیت تحمل باقیمانده آن‌ها لازم است، بلکه مواردی که روی عملکرد چرخه‌ای پس از آتش‌سوزی تمرکز دارند، نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به این نکته در تحقیق حاضر رفتار مکانیکی و چرخه‌ای دیوار برشی بتنی بعد از آتش‌سوزی با استفاده از روش عددی اجزای محدود و نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجا که طبق مطالعات، مهمترین عامل در رفتار بتن در آتش‌سوزی زمان حرارت دهی می‌باشد، لذا این پارامتر به عنوان متغیر اصلی تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است. هم‌چنین با توجه به عوامل موثر در رفتار بتن در آتش‌سوزی، متغیرهای ضخامت دیوار برشی (پارامتر هندسی) و نوع سنگدانه (پارامتر فنی) در مطالعه پارامتری لحاظ شده‌اند.

## ۲- مدل‌سازی و صحت‌سنجی

هزینه زیاد مطالعات تجربی و هم‌چنین محدودیت در تعداد پارامترهای مورد مطالعه در هر آزمایش، استفاده از روش اجزاء محدود به عنوان یکی از روش‌های مهم عددی گسترش یافته است. در تحقیق حاضر نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS به منظور مدل‌سازی و بررسی رفتار دیوار برشی بتنی تحت آتش مورد استفاده قرار گرفته است. برای رسیدن به مدل نهایی و بررسی صحت مدل‌سازی عددی، نتایج با نتایج حاصل از کار گویرونک و همکاران (۲۰۱۰) [۱۲] مقایسه شد.

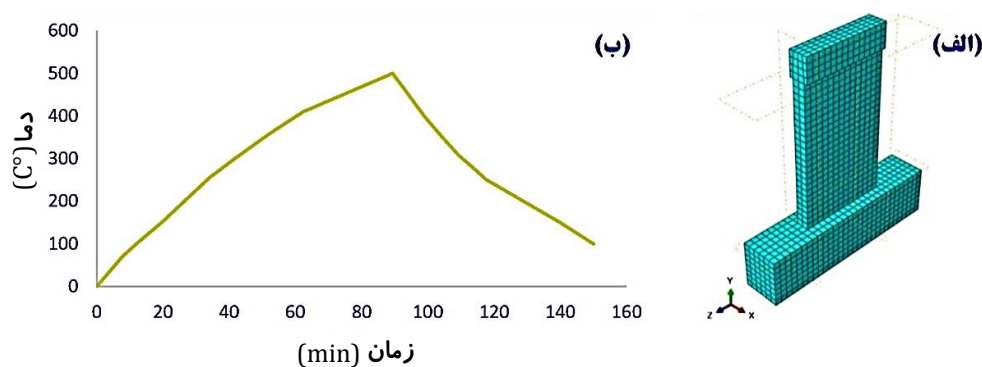
### ۲-۱- مدل‌سازی و ساخت هندسه مدل

در تحقیق حاضر دیوار بتنی از سه قسمت تشکیل شده است: قسمت زیرین که به صورت یک تیر برای اتصال دیوار به کف است؛ قسمت میانی دیوار برشی و قسمت بالایی به صورت یک تیر برای وارد کردن بار محوری است. برای رسم خاموت‌ها و میلگردها از مدل وایر استفاده شده است. برای تعریف مشخصات مصالح از مشخصات استاندارد یوروکد ۴ استفاده شده است [۲۴]. بر طبق این استاندارد در شرایط آتش، خصوصیات مصالح باید به صورت وابسته به دما در نظر گرفته شود. مونتاژ مدل با استفاده از ماژول<sup>۷</sup> اسمبلی انجام شد. کلیه برهم‌کنش‌های موجود بین اجزا از قبیل اندرکنش‌های تماسی، جوش، پین و اتصال در ماژول اینتراکشن تعریف و اعمال شدند. ماژول مش‌سازی دارای ابزاری است که امکان مش‌بندی اجزای ایجاد شده در قسمت‌های پارت و اسمبلی را فراهم می‌کند. در تحقیق حاضر از المان کوپل

<sup>6</sup> Parametric study

<sup>7</sup> Module

تغییر مکان - دما برای مصالح بتن استفاده شده است. طبق منابع موجود و راهنمای نرم‌افزار ABAQUS این المان دقیق‌ترین و تواناترین المان برای مدل‌سازی‌های حرارتی و مکانیکی است [۲۵]. این المان می‌تواند علاوه بر تحلیل‌های حرارتی، تحلیل‌های مکانیکی و جابجایی را به علت تغییرات درجه حرارت به عنوان عاملی دینامیکی مدل‌سازی کند. در هنگام استفاده از این المان، باید تمام نقاط و گره‌ها در مدل‌سازی به عنوان جسم صلب در نظر گرفته شود و باید دمای اولیه به عنوان دمای مرجع برای تمام نقاط تعریف گردد. پس از تعریف دمای مرجع برای تمامی نقاط، تغییرات درجه حرارت در گره‌ها نسبت به دمای مرجع تعریف شده و تحلیل‌های حرارتی - مکانیکی انجام می‌شود. در شکل ۱(الف) مش‌بندی مدل در نرم‌افزار ABAQUS نشان داده شده است. شایان ذکر است که سه نوع بار محوری، حرارتی و چرخه‌ای به مدل اعمال شده است. بار محوری فشاری ۴۰۰ کیلو نیوتن بر بالای دیوار اعمال می‌شود. بار حرارتی به صورت یک شرایط مرزی وارد می‌شود. در شکل ۱(ب)، نمودار دما-زمان استفاده شده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود به مدت ۹۰ دقیقه درجه حرارت به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و بعد از آن دما کاهش یافته و مرحله سردشدگی به مدت ۶۰ دقیقه ادامه یافته است. سطح بیرونی دیوار به طور یکنواخت در معرض منحنی آتش‌سوزی زمان-دمای نشان داده شده در شکل ۱(ب) به عنوان یک بار حرارتی در نظر گرفته شد. گرمای آتش به سطح بیرونی دیوار از طریق همرفت و تشعشع<sup>۹</sup> منتقل می‌شود و سپس از طریق رسانایی به داخل دیوار منتقل می‌شود [۲۶]. در مدل‌سازی عددی حاضر، ضریب انتشار برای سطح در معرض، مطابق با EN 1993-1-2 اتخاذ شد. ثابت Stefan-Boltzmann همان‌طور که در EN 1-1-2-1991 توصیه شده است، برابر  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2k^4$  تنظیم شد.



شکل ۱: (الف) مدل مش‌بندی شده و (ب) تعریف نمودار دما-زمان (دقیقه) در نرم‌افزار ABAQUS

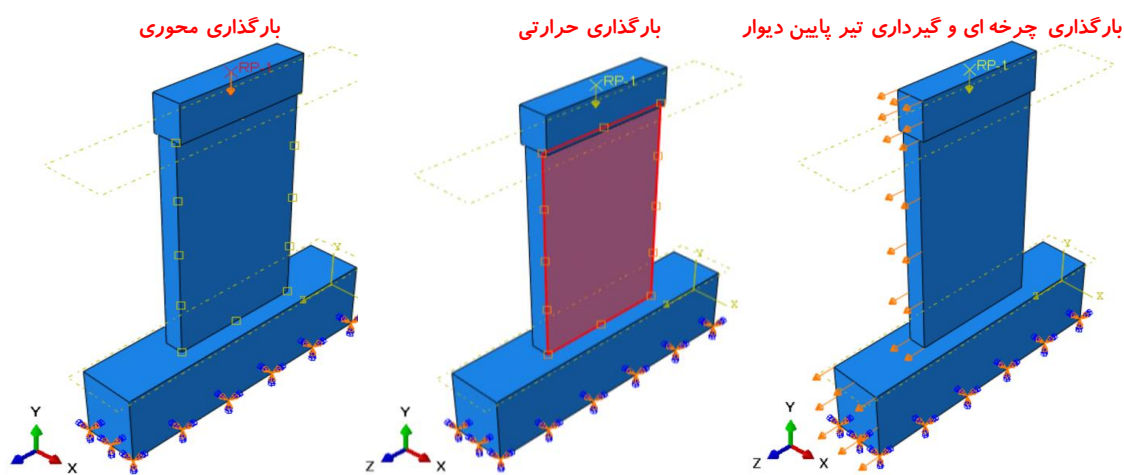
در مرحله سوم بارگذاری باید بارگذاری چرخه‌ای اعمال شود. بارگذاری چرخه‌ای در مدت یک دقیقه و برابر با ۸۵ درصد بارگذاری محوری در نظر گرفته می‌شود. بارگذاری چرخه‌ای به صورت تغییرات نیرو اعمال شده است. دیوار به صورت گیردار به زمین در نظر گرفته شده و به انتهای دیوار شرط مرزی اعمال شده است. به دلیل ایجاد حرکات هماهنگ در تمام سازه، بهتر است اعمال بار جانبی به تمامی اعضا صورت گیرد. در شکل ۲، نحوه بارگذاری و شرایط بارگذاری نشان داده شده است. از مهمترین عوامل تاثیرگذار در رفتار بتن در آتش‌سوزی می‌توان به زمان حرارت دهی، ضخامت دیوار برشی (پارامتر هندسی) و نوع سنگدانه (پارامتر فنی) اشاره نمود. در این راستا ۷ مدل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول ۱ مدل‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر معرفی شده‌اند. نامگذاری نمونه‌ها به این صورت است که حرف M معرف مدل، عدد بعد از M معرف مدت زمان بارگذاری و TH بیانگر ضخامت دیوار برشی بتنی و عدد آخر معرف نوع سنگدانه (مقاومت فشاری) بتن است. بارگذاری تمام نمونه‌ها همانند مدل مرجع در مقاله [۱۲] می‌باشد.

<sup>8</sup> Cyclic

<sup>9</sup> Convection and radiation

جدول ۱: معرفی مدل‌های مورد بررسی در تحقیق

مدل	مدت زمان بارگذاری حرارتی (min)	ضخامت دیوار برشی بتنی (mm)	سنگدانه (مقاومت فشاری بتن - MPa)
M0-TH150-48	۰	۱۵۰	۴۸
M90-TH150-48	۹۰	۱۵۰	۴۸
M150-TH150-48	۱۵۰	۱۵۰	۴۸
M90-TH150-40	۹۰	۱۵۰	۴۰
M90-TH150-32	۹۰	۱۵۰	۳۲
M90-TH180-48	۹۰	۱۸۰	۴۸
M90-TH220-48	۹۰	۲۲۰	۴۸



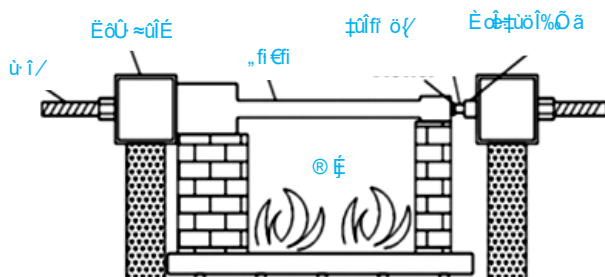
شکل ۲: تعریف بار چرخه‌ای و شرط مرزی گیرداری دیوار، بار حرارتی و بار محوری فشاری

