

The behavior of composite floors under fire (Case Study: The building of Maskan Mehr in Kermanshah province)

Mehdi Moradi ¹, Behnam Karami ², Hossein Amoushahi ^{3*}

1- Master of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Iran

2- Master of Civil Engineering, Earthquake Orientation, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Iran

ABSTRACT

Nowadays, a simple composite floor consisting of the concrete slab and steel castellated beam is considered as one of the most economical floors in the steel structures. However, due to the permanent danger of fire in buildings, it is essential to evaluate the composite floor's behavior against fire. Therefore, in the present study, the performance of the composite floor of the Building of Mehr House in Kermanshah province is investigated as a case study. In this study, non-linear coupling temperature-displacement analysis and explicit method in Finite element software and linear temperature analysis are applied to analyze the models. The results showed that with increasing temperature, the role of steel castellated beam decreased and the role of the concrete part was increased, thus, in the designing and rehabilitating the composite floors by considering the tensile membrane action of the concrete slab, the reinforcement costs could be reduced. Moreover, the results show that the composite floors of the building were designed such that they do not collapse during the fire and lose their operation due to the considerable fire during the fire. Finally, predicting the failure of the building during a fire can be investigated due to the loss of strength and stiffness of the columns and connection during the fire.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 October 2020

Revise Date: 12 January 2021

Accept Date: 19 January 2021

Keywords:

Simple composite floor

Castellated beam

Fire

Finite element

Case study

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.249274.2249>

*Corresponding author: Hossein Amoushahi

Email address: h.amoushahi@eng.ui.ac.ir

ارزیابی رفتار سقف های مرکب تحت اثر آتش سوزی (مطالعه موردی ساختمان مسکن مهر واقع در کرمانشاه)

مهدی مرادی^۱، بهنام کرمی^۲ حسین عموشاهی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ایران

۳- استادیار دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، ایران

چکیده

امروزه سقف های مرکب ساده متشکل از دو بخش دال بتنی و تیر لانه زنبوری به عنوان یکی از اقتصادی ترین سقف ها در سازه های فولادی به حساب می آیند. اما با توجه به وجود خطر دائمی آتش سوزی در ساختمان ها، بررسی سقف های مرکب در برابر آتش از اهمیت به سزایی برخوردار است. از این جهت در مطالعه حاضر رفتار سقف های مرکب ساختمان مسکن مهر واقع در کرمانشاه به عنوان مطالعه موردی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه به منظور تحلیل نمونه ها از تحلیل غیر خطی کوپل دما- تغییر مکان و روش صریح موجود در نرم افزار اجزا محدود استفاده شده است. نتایج نشان دادند با افزایش حرارت نقش تیر لانه زنبوری کاهش یافته و نقش بخش بتنی افزایش می یابد از این رو در طراحی و مقاوم سازی سقف های مرکب با در نظر گرفتن عملکرد غشایی کششی دال بتنی می توان هزینه های مربوط به مقاوم سازی را کاهش داد. همچنین نتایج نشان می دهند که سقف های مرکب ساختمان مسکن مهر به گونه ای طراحی شده اند که در هنگام آتش سوزی دچار فروریزش نمی شوند و به دلیل خیز قابل توجه در هنگام آتش سوزی کاربری خود را از دست می دهند. پیش بینی فروریزش ساختمان نمونه در هنگام آتش سوزی را می توان به دلیل از دست دادن مقاومت و سختی ستون ها و اتصالات در هنگام آتش سوزی بررسی کرد.

کلمات کلیدی: سقف مرکب ساده، تیر لانه زنبوری، آتش، آباکوس، عملکرد غشایی کششی، مقاوم سازی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.249274.2249	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.249274.2249	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۰/۲۳	۱۳۹۹/۰۷/۱۰
حسین عموشاهی h.amoushahi@eng.ui.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

آتش یکی از بلاهای اساسی است که بر سازه‌ها آسیب‌های بسیار بزرگ و غیر قابل پیش‌بینی اعمال می‌کند. میزان آسیب وارده به سازه‌ها به نوع و کاربری سازه، وسعت آتش‌گرفتگی ساختمان و میزان حرارت آتش بستگی دارد. در سازه‌های بتن مسلح (در صورتی که به خوبی و با جزئیات مناسب طراحی و اجرا شده باشند) به دلیل باز توزیع نیرو در اعضای داخلی سازه، آسیب‌های وارده می‌توانند از اعضا و بخش‌های آسیب‌دیده سازه در اعضا و بخش‌های سالم آن توزیع شوند. هر چند که آتش برای سازه‌های فولادی یا کامپوزیتی باعث فروپاشی مواد سازه‌ای، کمانش حرارتی و تسلیم مواد تحت تنش‌های کوچک می‌شود. به عنوان نمونه ساختمان پلاسکو که یک ساختمان ۱۷ طبقه فولادی و بتنی در تهران (ایران) است تحت بار آتش به کلی ویران شد [۱]. از آنجا که خواص بتن بسیار پیچیده‌تر از سایر مصالح ساختمانی می‌باشد لذا سازه‌های بتن مسلح معمولاً تحت بار آتش با دمای بالا مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا رفتار خواص تشکیل دهنده آن به خوبی بررسی گردد. در هنگام آتش‌سوزی به دلیل خرد شدن بتن، میلگردها در معرض مستقیم شعله‌های آتش قرار گرفته و باعث آسیب‌های کلی و بزرگ به سازه می‌شود [۲].

مقاومت پیوستگی فولاد با بتن در هنگام آتش‌سوزی با افزایش دما کاهش می‌یابد. معمولاً میزان کاهش مقاومت پیوستگی با دما به نوع بتن و سطوح میلگردهای تقویتی بستگی دارد. در سال ۱۹۸۵ بر اساس مطالعات اشنایدر^۱ در موسسه گرام‌تخش^۲ اثبات شد که بتن با انبساط حرارتی کم‌تر در دماهای بالا مقاومت پیوستگی بیشتری نسبت به بتن با انبساط حرارتی بالاتر دارد. همچنین میلگردهای آج‌دار مقاومت پیوستگی بیشتری نسبت به میلگردهای صاف خواهند داشت [۳].

مقاومت بتن که به صورت کامل هیدراته شده، ممکن است در دماهای ابتدایی 100°C - 200°C افزایش یابد، هر چند که این افزایش مقاومت نباید در مراحل طراحی در نظر گرفته شود چون به عمر بتن و شرایط مصالح بستگی دارد [۴]. کاهش مقاومت فشاری بتن در دماهای بالا می‌تواند به صورت فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی شود. تغییرات فیزیکی و شیمیایی می‌تواند به صورت تغییر در محتوای آب، محصولات هیدراتی، ساختار تخلخل، ریزساختاری و خرده‌ریزها طبقه‌بندی شود. ایجاد این تغییرات در بتن تحت تاثیر عوامل زیادی هم‌چون مقاومت فشاری بتن، رطوبت، چگالی بتن، خصوصیات فیزیکی گرمایی بتن، بار خارجی، پیش‌تنیدگی، تغییرات دمایی، توزیع دما در سطح ساختاری اعضا، ابعاد اعضا، نسبت میلگردها، وجود فیبرها، نوع سنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌های سیمان است [۵].