## ۲-۲ صحت‌سنجی مدل المان محدود شبیه‌سازی شده

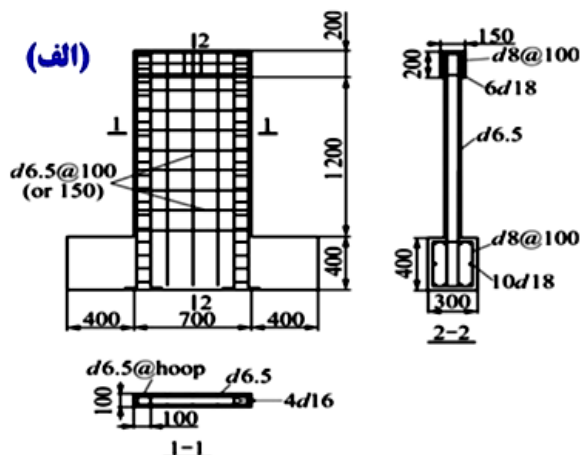
در تحقیق حاضر برای صحت‌سنجی و انتخاب مدل پایه از کار آزمایشگاهی تحقیق مرجع [۱۲] استفاده شده است. تمامی دیوارهای مورد استفاده دارای ابعاد یکسان بوده و در شکل ۳(الف) ابعاد نمونه مورد بررسی به همراه جزئیات آرماتورگذاری نشان داده شده است. نمونه‌های N0T9، N4T9 و N4T9-D با احتراق گاز مایع نفتی در معرض دماهای بالا قرار گرفته‌اند. این سه دیوار برشی در موقعیت افقی، در معرض آتش از یک طرف آزمایش شدند. مطابق شکل ۳(ب)، نمونه‌ها تحت یک بار محوری ثابت برابر با ۴۰۰ کیلونیوتن و آتش‌سوزی قرار گرفتند. هم‌چنین بارهای عمودی سرویس سقف یا طبقات بالاتر بر آن‌ها اعمال گردید. تمام نمونه‌ها تحت ترکیبی از بارهای جانبی ثابت محوری و چرخه‌ای قرار گرفتند. تاریخچه کامل بارگذاری جانبی برنامه آزمایشی شامل مراحل کنترل بارگذاری و کنترل جابجایی است. شرایط و پروتکل بارگذاری چرخه‌ای مطابق شکل ۴ است. برای صحت‌سنجی در تحقیق حاضر از نمونه N4T9 مقاله مرجع [۱۲] استفاده شده است و نتایج بدست آمده در نرم‌افزار با نتایج مقاله مرجع مقایسه شده است. بدین منظور، از معیار آماری میانگین خطای نسبی ( $RAE$ ) بر حسب درصد استفاده شده است که به صورت حاصل تقسیم "مجموع قدرمطلق اختلاف پارامترهای ثانویه با پارامترهای اولیه" بر "مجموع پارامترهای اولیه" در گام‌های زمانی مختلف معرفی می‌گردد. منحنی هیستریزیس<sup>۱۰</sup> برای مدل آزمایشگاهی و عددی در شکل ۵(الف) نشان داده شده است. با مقایسه منحنی‌ها مشاهده می‌شود که منحنی‌های مدل عددی و آزمایشگاهی از نظر تعداد و پر بودن تقریباً مشابه هستند. ضمن اینکه پارامتر  $RAE$  بیانگر حدود ۶ درصد اختلاف بین نتایج بدست آمده در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی است. این مطلب بیانگر توانایی قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی تحلیل‌های مکانیکی و چرخه‌ای است.

<sup>10</sup> Hysteresis curve

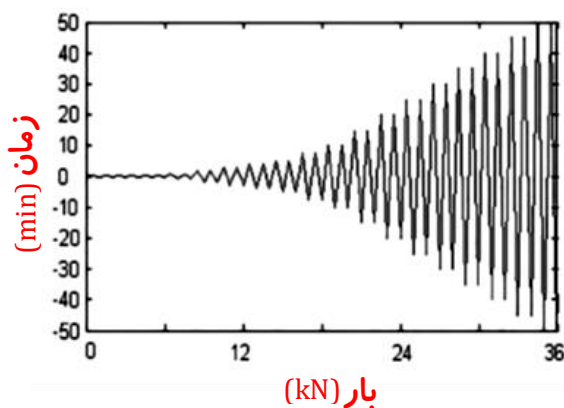
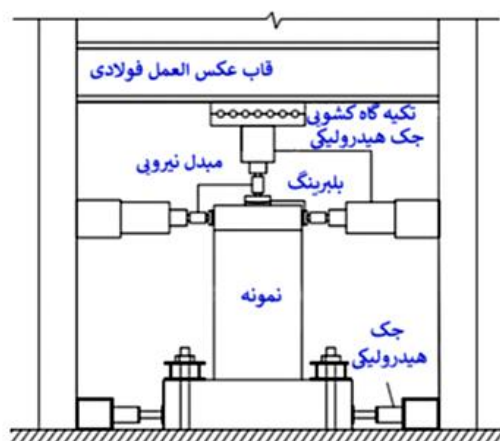
(ب)



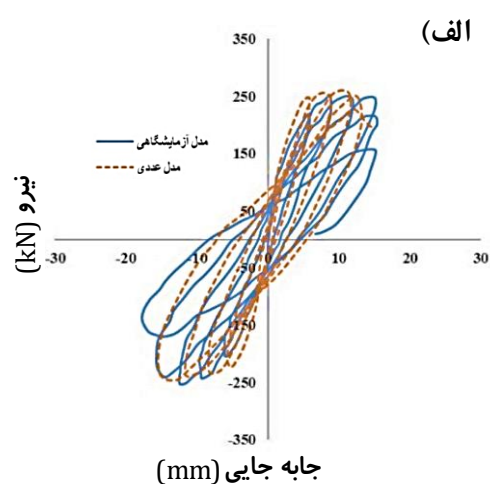
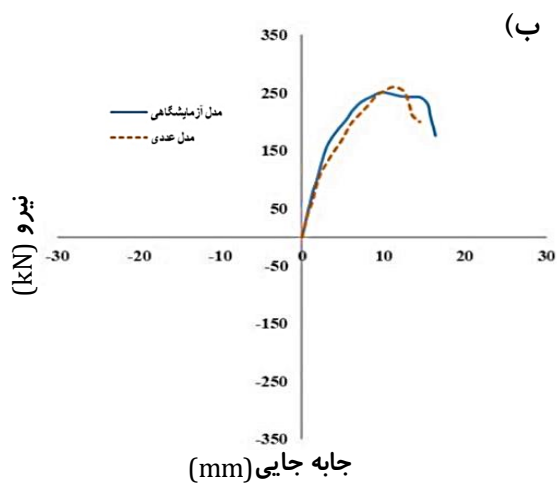
(الف)



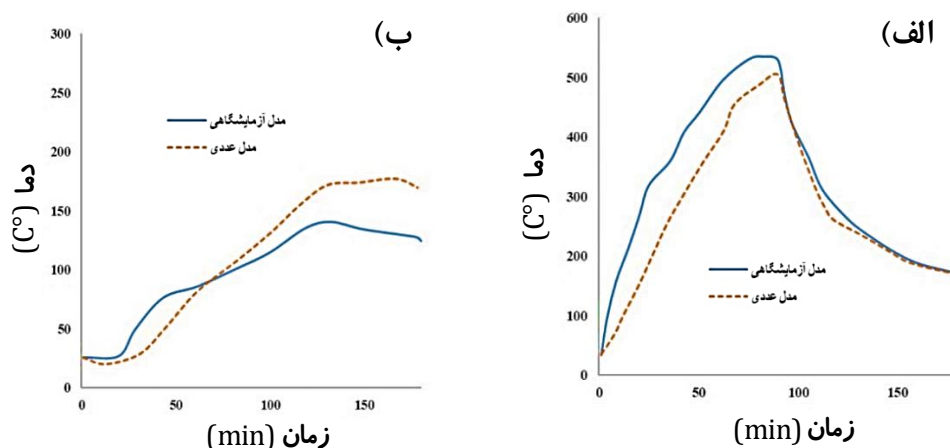
شکل ۳: الف) مدل صحت‌سنجی شده و ب) بارگذاری آتش مدل صحت‌سنجی شده [۱۲]



شکل ۴: بارگذاری چرخه‌ای مدل صحت‌سنجی شده در تحقیق حاضر [۱۲]



شکل ۵: الف) صحت‌سنجی منحنی هیستریزس و ب) منحنی بار - جاب‌جایی نمونه N4T9



شکل ۶: صحت سنجی منحنی دما - زمان (الف) در سطح در معرض آتش و (ب) در سطح بدون آتش نمونه N4T9

جدول ۲: صحت سنجی اتلاف انرژی نمونه N4T9

خطا	$\bar{E}_p$ مدل عددی	$\bar{E}_p$ مدل آزمایشگاهی
٪ ۸/۳	۲۰/۸	۱۹/۲

همان‌طور که در شکل ۵ (الف) مشاهده می‌شود، پاسخ‌های آزمایشگاهی مقداری نرم‌تر و دارای جابه‌جایی بیشتری نسبت به مدل عددی هستند. این اتفاق را می‌توان اینگونه بیان نمود که حل عددی با بدست آوردن جابه‌جایی‌ها، تنش‌ها را محاسبه می‌کند، لذا در طی این مراحل با عمل مشتق‌گیری می‌تواند موجب ایجاد خطا در محاسبات شود. صحت‌سنجی نمودار بار-جابه‌جایی در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده اختلاف مقدار جابه‌جایی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در تحقیق حاضر برابر ۷/۸ درصد بدست آمده است. منحنی‌های بار-جابه‌جایی مدل عددی و آزمایشگاهی عملاً روی هم قرار می‌گیرند و مدل عددی تنها در نشان دادن نقطه تسلیم با مدل آزمایشگاهی دچار اختلاف ناچیزی است. با استفاده از یک کد در نرم‌افزار MATLAB، اتلاف انرژی که برابر سطح کل زیرحلقه هیستریزس است، محاسبه شده و نتیجه بدست آمده در جدول ۲ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. صحت‌سنجی نمودار دما-زمان در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به شکل‌ها کاملاً مشخص است نرم‌افزار ABAQUS و مدل عددی استفاده شده می‌تواند شرایط واقعی آزمایشگاهی را مدل‌سازی کند. دمای ورودی در شکل ۱ (ب) آورده شده است. از دلایل خطا در نمونه صحت سنجی می‌توان به اختلاف اندک گرادیان حرارتی بین مدل آزمایش و مدل عددی، اختلاف خواص مکانیکی بتن در دمای بالا در مدل واقعی و عددی و هم‌چنین اختلاف مدل رفتاری بتن در دمای بالا در مدل واقعی و عددی اشاره نمود.

### ۳- ارائه نتایج تحقیق

#### ۳-۱- نتایج بارگذاری حرارتی

در تحقیق حاضر شش دیوار برشی با ضخامت، مقاومت و مدت زمان آتش‌سوزی متفاوت مورد بررسی حرارتی قرار گرفته‌اند. ابتدا نمونه‌ها تحت بارگذاری حرارتی به همراه یک بار محوری ۴۰۰ کیلونیوتنی قرار گرفته و تا درجه حرارت ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد از یک سمت دیوار حرارت می‌بینند و سپس زمان داده می‌شود تا دیوار سرد شود. نتایج تحقیق از سه دیدگاه تاثیر ضخامت دیوار برشی، مقاومت بتن و مدت زمان آتش‌سوزی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳-۱-۱- بررسی پارامتر مدت زمان آتش‌سوزی

حرارتی و تغییرات دمایی در زمان برای این مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. شار حرارتی به مقدار انرژی حرارتی منتقل شده در واحد زمان و بر واحد سطح گفته می‌شود. در شکل ۷ و جدول ۳ شار حرارتی برای مدل‌های قرار گرفته در معرض آتش به مدت ۹۰ و

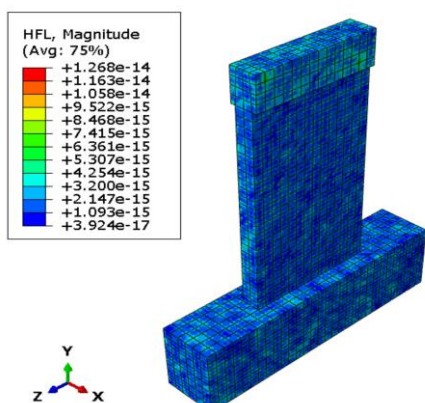


۱۵۰ دقیقه نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود افزایش مدت زمان بارگذاری میزان شار حرارتی در سطح دیوار بتنی را افزایش می‌دهد، زیرا انرژی حرارتی در مدت زمان بیشتری انتقال یافته است و این امر سبب افزایش شار حرارتی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که به دلیل افزایش مدت زمان بارگذاری حرارتی، انرژی حرارتی بیشتری به تیرهای بالا و پایین دیوار نیز منتقل شده است. پارامتر مهم دیگری که در بحث بارگذاری حرارتی باید مورد بررسی قرار گیرد، تغییرات دما نسبت به زمان در نمونه‌های مورد بررسی است. در شکل ۸(الف) نمودار دما-زمان بتن برای مدل‌های قرار گرفته تحت آتش به مدت ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه نشان داده شده است. تحلیل انتقال حرارت نشان می‌دهد که زمانی که فاز خنک‌کننده (بعد از ۹۰ دقیقه) شروع می‌شود، دمای بتن طرف در معرض آتش، افزایش می‌یابد.

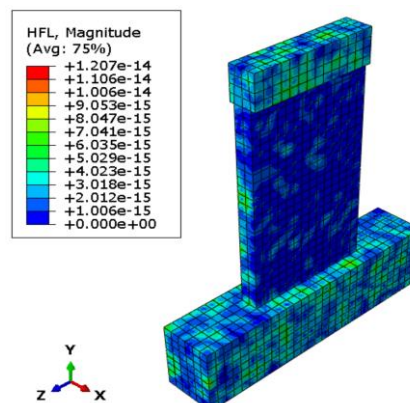
جدول ۳: مقایسه شار حرارتی با توجه به تغییر مدت زمان آتش‌سوزی

نمونه	ماکسیمم شار حرارتی در ماکسیمم بارگذاری حرارتی	ماکسیمم شار حرارتی در پایان سردشدگی
M90-TH150-48	$1/268 \times 10^{-14}$	$1/207 \times 10^{-14}$
M150-TH150-48	$1/637 \times 10^{-14}$	$1/069 \times 10^{-14}$

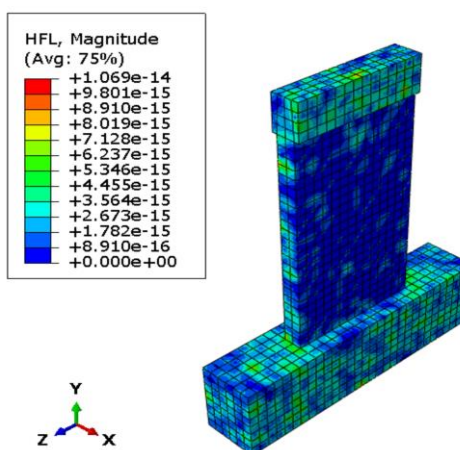
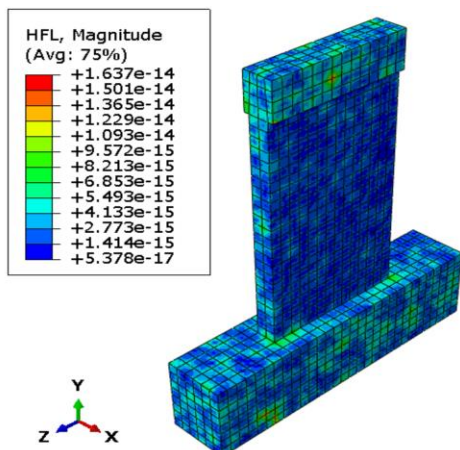
ماکسیمم دمای بارگذاری



پایان بارگذاری حرارتی



۹۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

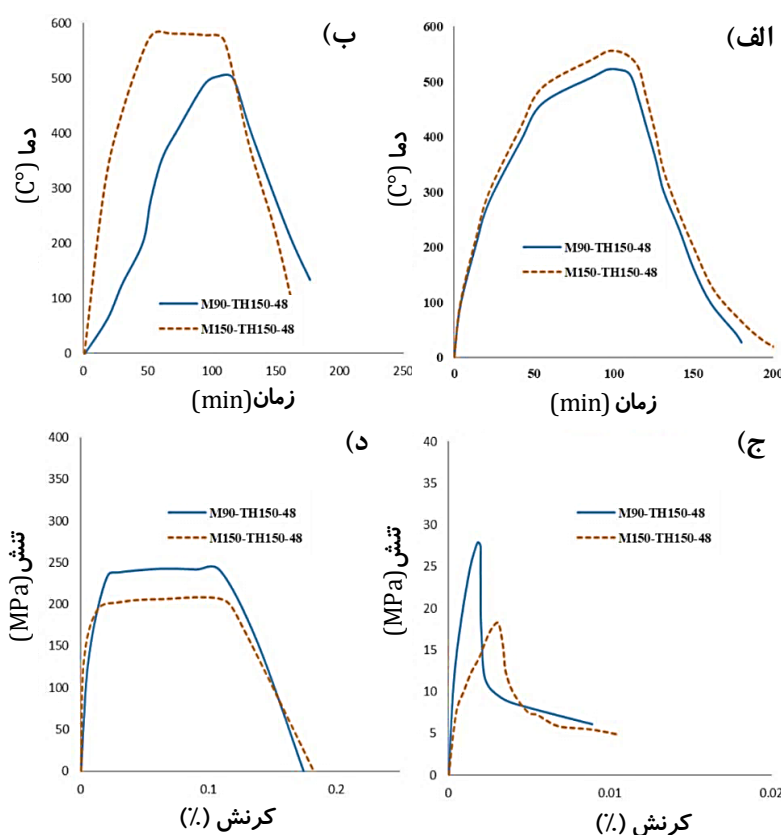


۱۵۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

شکل ۷: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش‌سوزی بر شار حرارتی

برای مثال دیوار تحت آتش ۹۰ دقیقه را در نظر بگیرید. دما زمانی که گرمایش متوقف می‌شود ۵۰۲ درجه سانتی‌گراد است. در حالی که حداکثر دمایی که این دیوار در طول کل چرخه گرمایش و سرمایش تجربه کرده است ۵۲۱ درجه سانتی‌گراد است که در شکل ۸(الف) نشان داده شده است. در دیوار زیر آتش ۱۵۰ دقیقه نیز، دما زمانی که گرمایش متوقف می‌شود ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد است. در حالی که حداکثر دمایی که این دیوار در طول کل چرخه گرمایش و سرمایش تجربه کرده است ۵۵۶ درجه سانتی‌گراد است. نحوه تغییرات منحنی

دما - زمان در هر دو نمونه یکسان است، ولی افزایش مدت زمان آتش سوزی سبب شده است که دیوار دمای بیشتری را تجربه کند. همچنین زمان بیشتری برای خنک شدن نسبت به نمونه تحت آتش ۹۰ دقیقه‌ای نیاز دارد. در شکل ۸(ب) نمودار دما - زمان فولاد برای مدل‌های قرار گرفته تحت آتش به مدت ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در مدت زمان آتش سوزی ۹۰ دقیقه‌ای، میلگردهای فولادی درجه حرارت کمتری را تجربه کرده و با افزایش مدت زمان آتش سوزی میلگردهای فولادی دمای بیشتری را دریافت می‌کنند. همچنین با افزایش مدت زمان آتش سوزی ملاحظه می‌شود که دمای کسب شده توسط میلگردهای فولادی از دمای ماکسیمم بارگذاری بیشتر بوده و این میلگردها بعد از پایان زمان گرمایش، مدتی در دمای ماکسیمم خود باقی مانده و سپس شروع به سرد شدن کرده‌اند. در میلگردهای فولادی ملاحظه می‌شود که شروع فاز سردشدگی به صورت شیب تندی است و نشان می‌دهد که میلگرد فولادی با سرعت بیشتری نسبت به بتن دمای ذخیره شده در خود را از دست می‌دهد و دمای آن‌ها کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۸(ج) و ۸(د) نمودار تنش - کرنش بتن و فولاد برای مدل‌های قرار گرفته در معرض آتش به مدت ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه نشان داده شده است. بر اساس شکل ۸(ج) با افزایش مدت زمان آتش سوزی، تنش تسلیم در دیوار برشی کاهش یافته است و نمونه حداکثر تنش ۱۸ MPa را تجربه کرده است. این مقدار در نمونه با مدت زمان آتش سوزی ۹۰ دقیقه برابر ۲۸ MPa است. همچنین مشاهده می‌شود که کرنش متناظر با تنش تسلیم در دیوار برشی بتنی با افزایش مدت زمان آتش سوزی، افزایش یافته است. کرنش نهایی در نمونه با مدت زمان آتش سوزی ۹۰ دقیقه برابر ۰/۰۰۹ و در نمونه با مدت زمان آتش سوزی ۱۵۰ دقیقه برابر ۰/۰۱ است. در شکل ۸(د) مشاهده می‌شود همانند نمودار تنش-کرنش بتن، در میلگردهای فولادی نیز میزان تنش تسلیم با افزایش مدت زمان آتش سوزی، کاهش یافته است. همچنین در ناحیه پلاستیک، با افزایش کرنش، تنش افزایش نمی‌یابد و این رفتار ادامه می‌یابد تا به کرنش گسیختگی برسد. بنابراین با افزایش مدت زمان آتش سوزی مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی فولاد کاهش می‌یابد ولی کرنش نهایی آن افزایش می‌یابد. قرار گرفتن بیشتر در معرض آتش باعث کاهش اتلاف انرژی و ظرفیت تغییرشکل می‌شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت می‌شود.



شکل ۸: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش سوزی بر: (الف) دما-زمان بتن؛ (ب) دما-زمان فولاد؛ (ج) تنش-کرنش بتن؛ (د) تنش-کرنش فولاد

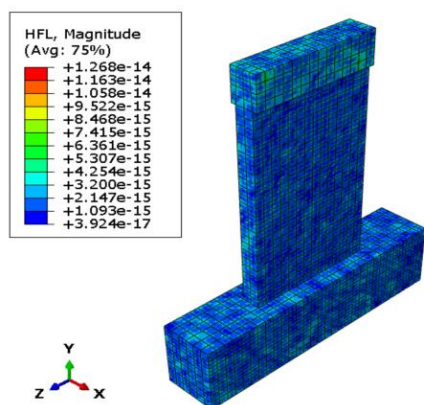
## ۳-۱-۲- بررسی پارامتر ضخامت دیوار برشی

برای بررسی ضخامت دیوار برشی، سه ضخامت ۱۵۰، ۱۸۰ و ۲۲۰ (mm) برای دیوار برشی بتنی در نظر گرفته شده است. نتایج شار حرارتی و تغییرات دمایی در زمان برای این مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۹ و جدول ۴ شار حرارتی برای مدل‌های با ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت دیوارهای برشی تغییر محسوسی در میزان شار حرارتی سطح بتن به وجود نیامده است و می‌توان گفت افزایش ضخامت دیوار برشی بتنی تاثیری بر میزان مقدار انرژی حرارتی منتقل شده در واحد زمان و بر واحد سطح دیوار ندارد. در شکل ۱۰ نمودار دما-زمان بتن برای مدل‌های قرار گرفته در معرض آتش با ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. نمودار دما-زمان در دو سطح در معرض آتش (محل اعمال آتش) و سطح بدون آتش (طرف دیگر دیوار) ترسیم شده است.