سقف مرکب به صورت ترکیبی از فولاد و بتن می‌باشد. در این سقف‌ها با نصب برش‌گیر که اغلب از پروفیل نبشی است. پیوستگی و انسجام لازم بین سقف و سازه ایجاد می‌شود. تیر فرعی در این سقف‌ها می‌تواند تیر آهن‌های لانه‌زنبوری و یا ساده باشند که با توجه به طراحی و محاسبات فواصل متفاوتی دارد [۶]. روش کار در این نوع سقف به این صورت است، پس از اتمام سازه و نصب تیرهای فرعی و اتصال برش‌گیرها بین تیرهای فرعی قالب‌بندی شده سپس میلگردهای افت حرارت عمود بر تیرهای فرعی نصب و آماده بتن‌ریزی می‌شود [۷].

سقف‌های مرکب سال‌های زیادی است که در کشورهای توسعه‌یافته اجرا می‌شود و یکی از ایمن‌ترین و اقتصادی‌ترین سقف‌های است که به شیوه کاملاً مهندسی اجرا می‌شود. این سیستم اجرای سقف از سال ۱۹۳۹ و با تدوین یک استاندارد صنعتی برای طراحی، اجرا و بهره‌برداری از این سقف توسط انستیتو سقف فولادی SDI به‌طور رسمی وارد صنعت ساختمان شده است. کشورهای اروپایی و آمریکایی تحقیقات گسترده‌ای را بر روی عملکرد این سقف‌ها انجام داده استانداردها و دستورالعمل‌های مخصوصی را در مورد طراحی ورق‌های عرشه به‌تنهایی و در حالت‌های مرکب و غیر مرکب تهیه نموده‌اند [۸].

در سال ۲۰۱۷ یولکان ظرفیت باربری سقف‌های دال مرکب با عرشه فولادی را تحت بارگذاری حرارت مورد بررسی قرار داد. این نخستین تحقیقی است که در آن مقاومت سقف‌های دال مرکب با عرشه فولادی بر اساس آزمایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی سازه در

¹ Schneider

² Gesamthochsch

ترکیه انجام شده است. هدف اصلی این تکمیل برخی از موضوعات آیین نامه ساختمان فعلی ترکیه برای مهندسين سازه است. سقف مرکب مورد آزمایش در این تحقیق به طور خاص برای ساختمان های بلندمرتبه فولادی طراحی شده است. در آزمایش ایشان سقف مرکب مورد بررسی از سطح پایین به مدت ۱۰۵ دقیقه در معرض منحنی آتش استاندارد ISO-834 قرار می گیرد و پس از آن ۹۰ دقیقه خنک می شود. اندازه گیری هایی مربوط به جابجایی و دما نشان می دهد که در دماهای بالا، سقف مرکب بار موجود را توسط عملکرد غشای کششی دال بتنی بدون استفاده از تیرهای فرعی تحمل می کند. این مطالعه پیشنهاد می کند که تیرهای فرعی فولادی نیازی به محافظت در برابر آتش ندارند زیرا دال بتنی به تنهایی برای تحمل بار ثقلی در هنگام آتش سوزی کافی است [۹].

لی و همکاران تحقیقات آزمایشگاهی گسترده ای بر روی رفتار حرارتی و مکانیکی سقف های مرکب تحت منحنی استاندارد آتش ISO-۸۳۴ انجام دادند. جهت شبیه سازی سقف های مورد بررسی از چهار دال مرکب با ابعاد $5/2 \times 3/7 \text{ m}$ استفاده شده است. در ساخت دو نمونه از دال های مرکب از تیرهای فرعی استفاده شده است و جهت عرشه فولادی عمود بر تیرهای اصلی است. در ساخت دو نمونه دیگر از تیر فرعی استفاده نشده است و جهت عرشه فولادی موازی با تیرهای عرضی است [۱۰]. مقایسه بین مقاومت های اندازه گیری شده به صورت تجربی و پیش بینی شده توسط آیین نامه در برابر آتش سوزی دال ها نشان می دهد که محاسبات آیین نامه یوروکد ممکن است برای دال ها بتنی با عرشه فولادی به صورت محافظه کارانه است و سقف های مرکب نسبت به روابط تحلیلی در برابر آتش سوزی مقاومت بیشتری دارند. زهاربا [۱۱] تعدادی مدل عددی که در آن ها فرضیه ساده ای برای نمایندگی از دال های مقاوم در برابر آتش در نظر گرفته شده است ارائه کرد. این مطالعه تأکید می کند که در تحلیل توزیع حرارتی، برای به دست آوردن یک مدل عددی ساده، بخش مقطع عرضی دال بتن مرکب با عرشه فولادی می تواند توسط یک مقطع با ضخامت متوسط محاسبه شده با توجه به آیین نامه EN1994-1-2 [۱۲] جایگزین شود. نیوگندر و همکاران [۱۳] مطالعات آزمایشگاهی و عددی گسترده ای بر روی رفتار سه نمونه دال مرکب ساده در مقیاس یک چهارم را تحت اثر آتش سوزی انجام دادند. هدف این مطالعه بررسی اثر سختی خمشی تیرهای اصلی محافظت شده هنگام آتش سوزی در دال های مرکب داخلی است. مطالعات استادلر [۱۴] در زمینه سقف های مرکب نشان داد که استفاده از عملکرد غشایی کششی در روش های طراحی سیستم های دال در هنگام آتش سوزی از لحاظ اقتصادی به طور قابل توجهی مقرون به صرفه است زیرا می توان از مقادیر زیادی از اقدامات حفاظتی در آتش سوزی جلوگیری کرد و هزینه ها را کاهش داد.

ساخت سازه های فولادی به دلیل وزن کمتر و سرعت بالای ساخت دارای اهمیت بسیار زیادی است اما با توجه به وجود خطر دائمی آتش سوزی بررسی و رفتار سنجی این سازه ها در برابر آتش از اهمیت به سزایی برخوردار می باشد. با توجه به این مهم در این تحقیق سعی شده تا رفتار تیرهای کامپوزیت لانه زنبوری (دال بتنی با تیر لانه زنبوری) تحت آتش سوزی مورد بررسی قرار گیرند و سپس رفتار سقف های مرکب ساختمان مسکن مهر واقع در کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفته و طرح های مقاوم سازی بررسی شوند. در ابتدا به کمک نرم افزار ETABS [۱۵] تحلیل حرارتی انجام شد تا دهانه های بحرانی (دهانه های که احتمال خرابی در آن دهانه تحت اثر آتش سوزی بیشتر از سایر دهانه ها است) شناسایی شوند، سپس این دهانه ها در نرم افزار ABAQUS [۱۶] مدل سازی و تحلیل شدند. موضوعاتی مانند بررسی عملکرد غشایی دال بتنی و تاثیر آن بر میزان مقاوم سازی تیرهای سازه، بررسی میزان خیزهای ایجاد شده تحت اثر آتش سوزی، اثر مقاوم سازی تیرهای فرعی و اصلی در اقتصادی بودن طرح از موضوعات مهمی است که کار حاضر را با اهمیت کرده است. برای در نظر گرفتن خواص مصالح فولادی و بتنی به ترتیب از آیین نامه یوروکد EN1993-1-2 [۱۷] و یوروکد EN1992-1-2 [۱۸] استفاده شده و همچنین برای اعمال بارگذاری حرارتی از پروتکل آیین نامه ISO834 [۱۹] استفاده شده است.