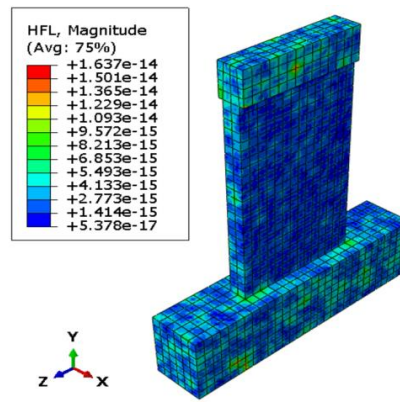
جدول ۴: مقایسه شار حرارتی با توجه به تغییر ضخامت دیوار برشی

نمونه	ماکسیمم شار حرارتی در ماکسیمم بارگذاری حرارتی	ماکسیمم شار حرارتی در پایان سردشدگی
M90-TH150-48	$1/268 \times 10^{-14}$	$1/207 \times 10^{-14}$
M90-TH180-48	$1/124 \times 10^{-14}$	$1/979 \times 10^{-14}$
M150-TH220-48	$1/122 \times 10^{-14}$	$1/400 \times 10^{-14}$

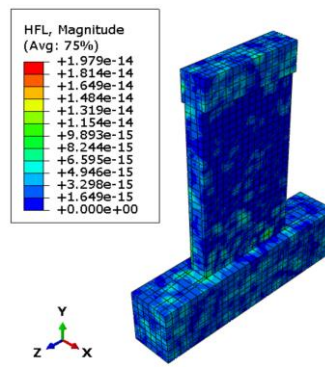
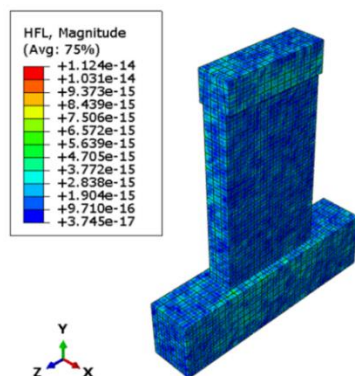
## ماکسیمم دمای بارگذاری



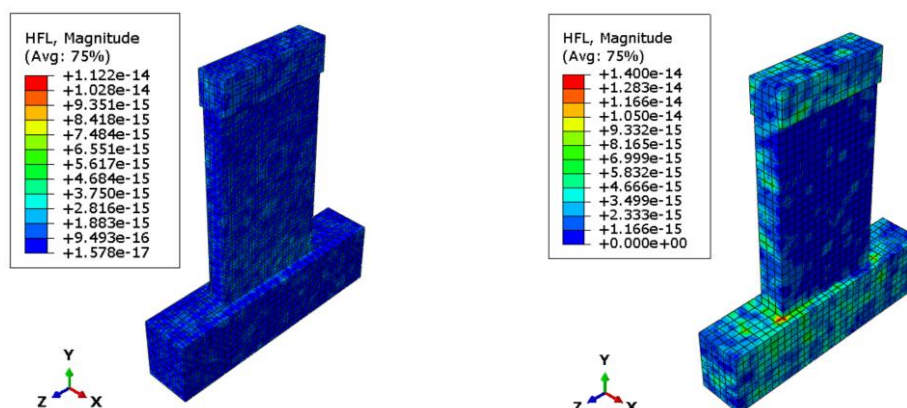
## پایان بارگذاری حرارتی



ضخامت ۱۵۰ mm

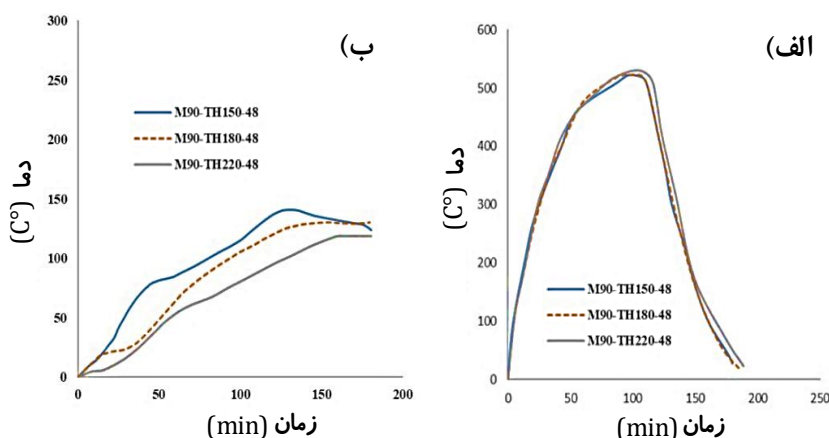


## ضخامت ۱۸۰ mm



## ضخامت ۲۲۰ mm

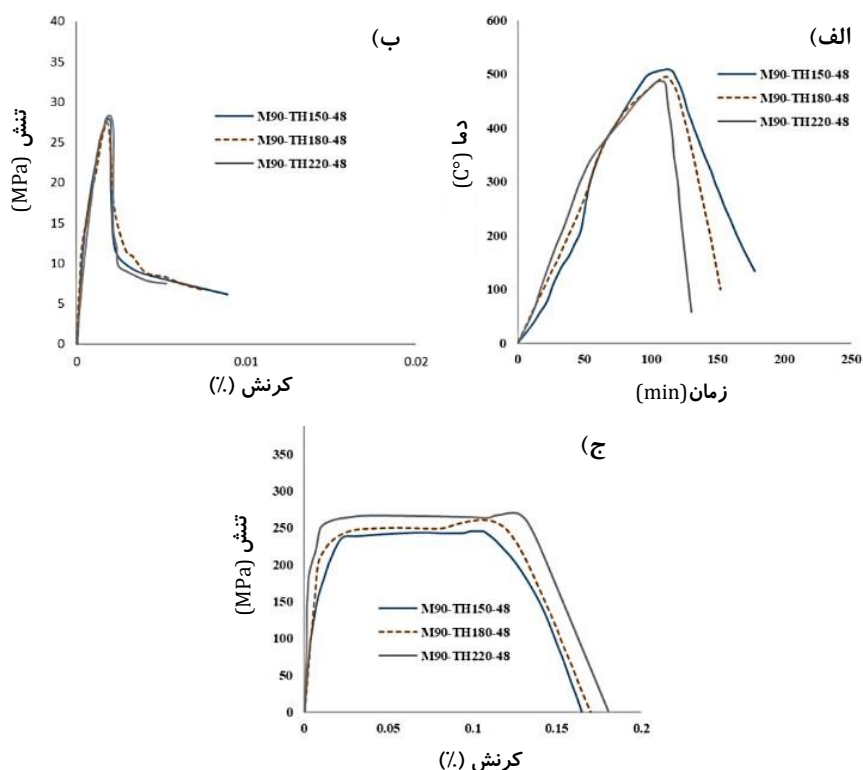
شکل ۹: تاثیر پارامتر ضخامت دیوار برشی بر شار حرارتی



شکل ۱۰: تاثیر پارامتر ضخامت دیوار برشی بر دما- زمان بتن: (الف) دیوار در معرض مستقیم آتش، (ب) طرف دیگر دیوار (بدون آتش)

افزایش ضخامت دیوار بر عملکرد دیوار برشی در سطح در معرض آتش تفاوتی ایجاد نمی‌کند؛ اما در سطح بدون آتش به دلیل اینکه افزایش ضخامت دیوار برشی سبب تاخیر در انتقال حرارت به این سطح می‌شود، ملاحظه می‌شود که در نمونه ۲۲۰ (mm) ماکسیمم دما برابر ۱۱۶ و در نمونه ۱۸۰ و ۱۵۰ (mm) به ترتیب ۱۲۹ و ۱۴۱ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین افزایش ضخامت به میزان ۳۰ (از ۱۵۰ به ۱۸۰) و ۴۰ (از ۱۸۰ به ۲۲۰) (mm) به ترتیب، دمای ماکسیمم در سطح بدون آتش را ۸/۵ و ۱۱ درصد کاهش می‌دهد. تحلیل انتقال حرارت نشان داد که زمانی که فاز خنک‌کننده (بعد از ۹۰ دقیقه) شروع می‌شود، دمای بتن سطح در معرض آتش افزایش می‌یابد. در سطح بدون آتش نیز این افزایش دما مشاهده می‌شود و نکته قابل توجه تغییرات کم دما در فاز سردشوندگی است، به طوری که بعد از پایان مرحله سردشوندگی، دما در هیچ یک از نمونه‌ها به کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نرسیده است. اما در سطح در معرض آتش دما بعد از پایان مرحله سردشوندگی بسیار کاهش می‌یابد. در شکل ۱۱ (الف) نمودار دما-زمان میلگردهای فولادی برای مدل‌ها با ضخامت دیوار برشی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت دیوار برشی چون پوشش بتنی روی آرماتور افزایش می‌یابد، در نتیجه میلگردها دمای کمتر یا دیرتری را دریافت می‌کنند. همچنین با افزایش ضخامت شیب ناحیه سردشوندگی تندتر می‌شود و نشان می‌دهد میلگردهای فولادی با سرعت بیشتری دمای کسب شده را از دست می‌دهند. در شکل‌های ۱۱ (ب) و ۱۱ (ج) نمودار تنش- کرنش بتن و فولاد برای مدل‌های با ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۱ (ب) با افزایش ضخامت دیوار برشی، نمودار تنش- برش دیوار برشی بتنی تغییرات زیادی نمی‌کند. تغییرات نمودار نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت دیوار بتنی، کرنش نهایی نمونه‌ها کاهش یافته است. در شکل

۱۱ (ج) مشاهده می‌شود میلگردهای فولادی قبل از رسیدن به تنش نهایی یک ناحیه سخت‌شوندگی را تحمل می‌کنند. با افزایش ضخامت دیوار برشی بتنی، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میلگردهای فولادی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: تاثیر پارامتر ضخامت دیوار برشی بر: الف) دما-زمان فولاد؛ ب) تنش- کرنش بتن؛ ج) تنش-کرنش فولاد

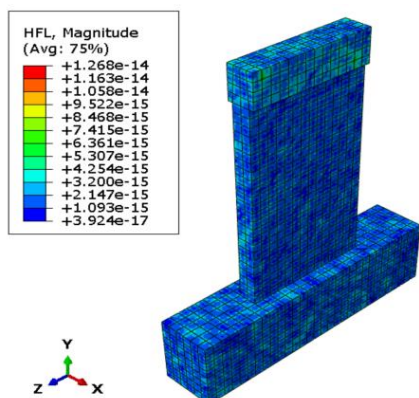
### ۳-۱-۳- بررسی پارامتر مقاومت فشاری بتن

بررسی پارامتر مقاومت فشاری بتن بر عملکرد دیوار برشی در بارگذاری حرارتی با در نظر گرفتن سه مقاومت ۳۲، ۴۰ و ۴۸ برسی شده است. در شکل ۱۲ و جدول ۵ شار حرارتی برای مدل‌های با مقاومت فشاری مختلف نشان داده شده است. بر اساس نتایج، با کاهش مقاومت فشاری بتن میزان شار حرارتی در دیوار برشی بتن افزایش می‌یابد. می‌توان گفت با کاهش مقاومت فشاری بتن، انرژی گرمایی بیشتری در سطح بتن پخش شده و در نتیجه شار حرارتی آن افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳ (الف) نمودار دما-زمان بتن برای مدل‌های با مقاومت فشاری مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش مقاومت فشاری بتن، نمونه‌ها زودتر به ماکسیمم دما رسیده و همچنین سریع‌تر وارد فاز سردشوندگی می‌شوند. در نمونه‌های با مقاومت فشاری مختلف نیز، دما پس از پایان مرحله گرمایش همچنان افزایش می‌یابد و بعد از گذشت مدتی شروع به کاهش می‌کند.

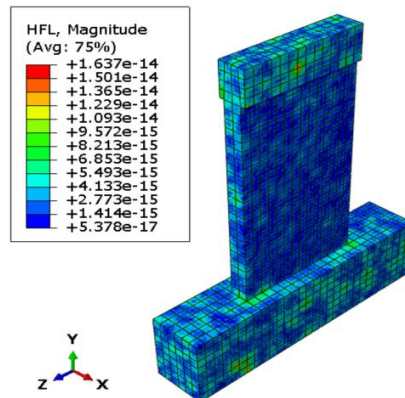
جدول ۵: مقایسه شار حرارتی با توجه به تغییر مقاومت فشاری بتن

نمونه	ماکسیمم شار حرارتی در ماکسیمم بارگذاری حرارتی	ماکسیمم شار حرارتی در پایان سردشدگی
M90-TH150-48	$1/268 \times 10^{-14}$	$1/207 \times 10^{-14}$
M90-TH150-40	$1/613 \times 10^{-14}$	$1/593 \times 10^{-14}$
M90-TH150-32	$1/711 \times 10^{-14}$	$1/232 \times 10^{-14}$

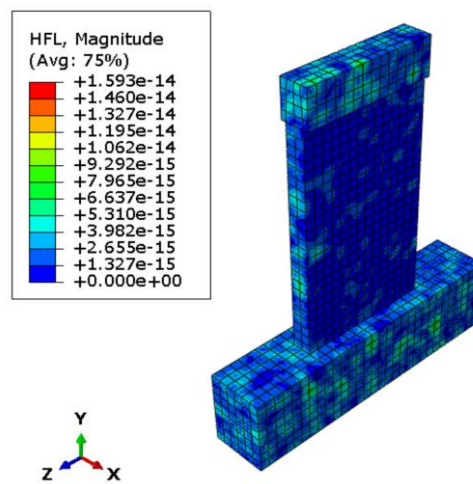
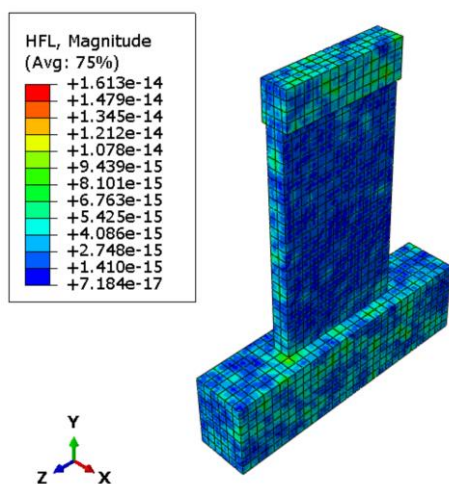
ماکسیمم دمای بارگذاری



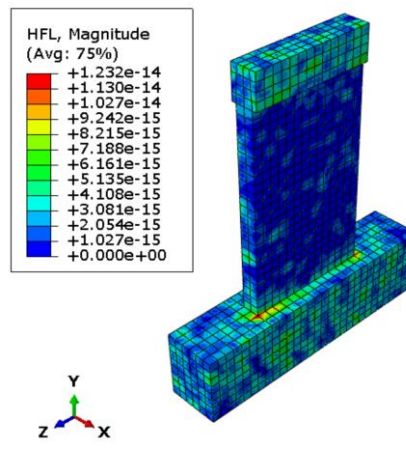
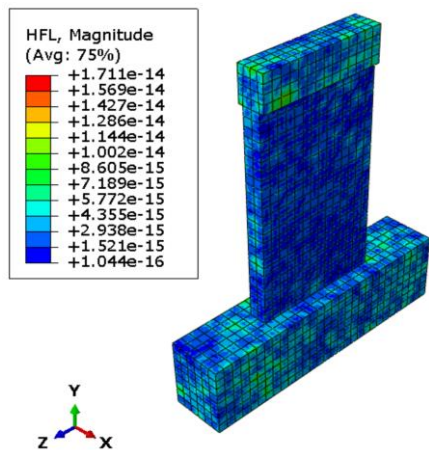
پایان بارگذاری حرارتی



مقاومت ۴۸ MPa



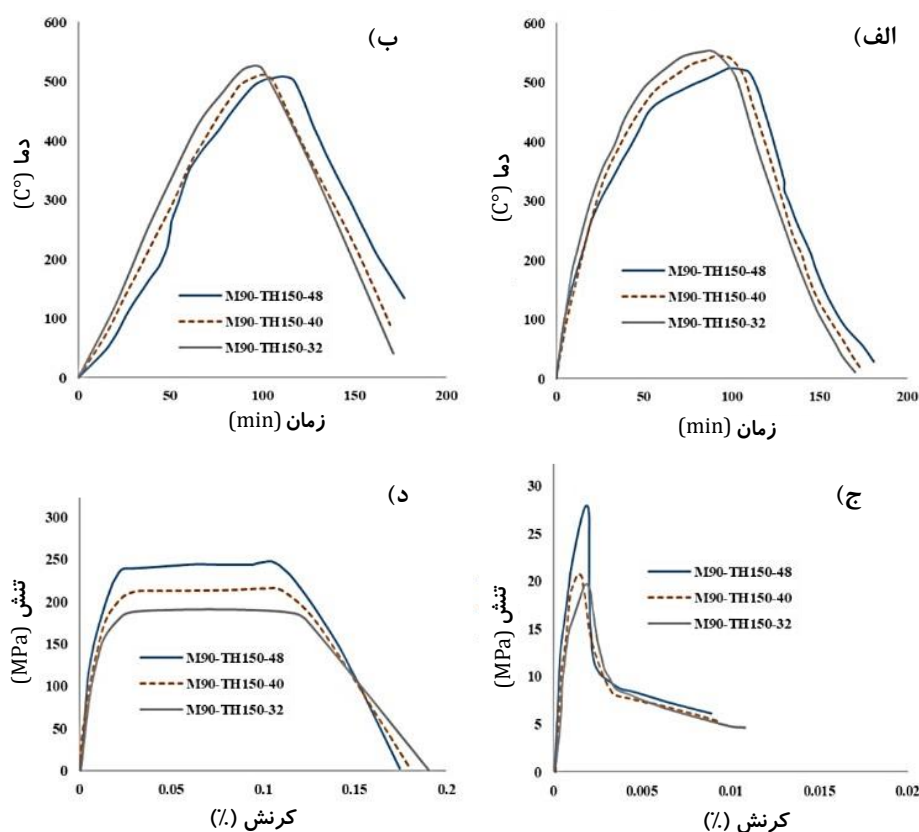
مقاومت ۴۰ MPa



مقاومت ۳۲ MPa

شکل ۱۲: تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن بر شار حرارتی

در شکل ۱۳ (ب) نمودار دما-زمان میلگردهای فولادی برای مدل‌ها با مقاومت فشاری مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش مقاومت فشاری بتن میلگردها دمای بیشتری را دریافت می‌کنند. همچنین میلگردهای فولادی زودتر به دمای ماکسیمم رسیده و زودتر وارد فاز سرشوندگی می‌شوند. در شکل ۱۳ (ج) نمودار تنش-کرنش بتن برای مدل‌های با مقاومت فشاری مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با کاهش مقاومت فشاری بتن، تنش تسلیم بتن کاهش پیدا کرده است. همچنین کرنش نهایی نیز افزایش پیدا کرده است. این موضوع با توجه به تاثیر همزمان کاهش مقاومت فشاری و افزایش دما در بتن قابل پیش‌بینی است و میزان کاهش تنش با توجه به تاثیر دما باید بیشتر از حالت بدون وجود حرارت باشد. در نمودار ۱۳ (د) نمودار تنش-کرنش میلگردهای فولادی برای مدل‌های با مقاومت فشاری مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در میلگردهای فولادی میزان مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی با کاهش مقاومت فشاری بتن، کاهش و میزان کرنش نهایی آن‌ها، افزایش یافته است. بر اساس نتایج، کرنش گسیختگی میلگردهای فولادی نیز با کاهش مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است. با توجه به اینکه مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است و بتن دمای بیشتری را تجربه می‌کند، در نتیجه دمای میلگردهای فولادی افزایش و به تبع آن نمودار تنش-کرنش آن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳: تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن بر: (الف) دما-زمان بتن؛ (ب) دما-زمان فولاد؛ (ج) تنش-کرنش بتن؛ (د) تنش-کرنش فولاد

### ۲-۳- رفتار چرخه‌ای دیوار برشی پس از آتش

بعد از بارگذاری حرارتی و سرد شدن، نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند. در این قسمت به بررسی نتایج بدست آمده از تحلیل چرخه‌ای دیوارهای برشی سرد شده بعد از آتش پرداخته می‌شود.

### ۳-۲-۱- بررسی پارامتر مدت زمان آتش‌سوزی

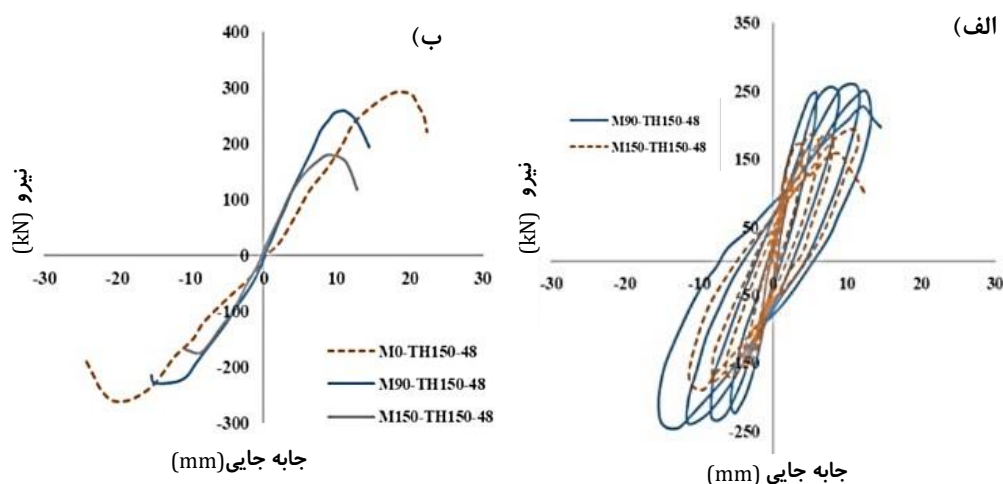
در شکل ۱۴ (الف) نمودار هیستریزس نمونه‌های با مدت زمان آتش‌سوزی متفاوت که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند، آورده شده است. مشاهده می‌شود که حلقه‌های هیستریزس نمونه‌هایی که مدت بیشتری در معرض آتش قرار گرفته‌اند باریک‌تر و تعداد

آن‌ها کمتر هستند. این بدان معناست که قرار گرفتن بیشتر در معرض آتش باعث کاهش اتلاف انرژی و ظرفیت تغییر شکل می‌شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت چرخه‌ای می‌شود.

در شکل ۱۴ (ب) نمودار بار-جابه‌جایی مدل‌های مورد بررسی تحت پارامتر تغییر مدت زمان آتش‌سوزی در تحلیل چرخه‌ای نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هرچه دیوار بتنی بیشتر در معرض حرارت قرار می‌گیرد، از شکل‌پذیری و ظرفیت باربری آن کاسته می‌شود.