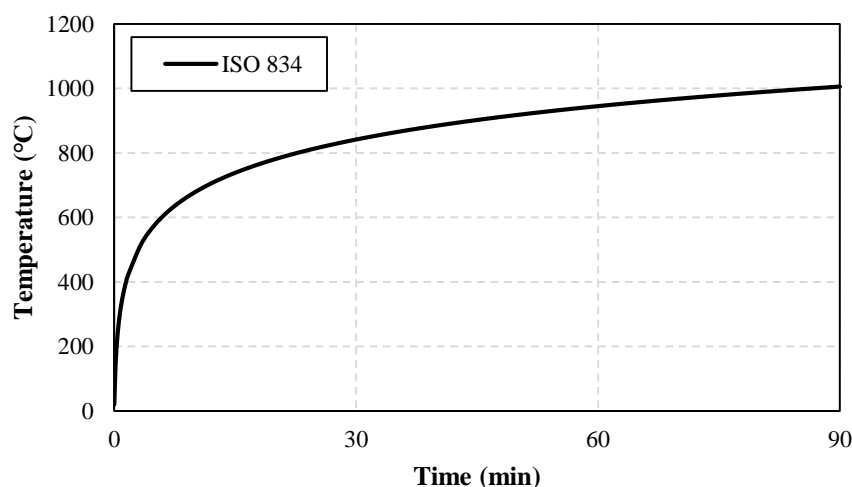
۲- مدل اجزاء محدود تحت بارگذاری آتش

با توجه به وجود خطر دائمی آتش سوزی بررسی و ارزیابی رفتار سقف های مرکب ساده در برابر آتش از اهمیت به سزایی برخوردار است. با توجه به این مهم در این تحقیق در ابتدا سعی شده تا به نحو جامعی رفتار سقف های مرکب ساختمان مسکن مهر مورد بررسی قرار گیرند و سپس طرح های مقاوم سازی برای افزایش عملکرد سقف های مورد نظر در برابر آتش بررسی شدند. به این منظور در ابتدا به کمک نرم افزار ایتبس بر روی ساختمان مورد نظر تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس تحلیل حرارتی انجام شد تا دهانه های بحرانی شناسایی شوند.

پس از شناسایی، سقف‌های مرکب موجود در دهانه‌های بحرانی توسط نرم‌افزار آباکوس تحت نرخ استاندارد بارگذاری ISO834 [۱۹] بارگذاری حرارتی شدند و رفتارشان مورد بررسی قرار گرفت و در آخر طرح‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد و بررسی شدند. همچنین به منظور اطمینان از صحت نتایج ابتدا با مقایسه نتایج یک نمونه آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تحلیل عددی توانایی نرم‌افزار به اثبات رسید.

۲-۱- شرایط مرزی و شبکه بندی سقف مرکب

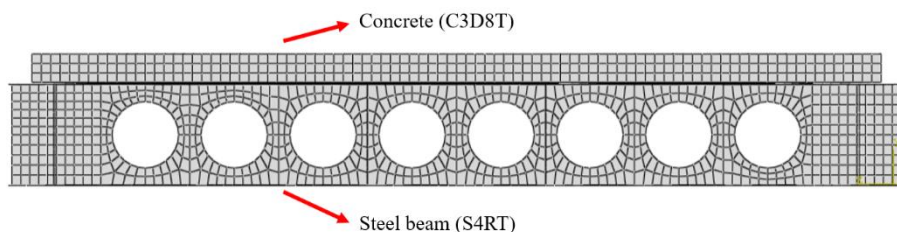
نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق در دو گام اصلی که شامل بارگذاری ثقلی (وزن مرده المان‌های سازه‌ای و بار ثابت) و بارگذاری حرارتی تا لحظه گسیختگی تیر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در گام اول وزن مرده المان‌ها در نرم‌افزار تعریف می‌گردد، در گام دوم تحلیل طبق پروتکل بارگذاری حرارتی ISO834 [۱۹] که در شکل ۱ نشان داده شده به سازه اعمال می‌گردد.



شکل ۱ منحنی دما-زمان بر اساس استاندارد ISO834 [۱۹]

به منظور تحلیل بارگذاری یکنواخت پوش‌آور از المان C3D8R (المان مکعبی سه بعدی دارای ۸ گره با انتگرال کاهش یافته) برای شبکه‌بندی دال بتنی و از المان S4R در شبکه‌بندی تیرهای فولادی استفاده شده است. به منظور تحلیل حرارتی نمونه‌ها از المان C3D8T برای شبکه‌بندی دال بتنی و از المان S4RT برای شبکه‌بندی تیرهای فولادی استفاده شده است (شکل ۲). المان S4R دارای چهار گره بوده و هر گره سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی با تابع درون یاب خطی است که از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته برای حل انتگرال‌ها استفاده می‌کند. این المان با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی یکی از پرکاربردترین المان‌های موجود نرم‌افزار آباکوس برای شبکه‌بندی اجزای سازه‌ای در حضور حرارت‌های بالا است. علاوه بر خصوصیات گفته شده این المان دارای خواص پلاستیسیته، سخت‌شدگی کرنشی، تغییر مکان و کرنش‌های بزرگ است.

برای آنکه بتوان رفتار هم‌زمان بتن و آرماتور و همچنین رفتار توأمان دال و تیر را مدل‌سازی کرد، تماس و چسبندگی بین آرماتور و بتن و بال تیر به‌طور دقیق مدل‌سازی شده است. برای تماس و چسبندگی آرماتورهای درون دال از قید محصورشدگی شبکه‌ی آرماتور درون بتن استفاده شده است. برای تماس بین بتن و بال تیر و عدم لغزش بتن روی تیر به‌جای مدل‌سازی گل‌میخ‌ها از قید Tie استفاده شده است. این قید در طول شبیه‌سازی دو صفحه‌ی موردنظر، در اینجا صفحه‌ی بال بالایی تیر و صفحه‌ی زیرین دال، را به هم می‌بندد و درجات آزادی دو صفحه را یکسان می‌کند و بدین ترتیب حرکت نسبی میان آن‌ها را محدود می‌کند و مانع لغزش دال روی تیر می‌شود.



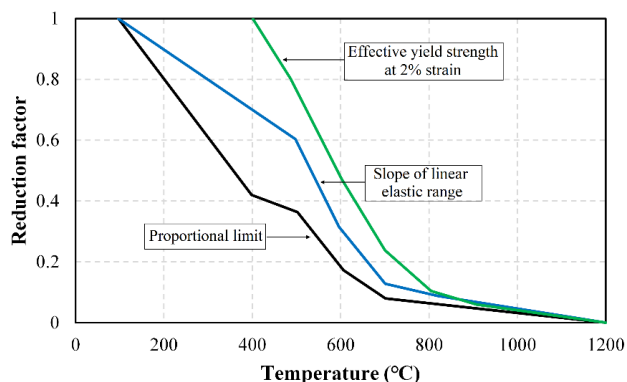
شکل ۲ شبکه‌بندی المان‌های سازه‌ای سقف مرکب

شرایط مرزی تیر در دو انتهای به صورت مفصلی است. یعنی از جابجایی دو انتهای آن در راستای x ، y و z جلوگیری شده است. همچنین از جابجایی عمود بر صفحه تیر (راستای x) جلوگیری شده است.

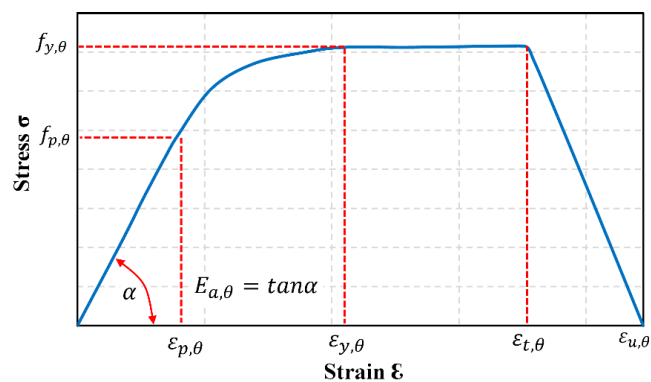
۲-۲- مشخصات مصالح فولادی در برابر آتش

دقت در لحاظ نمودن خواص مواد در دماهای بالا، یکی از نکات کلیدی برای کسب نتایج قابل اعتماد از تحلیل اجزاء محدود سازه‌ها در آتش است. در این تحقیق به ترتیب از آیین‌نامه‌های یورو کد-۳ و یورو کد-۲ برای مدلسازی رفتار مصالح فولادی و بتنی در برابر آتش استفاده شده است.