جدول (۶): پارامترهای مورد بررسی بارگذاری چرخه‌ای با توجه به تغییر مدت زمان آتش‌سوزی

نمونه	ماکسیمم تنش فون میسز دیوار بتنی (kPa)	مینیمم تنش فون میسز دیوار بتنی (kPa)	ماکسیمم تنش فون میسز آرماتور (kPa)	مینیمم تنش فون میسز آرماتور (kPa)	ماکسیمم جابه‌جایی (mm)
M0-TH150-48	۱۳۹۶	۸/۶۱۲	۳۷/۰۸	۰/۰۹۲۵	۲۷/۵۶
M90-TH150-48	۱۸۰۷	۶/۷۹۰	۳۷/۰۷	۰/۱۰۲۹	۴۱/۴۵
M150-TH150-48	۲۵۲۳	۶/۴۸۵	۳۷/۰۷	۰/۱۵۷۹	۴۹/۶۳

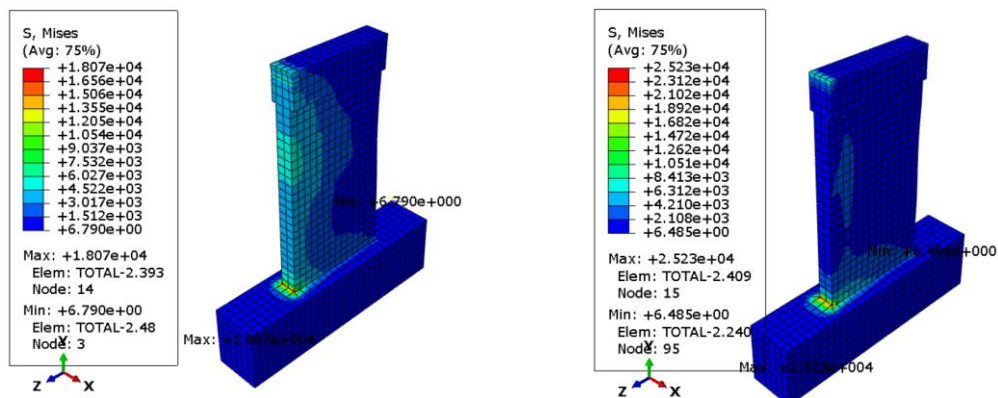


شکل ۱۴: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش‌سوزی بر الف) نمودار هیستریزس و ب) بر نمودار بار-جابه‌جایی

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ کانتور تنش فون میسز در دیوار برشی بتنی و میلگردهای طولی و خاموت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بارگذاری چرخه‌ای بعد از آتش‌سوزی (جدول ۶) با افزایش میزان مدت زمان آتش‌سوزی، تنش ماکسیمم و مینیمم در دیوار برشی بتنی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تنش در آرماتورها به حداکثر میزان خود رسیده است.

در شکل ۱۷ کانتور جابه‌جایی در دیوار برشی بتنی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نمونه‌ای که ۱۵۰ دقیقه در معرض آتش بوده است، میزان جابه‌جایی ایجاد شده در نمونه تحت اثر بار چرخه‌ای افزایش یافته است، بطوریکه ماکسیمم جابه‌جایی در سطح بالایی دیوار اتفاق افتاده و همچنین بیشتر سطح دیوار، ماکسیمم جابه‌جایی را تجربه کرده است.

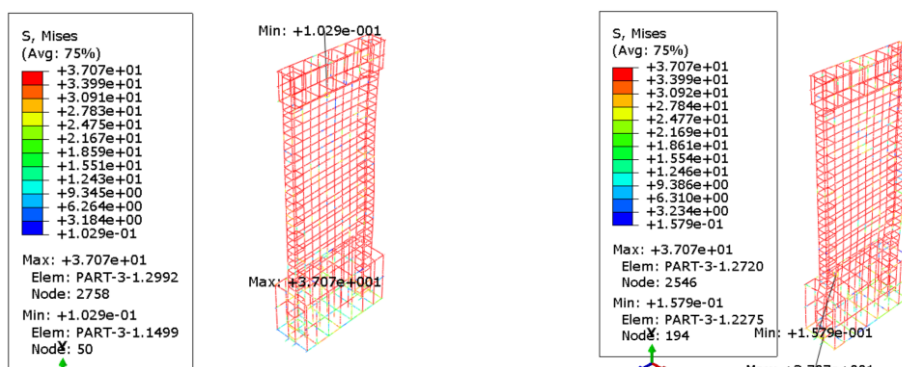




۹۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

۱۵۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

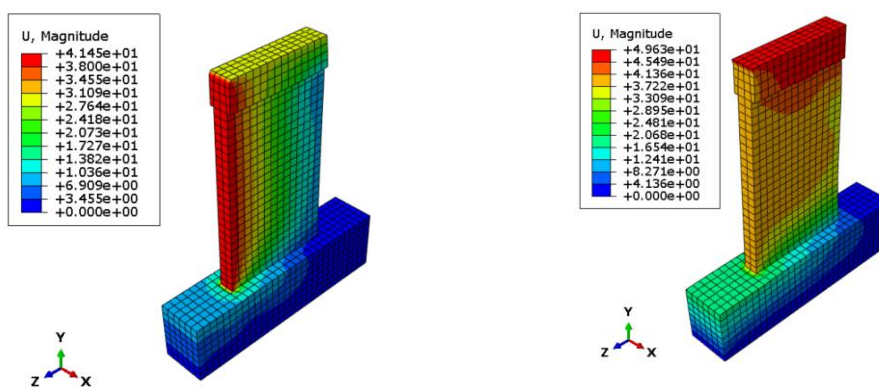
شکل ۱۵: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش سوزی بر تنش فون میسز دیوار



۹۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

۱۵۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

شکل ۱۶: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش سوزی بر تنش فون میسز آرماتورها



۹۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

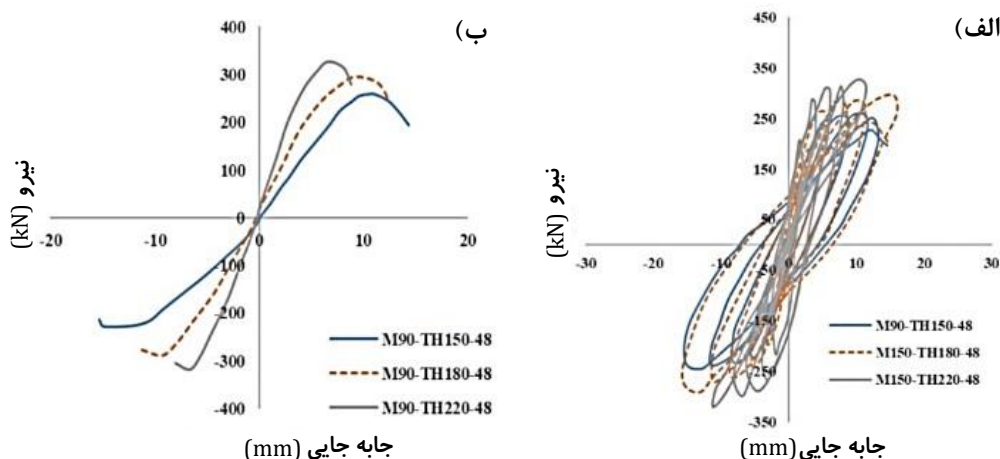
۱۵۰ دقیقه بارگذاری حرارتی

شکل ۱۷: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش سوزی بر جابه جایی

### ۳-۲-۲- بررسی پارامتر ضخامت دیوار برشی

در شکل ۱۸ (الف) نمودار هیستریزیس نمونه‌های با ضخامت دیوار برشی متفاوت که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته‌اند، آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت دیوار برشی حلقه‌های هیستریزیس نمونه‌ها باریکتر می‌شوند. این بدان معناست که افزایش

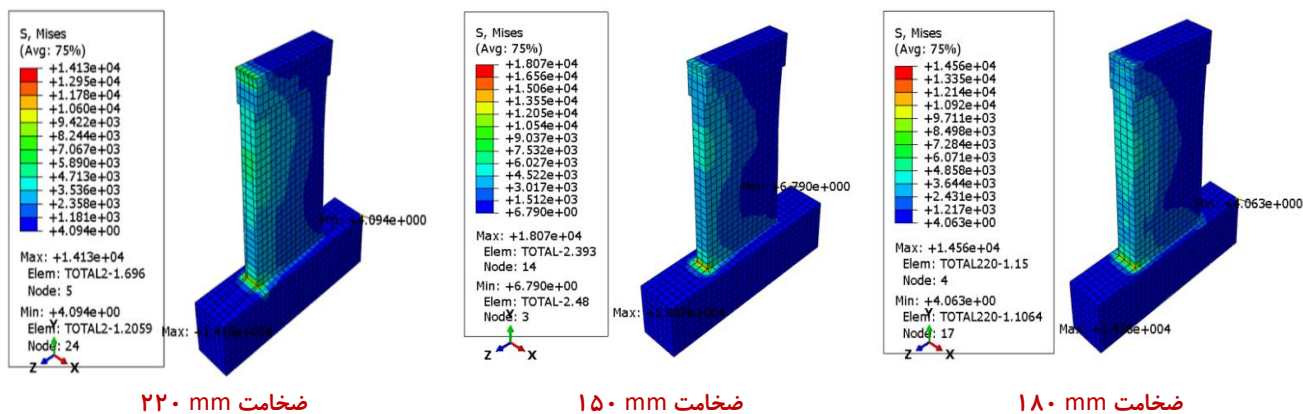
ضخامت دیوار بتنی باعث افزایش مقاومت چرخه‌ای و کاهش شکل‌پذیری می‌شود. در شکل ۱۸ (ب) نمودار بار-جابه‌جایی مدل‌های مورد بررسی در پارامتر ضخامت دیوار برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هرچه ضخامت دیوار برشی افزایش یافته است، شکل‌پذیری نمونه‌ها کاهش یافته است.