خواص مکانیکی نمونه فولادی در دمای محیط از طریق آزمایش کشش به دست می‌آید. با توجه به مطالعات هندر و همکاران [۲۰] استفاده از روابط آیین‌نامه یورو کد برای تنش-کرنش در دمای بالا پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از میزان تحمل سازه در آتش در مقایسه با روابط آیین‌نامه ASCE [۲۱] به دست می‌دهد. لذا از نمودارهای تنش-کرنش فولاد ساختمانی در دماهای مختلف و ضرایب کاهش خواص مکانیکی فولاد در دماهای بالا طبق آیین‌نامه یورو کد، جهت مدلسازی رفتار فولاد ساختمانی در دماهای بالا استفاده گردید.



(ب)



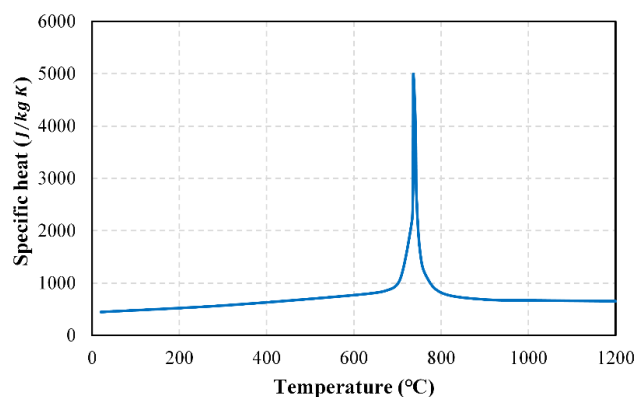
(الف)

شکل ۳ رفتار مکانیکی فولاد در آتش (الف) منحنی تنش کرنش مصالح فولادی در دماهای بالا و (ب) ضرایب کاهش روابط تنش-کرنش فولاد در دماهای بالا [۱۷]

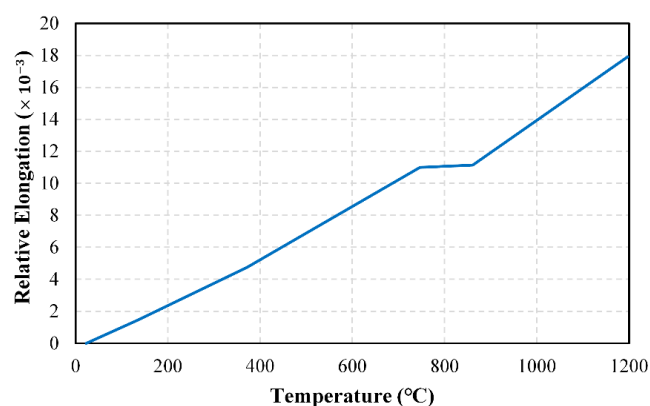
شکل ۳ نشان می‌دهد که مقاومت فولاد در دماهای بالا به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، حال آنکه در نسبت‌های دمای پائین کاهش مقاومت کمتر است. طبق آیین‌نامه یورو کد 2-1-1993-EN [۱۷]، مقادیر مقاومت نهایی فولاد متناسب با دما تغییر می‌کند. بر همین اساس آیین‌نامه، رابطه ۱ را که در این مطالعه استفاده شده پیشنهاد می‌کند.

$$F_u = \begin{cases} 1.25F_y & 20^\circ\text{C} \leq T < 300^\circ\text{C} \\ F_y(2 - 0.0025T) & 300^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ F_y & 400^\circ\text{C} \leq T < 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

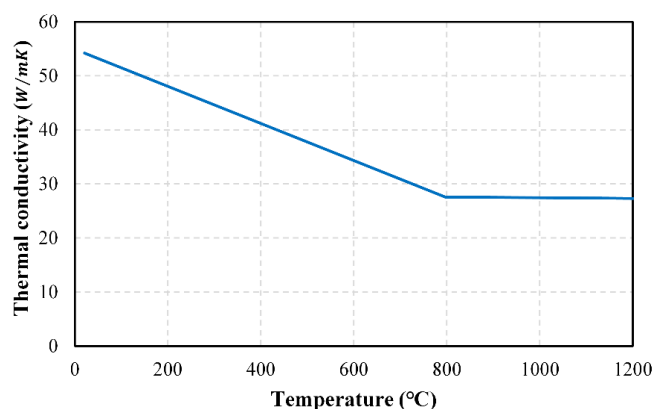
طبق آیین نامه یوروکد EN1993-1-2 [۱۷]، خصوصیات حرارتی فولاد شامل ضریب انبساط گرمایی، گرمای ویژه و هدایت گرمایی در دماهای بالا در شکل ۴ بیان شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴ رفتار حرارتی فولاد در آتش الف) ضریب انبساط گرمایی، ب) ظرفیت گرمایی ویژه و ج) هدایت گرمایی [۱۷]

۲-۳ مشخصات مصالح بتنی در برابر آتش

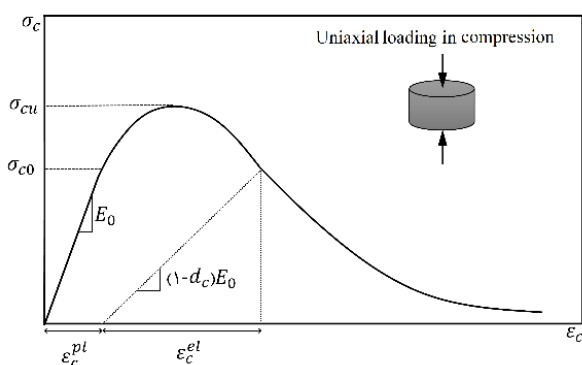
مصالح بتنی در سازه‌ها ممکن است طی دوره خدمتشان در اثر آتش‌سوزی در معرض درجه حرارت زیاد قرار گیرند. به همین دلیل خصوصیات مرتبط بتن پس از قرار گرفتن در معرض آتش اهمیت زیادی در سرویس رسانی ساختمان‌ها و ایمنی ساکنین دارد. خصوصیات حرارتی و مکانیکی مواد در هنگام آتش‌سوزی به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند که در بسیاری از موارد باعث ایجاد سطوح بالای تنش‌های حرارتی می‌شود [۲۲]. منحنی‌های رسم شده بتن در فشار در دماهای بالا با توجه به روابط موجود در آیین نامه یورو کد ۲ و شکل ۲-الف به صورت غیر خطی محاسبه شده است. ضرایب کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نیز با توجه به آیین نامه یورو کد محاسبه شده است. ضریب کاهش مقاومت کششی بتن در دماهای بالا با توجه به شکل ۲-ب در مدلسازی‌ها استفاده شده است.

تعیین رفتار غیرخطی بتن از مراحل مهم مدلسازی عددی سازه‌های بتنی است. برای مدلسازی رفتار غیرخطی بتن در نرم‌افزار اجزا محدود از مدل آسیب دیده بتن استفاده می‌شود [۱۶]. پارامترهای مربوط به مدل آسیب دیده بتن که در این مطالعه از آن استفاده شده است در جدول ۱ آمده است. مدل آسیب دیده بتن (CDP) متشکل از دو مکانیزم شکست است که شامل خردشدگی فشاری و ترک

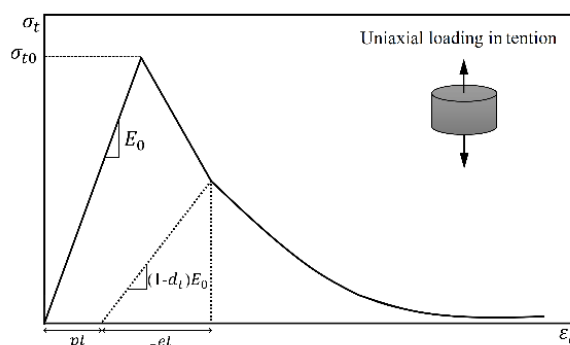
کششی می‌شود. رفتار بتن طبق مدل آسیب دیده بتن شکل ۵ نشان داده شده است که بیان‌گر رفتار بتن تحت بار تک محوره فشاری و کششی، و بار چرخه‌ای است.

جدول ۱ مشخصات محدوده پلاستیک بتن

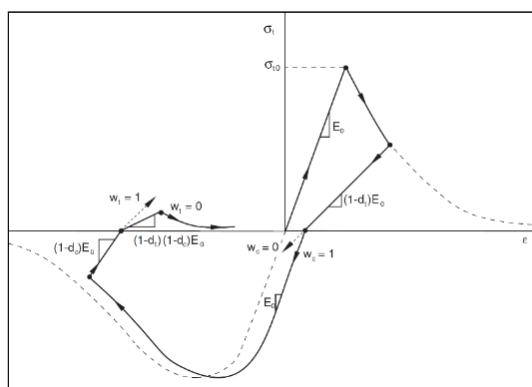
مشخصات مکانیکی	نماد	واحد	بتن
زاویه اتساع	ψ	-	۳۵
خروج از مرکزیت	ε	-	۰/۱
نسبت تنش فشاری حاکتر دو محوره به یک محوره	f_b/f_c	-	۱/۱۶
نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف النهار کششی به فشاری	K_c	-	۰/۶۶۷
ویسکوزیته	Viscosity	-	۰/۰۱



(ب)



(ف)



(ج)

شکل ۵ رفتار بتن (الف) تحت بارگذاری تک محوره کششی، (ب) فشار و (ج) بارگذاری چرخه‌ای [۱۶]

کاهش مقاومت بتن به دلیل آسیب‌هایی است که در رفتار کششی و فشاری آن رخ می‌دهد، این کاهش مقاومت به وسیله پارامترهای آسیب در کشش و فشار مدل آسیب دیده بتن به مدل وارد می‌گردد که می‌تواند به صورت کاهشی در سختی الاستیک بتن دیده شود. پارامتر آسیب فشاری در دماهای بالا بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه، پارامتر آسیب فشاری به مقاومت فشاری، مدول

الاستیسیته و مقاومت فشاری پلاستیک وابسته است. کرنش پلاستیک بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود و مقادیر آن به عنوان مقادیر آسیب فشاری در نرم‌افزار آباکوس وارد می‌شود [۱۶].

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (2)$$

که در آن d_c ، σ_c ، E_c و ε_c^{pl} به ترتیب بیان‌گر پارامتر آسیب فشاری، تنش فشاری، کرنش پلاستیک فشاری و مدول الاستیسیته بتن است. b_c مقدار پیشنهادی است که ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه پارامتر آسیب کششی در دماهای بالا از رابطه ۳ استفاده می‌شود.

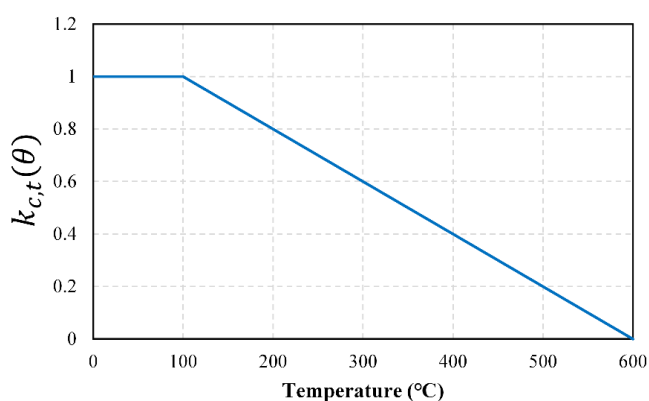
$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} \quad (3)$$

که در آن d_t ، σ_t و σ_{t0} به ترتیب بیان‌گر پارامتر آسیب کششی، تنش کششی و مقاومت تسلیم می‌باشد. قابل ذکر است که مقادیر زیاد پارامترهای آسیب باعث مشکلات همگرایی در نرم‌افزار اجزا محدود می‌گردد، اگرچه بیشترین مقدار مقادیر آسیب کششی و فشاری حداکثر، به مقدار ۰/۹۹ رسیده است [۱۶].

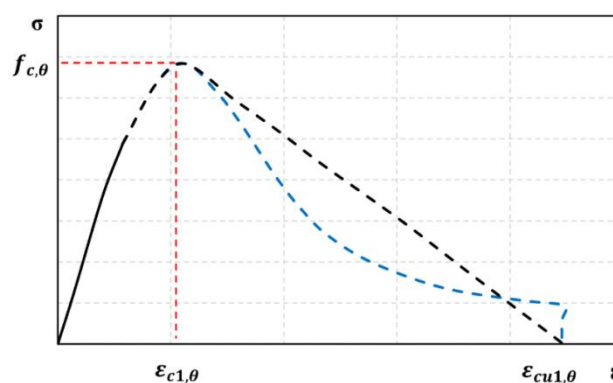
در دماهای معمولی و دماهای بالا برای تعیین نمودار تنش-کرنش فشاری بتن از مدل تنش-کرنش ارائه شده در آیین‌نامه EN1992-1-2 [۱۸] استفاده می‌شود. در این مدل بتن تا حدود $\sigma_c 0/4$ به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کند و از این نقطه تا تنش ماکزیمم، آیین‌نامه EN1992-1-2 [۱۸] رابطه ۳ را برای تعیین تنش فشاری بتن ارائه می‌دهد. به منظور پرهیز از مشکلات همگرایی، جهت شبیه سازی رفتار نرم‌شوندگی بتن در شکل ۶-الف از یک روند خطی کاهش، استفاده می‌شود.

$$\sigma_\theta = \frac{3\varepsilon_c f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \quad (4)$$

در این رابطه σ_θ تنش فشاری در دمای θ ، ε_c کرنش فشاری، $f_{c,\theta}$ و $\varepsilon_{c1,\theta}$ به ترتیب تنش ماکزیمم و کرنش متناظر با تنش ماکزیمم بتن در دمای θ بر اساس آیین‌نامه یوروکد ۲ هستند.