شکل ۱۸: تاثیر پارامتر ضخامت دیوار برشی بر الف) نمودار هیستریزس و ب) بر نمودار بار-جابه‌جایی

جدول ۷: پارامترهای مورد بررسی بارگذاری چرخه‌ای با توجه به تغییر ضخامت دیوار برشی

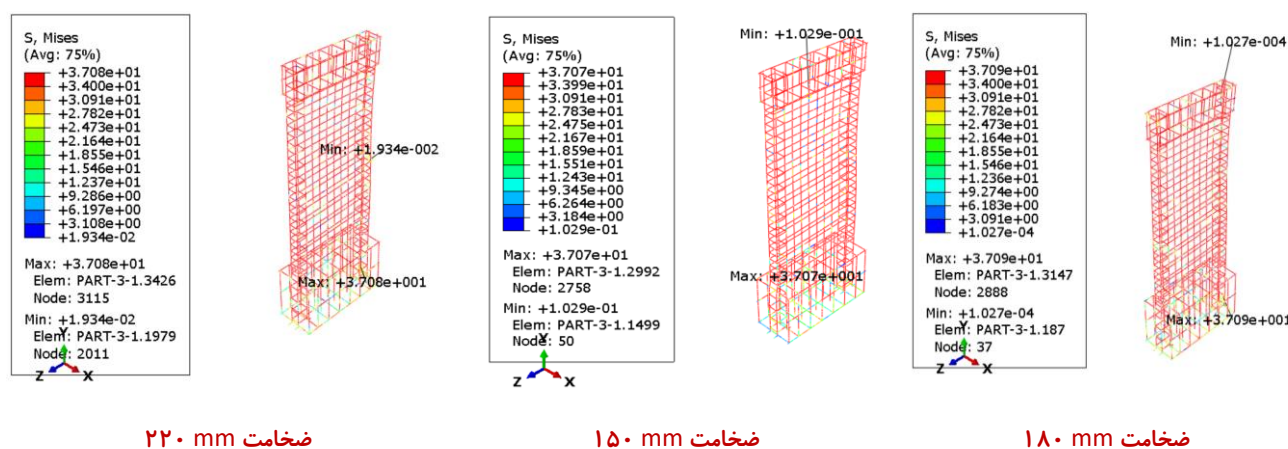
نمونه	ماکسیمم تنش فون میسز دیوار بتنی (kPa)	مینیمم تنش فون میسز دیوار بتنی (kPa)	ماکسیمم تنش فون میسز آرماتور (kPa)	مینیمم تنش فون میسز آرماتور (kPa)	جابه‌جایی (mm)
M90-TH150-48	۱۸۰۷	۶/۷۹	۳۷/۰۷	۰/۱۰۲۹	۴۱/۴۵
M90-TH180-48	۱۴۵۶	۴/۰۶۳	۳۷/۰۹	۰/۰۰۱	۳۴/۴۶
M150-TH220-48	۱۴۱۳	۲/۷۶۱	۳۹/۰۸	۰/۰۰۱۹	۲۱/۲۲



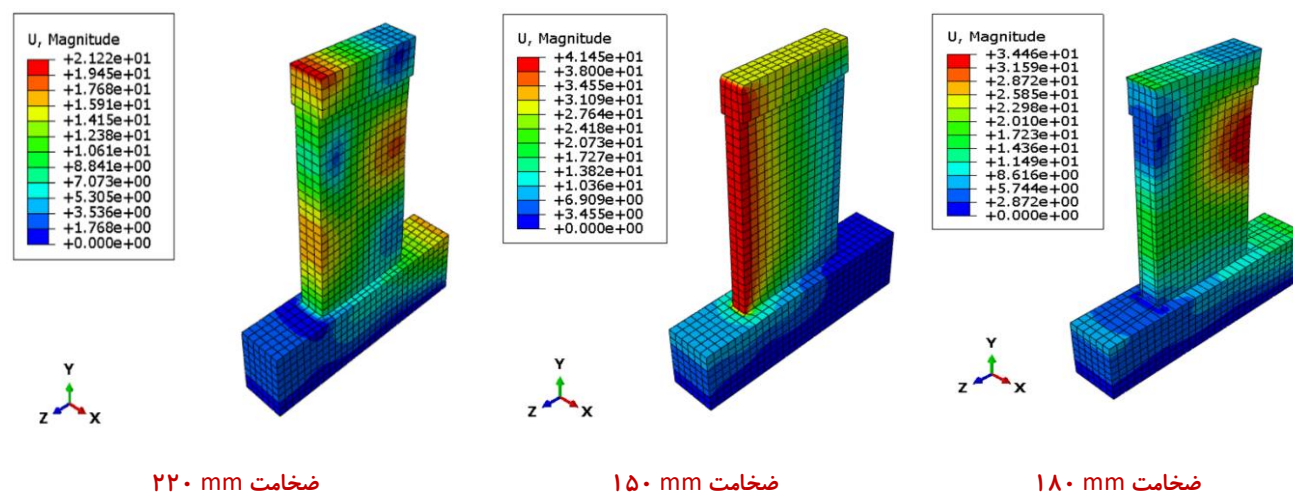
شکل ۱۹: تاثیر پارامتر ضخامت دیوار برشی بر تنش فون میسز دیوار

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ کانتور تنش فون میسز در دیوار برشی بتنی، میلگردهای طولی و خاموت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بارگذاری چرخه‌ای بعد از آتش‌سوزی (جدول ۷) با افزایش ضخامت دیوار برشی، تنش ماکسیمم و مینیمم در دیوار برشی بتنی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که تنش در آرماتورها به حداکثر میزان خود رسیده است. میزان جابه‌جایی نیز با افزایش

ضخامت دیوار برشی، کاهش می‌یابد. در شکل ۲۱ کانتور جابه‌جایی در دیوار برشی بتنی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت دیوار برشی بتنی، میزان جابه‌جایی ایجاد شده در نمونه تحت اثر بار چرخه‌ای کاهش یافته است.



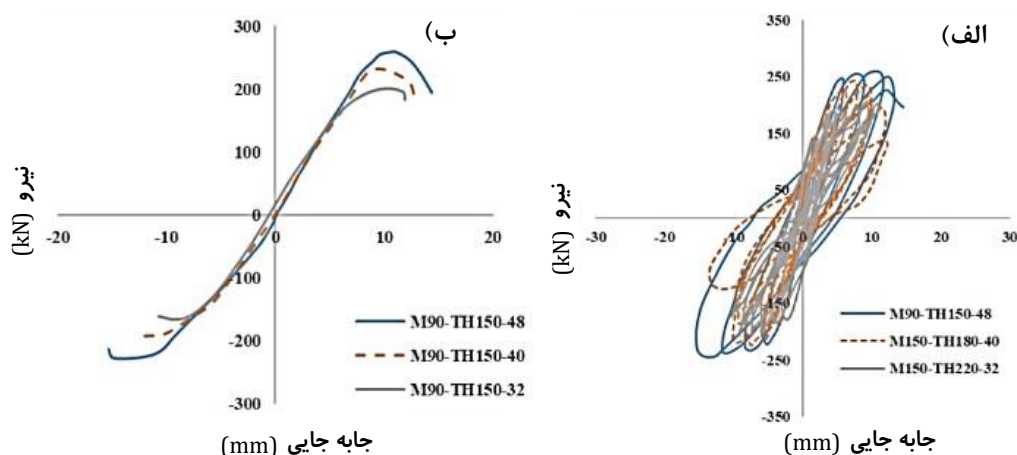
شکل ۲۰: تاثیر پارامتر ضخامت دیوار برشی بر تنش فون میسز آرماتورها



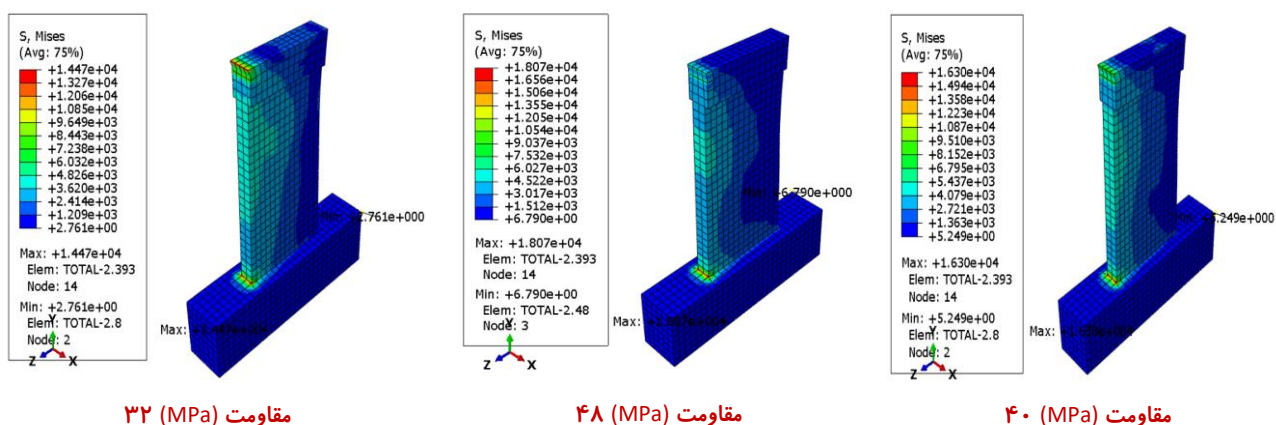
شکل ۲۱: تاثیر پارامتر مدت زمان آتش‌سوزی بر جابه‌جایی

### ۳-۲-۳- بررسی پارامتر مقاومت فشاری بتن

در شکل ۲۲ (الف) نمودار هیستریزس نمونه‌های با مقاومت فشاری بتن متفاوت که تحت بارگذاری چرخه‌ای آورده شده است. مشاهده می‌شود که حلقه‌های هیستریزس با کاهش مقاومت بتن، باریک‌تر شده و از تعداد آن‌ها کاسته می‌شود. در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن باعث کاهش اتلاف انرژی و ظرفیت تغییرشکل می‌شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت چرخه‌ای می‌شود. در شکل ۲۲ (ب) نمودار بار-جابه‌جایی مدل‌های مورد بررسی با پارامتر تغییر مقاومت فشاری بتن تحت تحلیل چرخه‌ای نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری در نحوه رفتار بتن در بارگذاری چرخه‌ای بعد از آتش‌سوزی تاثیر چندانی ندارد و شکل نمودار هر سه نمونه تقریباً یکسان می‌باشد. اما در شکل‌پذیری آن موثر می‌باشد به طوری که با کاهش مقاومت فشاری بتن، شکل‌پذیری در بارگذاری چرخه‌ای کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ کانتور تنش فون میسز در دیوار برشی بتنی و میلگردهای طولی و خاموت‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲۲: تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن بر الف) نمودار هیستریزیس و ب) بر نمودار بار-جابجایی

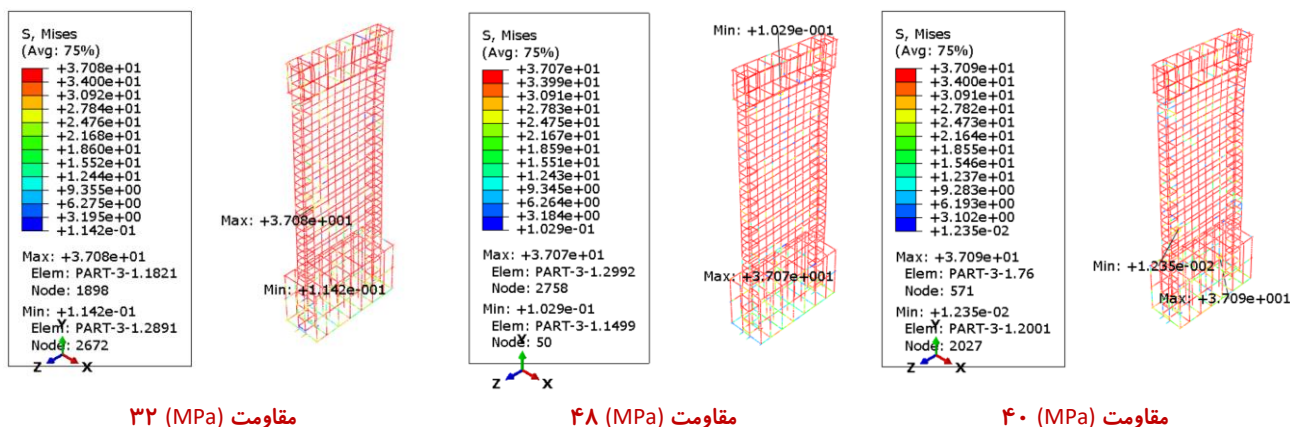


شکل ۲۳: تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن بر تنش فون میسز دیوار