(ب)



(الف)

شکل ۶ رفتار بتن در دماهای بالا (الف) رابطه تنش-کرنش بتن در فشار و (ب) ضریب کاهش مقاومت بتن در کشش [۱۸]

در دماهای بالا رفتار کششی بتن وابستگی قابل توجهی به دما دارد به طوری که با افزایش دما مقاومت کششی ماکزیمم و سختی الاستیک بتن کاهش می‌یابد. سختی الاستیک بتن در فشار و کشش یکسان فرض می‌شود بنابراین سختی کششی بتن همانند سختی

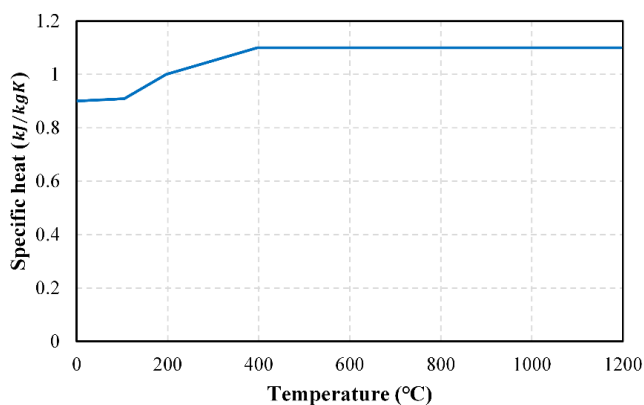
فشاری آن با تغییرات دما، تغییر می‌کند. از این رو آیین نامه EN1992-1-2 [۱۸] رابطه ۴ را برای محاسبه مقاومت کششی بتن در دماهای بالا پیشنهاد می‌کند [۱۸]. که در آن $f_{t,\theta}$ مقاومت کششی ماکزیمم در دمای θ ، $f_{t,20}$ مقاومت کششی ماکزیمم در دمای 20°C و $K_{t,\theta}$ ضریب کاهش مقاومت کششی در دماهای بالا می‌باشد که با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود.

$$f_{t,\theta} = k_{t,\theta} f_{t,20} \quad (۵)$$

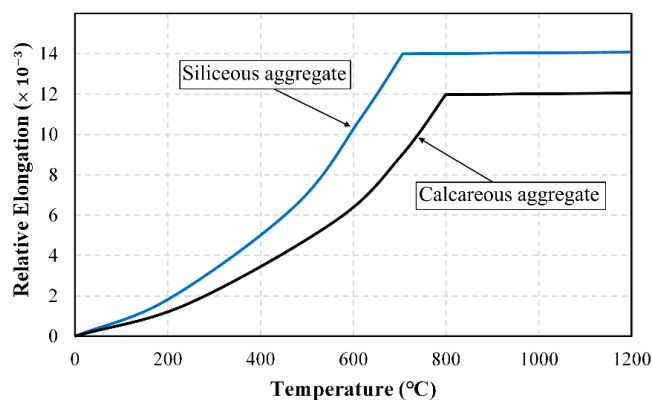
$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \quad k_{t,\theta}(\theta) = 1 \quad (۶)$$

$$100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C} \quad k_{t,\theta}(\theta) = 1 - \frac{\theta - 100}{500} \quad (۷)$$

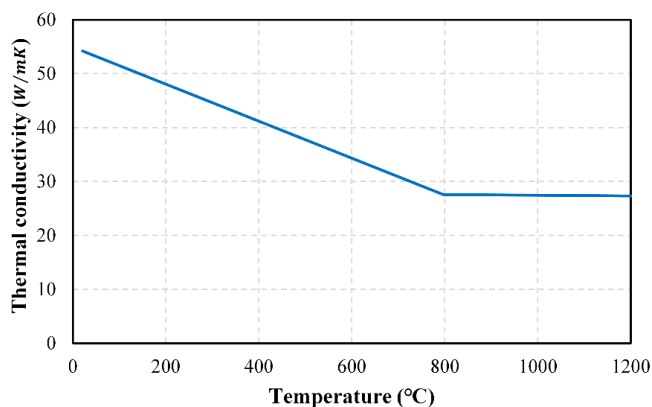
ضریب انبساط گرمایی، گرمای ویژه و هدایت گرمایی برای بتن خشک با وزن متوسط (با سنگدانه آهکی یا سیلیسی) طبق یوروکد ۲ مطابق شکل ۷ آورده می‌شود.



(ب)



(الف)



(ج)

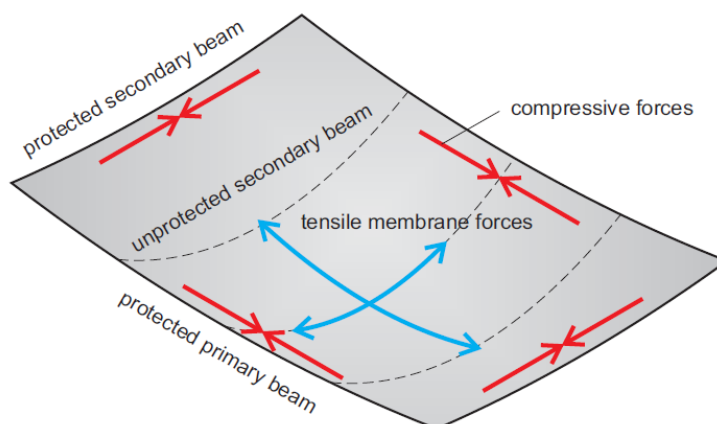
شکل ۷ رفتار حرارتی بتن در آتش (الف) ضریب انبساط گرمایی، (ب) ظرفیت گرمایی ویژه و (ج) هدایت گرمایی [۱۸]

۲-۴ عملکرد غشایی دال

سیستم سقف‌های دال مرکب شامل یک شبکه از تیرهای اصلی و فرعی فولادی است که به دال بتنی متصل می‌شوند. در این نوع سیستم سازه‌ای سقف، از مصالح به‌طور مطلوب برای توزیع بار استفاده می‌شود به این صورت که نیروهای کششی در تیرهای فولادی و نیروهای فشاری در بتن ایجاد می‌شود. این باعث می‌شود که در دهانه‌های بزرگ بدون داشتن ستون‌های اضافی بتوان با سقف‌های کم‌عمق مواجه شد. با این حال، در صورت آتش‌سوزی، اگر تیرهای فولادی در برابر آتش‌سوزی محافظت نشده باشند به سرعت مقاومت خود را از دست می‌دهند. به همین دلیل در طراحی کلاسیک حفاظت در برابر آتش‌سوزی، هر تیر فولادی باید توسط صفحات گچ، بتن پاشی، پوشش‌های پرکننده که از گرم شدن زیاد المان‌های فولادی جلوگیری می‌کند، پوشیده شود [۱۴]. برای جلوگیری از فروپاشی سازه همیشه حفاظت از هر تیر فولادی ضروری نیست. در دمای محیط دال به‌طور عمده بار موجود را به کمک خمش به تیرهای اطراف منتقل می‌کند. اگر تیرهای فرعی محافظت نشده در زیر دال بتنی در طول آتش‌سوزی مقاومت خود را از دست بدهند، تغییر شکل‌های بزرگی در وسط دال رخ می‌دهد که باعث فعال شدن عملکرد غشایی کششی دال می‌شود. پس‌از آن بار می‌تواند توسط یک مسیر جایگزین منتقل شود و تیرهای فرعی محافظت نشده دیگر کاربری قبل را خواهند داشت و نیازی به وجود آن‌ها نیست. این نوع مکانیسم انتقال بار که به عملکرد غشایی کششی معروف است، در این حالت ایجاد می‌شود.

استفاده از عملکرد غشایی کششی در روش‌های طراحی سیستم‌های دال در هنگام آتش‌سوزی از لحاظ اقتصادی به‌طور قابل توجهی مقرون به‌صرفه است زیرا می‌توان از مقادیر زیادی از اقدامات حفاظتی در آتش‌سوزی جلوگیری کرد و هزینه‌ها را کاهش داد [۱۴] همچنین قابل ذکر است که به‌منظور استفاده از عملکرد غشایی کششی دال در هنگام آتش‌سوزی می‌بایست میلگردهای تقویتی در طول مدت آتش‌سوزی از شکل‌پذیری و مقاومت بالایی برخوردار باشند [۹].

در مطالعه لی و همکاران تحقیقات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی رفتار حرارتی و مکانیکی سقف‌های مرکب تحت استاندارد آتش ISO-834 [۱۹] انجام شده است [۱۰]. بر اساس این مطالعات در تمام دال‌ها، ترک‌های بیضوی شکل در مرز دال به وجود آمدند که نشان‌دهنده تشکیل عملکرد غشایی کششی است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده در مرکز پانل دال، نیروهای غشایی کششی و در اطراف محیط پانل دال نیروهای فشاری رخ می‌دهد.

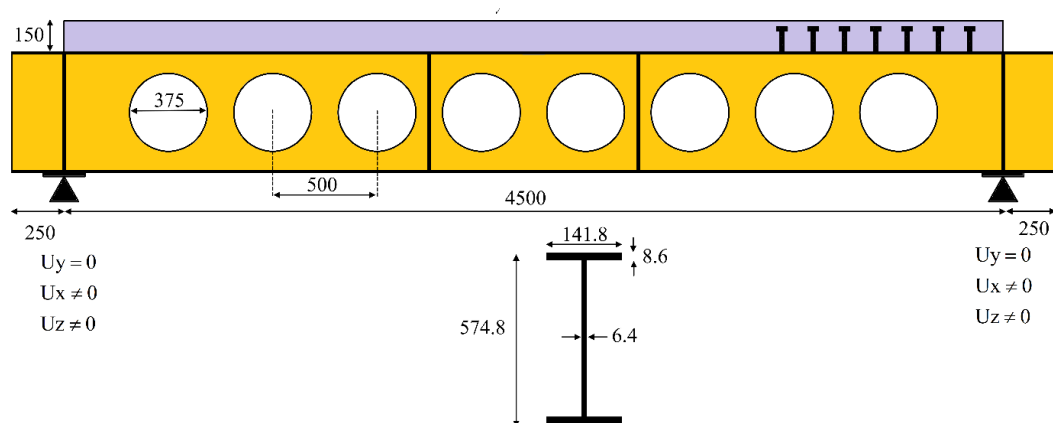


شکل ۸ عملکرد غشایی کششی و فشاری دال مرکب در هنگام آتش‌سوزی [۱۴]

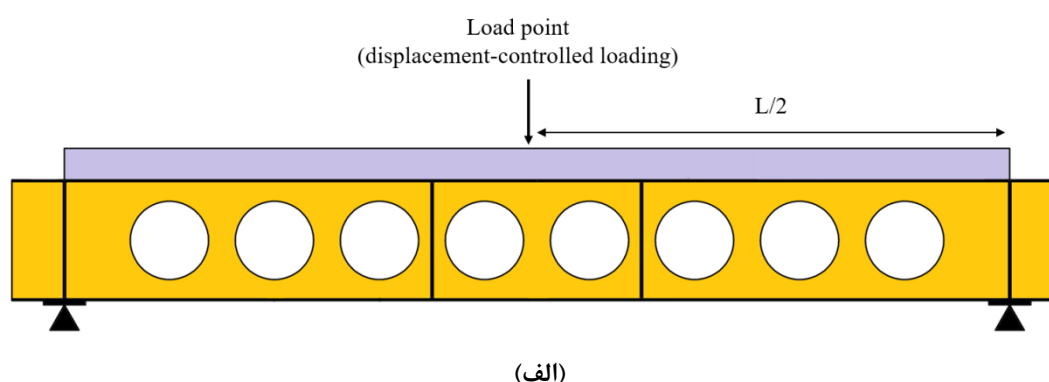
۳- صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود

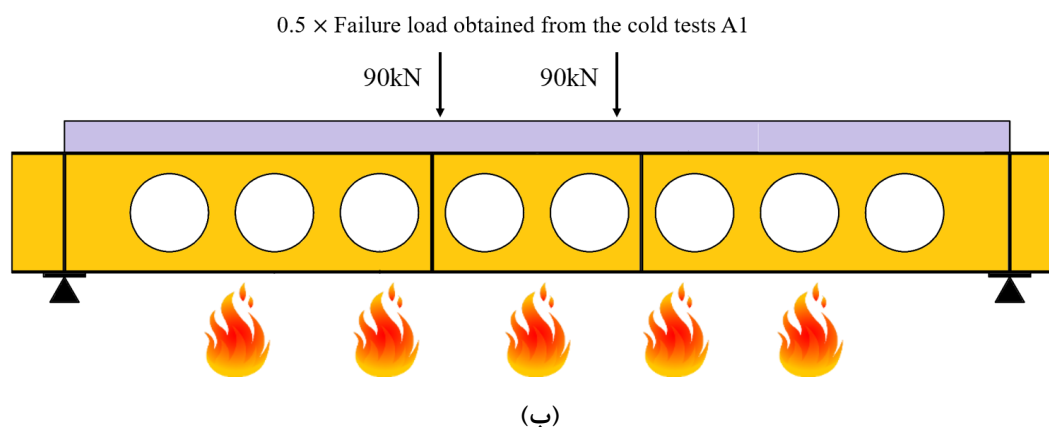
به‌منظور صحت و اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود از نتایج آزمایشگاهی ندجای و همکاران [۲۳] استفاده شده است. در این مطالعه به بررسی عملکرد دو نمونه تیر مرکب دارای بازشو پرداخته شده است. آزمایش‌های مختلفی بر روی تیرهای مورد مطالعه در دو تراز دمایی متفاوت (دمای معمولی و دمای بالا) انجام شده است. تیرها به‌صورت یکنواخت بارگذاری شده‌اند و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده نحوه گسیختگی، زمان دوام و فاکتورهای طراحی این‌گونه تیرها در شرایط حرارتی موردبررسی قرار گرفته است. در تحقیق فعلی، نمونه‌های آزمایش‌شده (نمونه A1 و A2) در این تحقیق انتخاب و به‌صورت دقیق مدل‌سازی شده است و در انتها نتایج حاصل از تحلیل با نتایج آزمایش مقایسه شده است.

نمونه A1 و A2 از لحاظ ابعاد هندسی کاملاً مشابه هم هستند و مشخصات هندسی این دو نمونه در شکل ۹ آورده شده است. این نمونه‌ها که شامل یک تیر با طول دهانه آزاد ۴۵۰۰ mm است که توسط دالی با ضخامت ۱۵۰ mm پوشیده شده است. همچنین ارتفاع گل‌میخ‌ها ۱۲۰ mm بوده که در فواصل ۱۵۰ mm از هم به کار رفته است. خصوصیات مکانیکی مصالح فولادی و مصالح بتنی در جدول ۲ آورده شده است. تفاوت دو نمونه A1 و A2 در بارگذاری آنها است به طوری‌که ابتدا یک تحلیل پوش‌آور از نوع تغییرمکان کنترل در وسط نمونه A1 انجام شده تا ظرفیت حداکثر آن مشخص گردد (شکل ۱۰- الف). در نمونه A2 ابتدا ۵۰٪ از حداکثر ظرفیت بدست آمده از نمونه A1 به عنوان بار متمرکز وارد گردیده و سپس یک تحلیل حرارتی طبق استاندارد ISO834 [۱۹] انجام گردیده است (شکل ۱۰- ب).