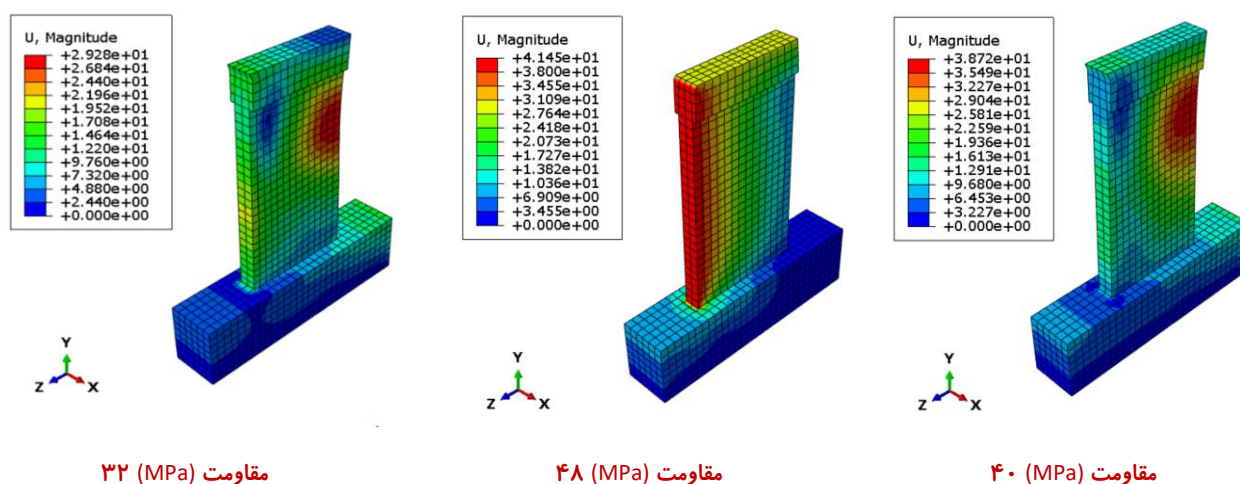
همان طور که ملاحظه می شود در بارگذاری چرخه ای بعد از آتش سوزی (جدول ۸) با کاهش مقاومت فشاری بتن، تنش ماکسیمم و مینیمم در دیوار برشی بتنی کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که تنش در آرماتورها به حداکثر میزان خود رسیده است. میزان جابه جایی نیز با کاهش مقاومت فشاری بتن، کاهش می یابد. در شکل ۲۵ کانتور جابه جایی در دیوار برشی بتنی نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش مقاومت فشاری بتن، جابه جایی دیوار برشی بتنی کاهش یافته است.

جدول ۸: پارامترهای مورد بررسی بارگذاری چرخه ای با توجه به تغییر مقاومت فشاری بتن

نمونه	فون میسز دیوار بتنی (kPa)	مینیمم تنش فون میسز دیوار بتنی (kPa)	ماکسیمم تنش فون میسز آرماتور (kPa)	مینیمم تنش فون میسز آرماتور (kPa)	ماکسیمم تنش جابه جایی (mm)
M90-TH150-48	۱۸۰۷	۶/۷۹۰	۳۷/۰۷	۰/۱۰۲۹	۴۱/۴۵
M90-TH150-40	۱۶۳۰	۵/۲۴۹	۳۷/۰۹	۰/۰۱۲	۳۸/۷۲
M90-TH150-32	۱۴۴۷	۲/۷۶۱	۳۷/۰۸	۰/۱۱۴۲	۲۹/۲۸



شکل ۲۴: تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن بر تنش فون میسز آرماتورها



شکل ۲۵: تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن بر جابه جایی

#### ۴- نتیجه گیری

هدف از مقاله حاضر بررسی پارامتری رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتنی پس از قرار گرفتن در معرض آتش با تحلیل تغییر در خصوصیات ماده، پارامترهای دیوار و بارگذاری است. در این راستا، مدل‌های مورد بررسی تحت تاثیر بارگذاری چرخه‌ای و حرارتی قرار می‌گیرند. مرحله اول مدل تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌بیند و بعد از آن زمان داده می‌شود تا سازه خنک شود و در انتها بارگذاری چرخه‌ای به دیوار برشی وارد می‌شود. هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی رفتار دیوار برشی بتنی در حین آتش‌سوزی و بارگذاری چرخه‌ای بعد از آتش‌سوزی می‌باشد. خلاصه نتایج اخذ شده از بررسی پارامتری رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتنی پس از قرار گرفتن در معرض آتش به شرح زیر است:

- ۱) با افزایش مدت زمان آتش‌سوزی، تنش تسلیم و کرنش متناظر آن در دیوار بتنی به ترتیب ۳۵/۷٪ کاهش و ۶۳٪ افزایش یافته است. این تغییرات برای کرنش نهایی برابر ۱۷/۱۷٪ افزایش است.
- ۲) افزایش مدت زمان آتش‌سوزی، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میلگردهای فولادی را به ترتیب ۱۷٪ و ۱۵٪ کاهش می‌دهد. کرنش تسلیم، کرنش گسیختگی و کرنش نهایی نیز به ترتیب ۳۲/۵٪، ۵/۰۵٪ و ۵/۴٪ افزایش یافته است.

- ۳) قرار گرفتن بیشتر در معرض آتش باعث کاهش اتلاف انرژی و ظرفیت تغییر شکل می شود و در نتیجه باعث کاهش ظرفیت مقاومت چرخه ای در دیوار بتنی می شود.
- ۴) افزایش ضخامت دیوار برشی بتنی تاثیری بر میزان مقدار انرژی حرارتی منتقل شده در واحد زمان و بر واحد سطح دیوار بتنی ندارد.
- ۵) افزایش ضخامت دیوار بتنی باعث افزایش مقاومت چرخه ای و کاهش شکل پذیری می شود.
- ۶) برای کاهش مقاومت فشاری بتن از ۴۸ به ۴۰ (MPa)، تنش تسلیم و کرنش متناظر آن در دیوار بتنی به ترتیب ۲۵/۷٪ کاهش و ۸/۴٪ افزایش یافته است. این تغییرات برای کاهش مقاومت فشاری بتن از ۴۰ به ۳۲ (MPa) به ترتیب برابر ۵٪ کاهش تنش تسلیم و ۱۰٪ افزایش کرنش تسلیم است.
- ۷) کاهش مقاومت فشاری بتن از ۴۰ به ۳۲ (MPa)، مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میلگردهای فولادی را به ترتیب ۱۰٪ و ۱۳/۶٪ کاهش می دهد. کرنش تسلیم، کرنش گسیختگی و کرنش نهایی نیز به ترتیب ۱۰٪، ۵/۵٪ و ۳/۵٪ افزایش یافته است.
- ۸) کاهش مقاومت فشاری بتن باعث کاهش اتلاف انرژی و ظرفیت تغییر شکل می شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت چرخه ای می شود.

## ۵- پیشنهادهایی برای تحقیق های آینده

- ۱) بررسی نقش پلیمرها در افزایش ظرفیت باربری حرارتی دیوار برشی بتنی
- ۲) بررسی نقش آرماتورهای پلیمری در افزایش ظرفیت باربری حرارتی دیوار برشی بتنی
- ۳) بررسی عملکرد دیوار برشی بتن با سنگدانه های سبک یا بازیافتی در برابر آتش سوزی

## مراجع

- [1] Chi, J.H., Tang, J.R., Go, C.G & Huang, Y.L. (2013). Research on seismic resistance and mechanic behavior of reinforced lightweight aggregate concrete walls after high temperature. *Fire and Materials*, 38(8), 789-805.
- [2] Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z & Lin, L. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature. *Construction and Building Materials*, 93, 371-383.
- [3] Yahyai, M., Rezaeian, A., Safaeian, M. (2017). Response of steel box columns in fire conditions. *Journal of structural and construction engineering*, 14(1), 101-112 (In Persian).
- [4] Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M & Wong, Y.L. (2001). Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1307-1318.
- [5] Kowalski, R., Wroblewska, J. (2020). Assessing concrete strength in fire-damaged structures. *Construction and Building Materials*, 254, 119122.
- [6] Kowalski, R. (2010). Mechanical properties of concrete subjected to high temperature. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 3(2), 61-70.
- [7] Bazant, Z.P., Kaplan, M.F. (1996). Concrete at High Temperatures. *Material Properties and Mathematical Models*, Longman, Harlow, Essex.
- [8] Khoury, G.A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of Concrete Research*, 44(161), 291-309.
- [9] Abrams, M.S. (1971). Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F. *Materials Science*, 25, 33-58.
- [10] Chudzik, P., Kowalski, R., Abramowicz, M. (2017). Strains of concrete in RC structures subjected to fire. *Procedia Engineering*, 193, 377-384.
- [11] Hayhoe, W.C., Youssef, M.A. (2013). Structural behaviour of concrete walls during or after exposure to fire: A Review. *CSCE 2013 General Conference*, Montréal, Québec, p.10.
- [12] Gui-rong, L., Yu-pu, S., Fu-lai, Q. (2010). Post-fire cyclic behavior of reinforced concrete shear walls. *Journal of Central South University of Technology*, 17: 1103-1108.
- [13] Wang, R., Xu, Y., Hu, C., Wang, W. (2014). Experimental study on seismic performance of concrete short-limb shear walls after fire. *Tumo Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal*, 47(1), 59-69.

- [14] Chi, J.H., Hsu, Y.C & Chen, H.J. (2016). Failure patterns of reinforced lightweight aggregate concrete (RLAC) walls after high temperature. *International Conference on Civil, Transportation and Environment*. Published by Atlantis Press. DOI:10.2991/iccte-16.2016.10
- [15] Xiao, J., Xie, Q., Li, Z & Wang, W. (2017). Fire resistance and post-fire seismic behavior of high strength concrete shear walls. *Fire Technology*, 53, 65–86.
- [16] Ni, S & Birly, A.C. (2018). Post-fire seismic behavior of reinforced concrete structural walls. *Engineering Structures*, 168, 163-178.
- [17] Ni, S & Gernay, T. (2021). Considerations on computational modeling of concrete structures in fire. *Fire Safety*, 120, 103065.
- [18] Wang, Y.S., Zhou, H., Wu J.Y. (2023). Hybrid fire collapse simulation of reinforced concrete structures under localized fires, *Engineering Structures*, 293, 116525. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116525>
- [19] Rezaeian, A., Hosseinlou, F., Qasim Hasan, A., Kuioon N.Z. (2023). Seismic performance of a dolphin-type berth structure under post-fire conditions. *Journal of Hydraulic Structures*, 9(4), 15-34. DOI: 10.22055/jhs.2024.45603.1277
- [20] Rezaie, F., & Sayad Sedgh Herfeh, N. (2023). Numerical Study of Prestressed Concrete Joist Slab System Under Fire Conditions. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 10(2), 232-253. doi: 10.22065/jsce.2022.305003.2575
- [21] Saberi, V., saberi, H., Panahkhah, S. P., Sadeghi, A., & Noroozinejad Farsangi, E. (2022). Investigation of the Effect of Fire Loading on the Behavior of Connections with Beam-to-Column Bolted End Plate and T-Connection. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(6), 108-129. doi: 10.22065/jsce.2021.303562.2563
- [22] Amoushahi, H., & Moradi, M. (2021). Numerical evaluation of reinforced concrete connections under post-earthquake fire. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(9), 306-336. doi: 10.22065/jsce.2020.239684.2192
- [23] Saberi, H., Saberi, V., Javan, S., & Sadeghi, A. (2022). Evaluation the Effect of Number, Material and Configuration of Bolts on Rigid Bolted Connections under Fire. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(1), 130-152. doi: 10.22065/jsce.2021.283722.2437
- [24] EN 1994-1-2 (2005) (English): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: *General rules - Structural fire design* [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004 / 18 / EC].
- [25] ABAQUS Documentation, *Version 21*, (2021).
- [26] Rezaeian, A., Mansoori, M. and Khajehdezfuly, A. (2024). Performance of steel beam with welded top-seat angle connections at elevated temperatures. *Journal of Structural Fire Engineering*, 15 (1), 113-146. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2022-0026>.