شکل ۹ مشخصات هندسی نمونه انتخابی جهت صحت‌سنجی (ابعاد بر حسب mm) [۲۳]



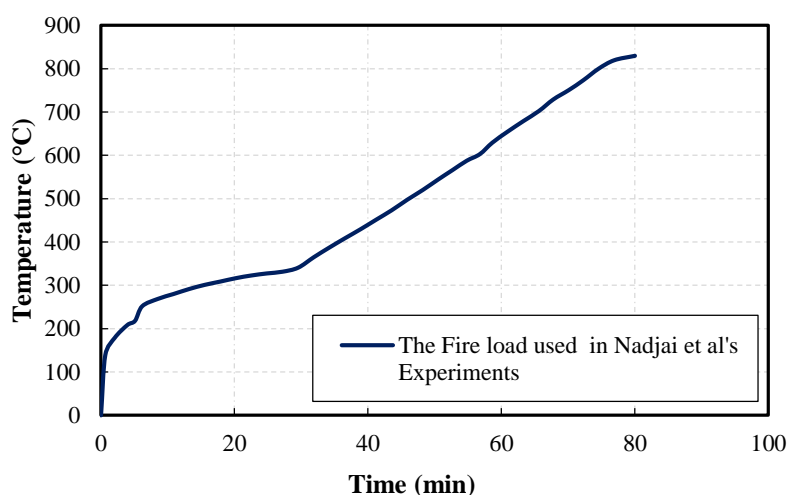


شکل ۱۰ بارگذاری نمونه‌ها (الف) نمونه A1 تحت بارگذاری تغییرمکان کنترل و (ب) نمونه A2 تحت بارگذاری ثقلی و حرارت [۲۳]

جدول ۲ مشخصات مکانیکی و حرارتی مصالح [۲۳]

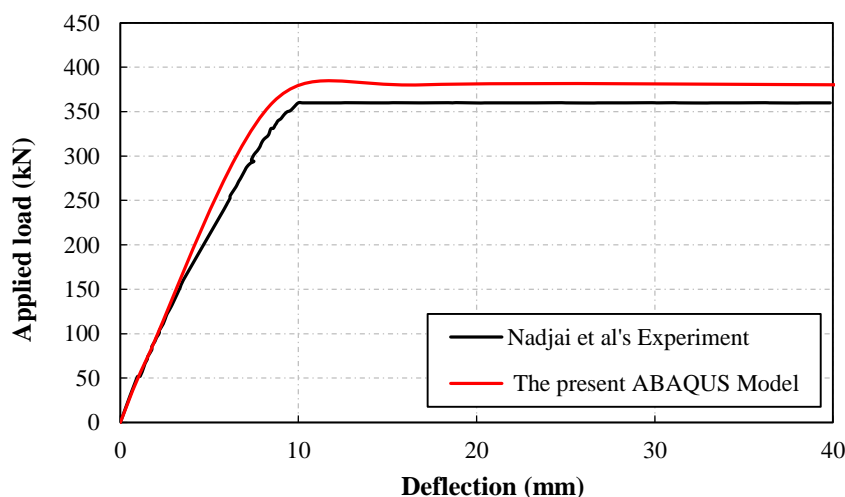
خصوصیات مصالح فولادی ST37			
$1.2 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$	ضریب انبساط حرارتی	7850 kg/m^3	چگالی
$600 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه	210 GPa	مدول الاستیسته
$45 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	ضریب رسانایی گرمایی	240 MPa	تنش جاری شدن
0.15	کرنش در لحظه گسیختگی	370 MPa	تنش گسیختگی
خصوصیات آرماتورهای فولادی			
$1.2 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$	ضریب انبساط حرارتی	7850 kg/m^3	چگالی
$600 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$	ظرفیت گرمایی ویژه	210 GPa	مدول الاستیسته
$45 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	ضریب رسانایی گرمایی	460 MPa	تنش جاری شدن
0.15	کرنش در لحظه گسیختگی	600 MPa	تنش گسیختگی
خصوصیات مصالح بتنی C35			
$1 \times 10^{-5} \text{ C}^{-1}$	ضریب انبساط حرارتی	2500 kg/m^3	چگالی
$1000 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$	گرمای ویژه	20 Gpa	مدول الاستیسته
$1.9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	ضریب رسانایی گرمایی	35 MPa	مقاومت فشاری نهایی بتن
0.0035	کرنش در لحظه گسیختگی	3.5 MPa	مقاومت کششی بتن

نرخ افزایش حرارت در آزمایش ندجای و همکاران بر اساس نرخ حرارت دهی ISO834 [۱۹] انجام شده است. ترموکوپل‌های نصب شده میزان حرارت وارد شده به سطح زیر دال بتنی و سطوح تیر فولادی را اندازه‌گیری کرده‌اند به همین دلیل در نرم‌افزار آباکوس از نرخ بارگذاری حرارتی مطابق شکل ۱۱ استفاده شده است.

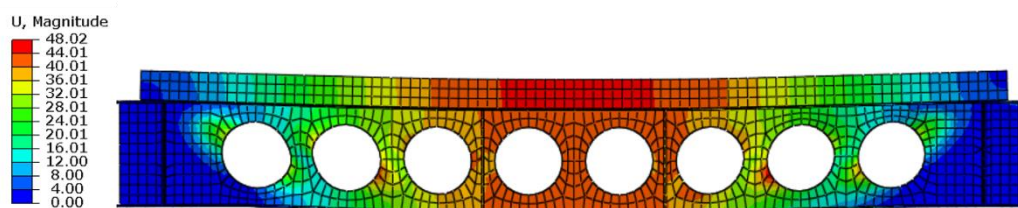


شکل ۱۱ بارگذاری حرارتی در نظر گرفته شده در نرم افزار آباکوس مطابق با شرایط آزمایشگاهی [۲۳]

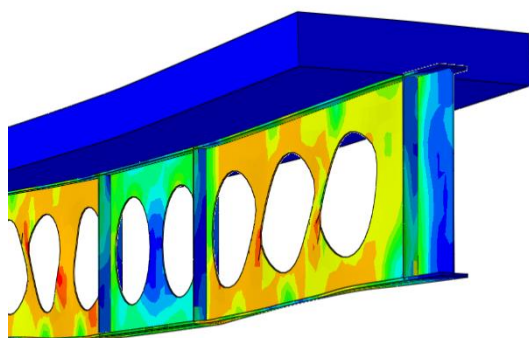
نتایج آزمایشگاهی و عددی منحنی نیرو-جابجایی نمونه مورد بررسی A1 تحت بارگذاری یکنواخت تغییر مکان کنترل در شکل ۱۲- الف آورده شده است. با توجه به نتیجه آزمایشگاهی بارگذاری بر روی نمونه تا زمانی انجام شده است که سختی سقف مرکب نمونه A1 (شیب مماس بر منحنی نیرو - جابجایی) صفر شود. علت اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی این است که مشخصات مصالح دقیقاً همان مصالحی نیستند که در ساخت نمونه استفاده شده است، شرایط مرزی در نظر گرفته شده در تحلیل به صورت ایده آل در واقعیت نیست. تأثیر تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری اجزای اتصال به دلیل نبود اطلاعات دیده نشده است. به دلیل مشخص نبودن مشخصات مکانیکی جوش در مدل سازی از مدل کردن جوش صرف نظر شده است. چنین عواملی باعث به وجود آمدن اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی می شود. در شکل ۱۳ تغییر شکل نمونه آزمایشگاهی A1 و کانتورهای تنش‌ها به منظور بررسی مودهای خرابی تحت بارگذاری یکنواخت نشان داده شده است.



شکل ۱۲ مقایسه نتایج بار-تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی A1 [۲۳] و نتایج عددی تحقیق حاضر



(الف)

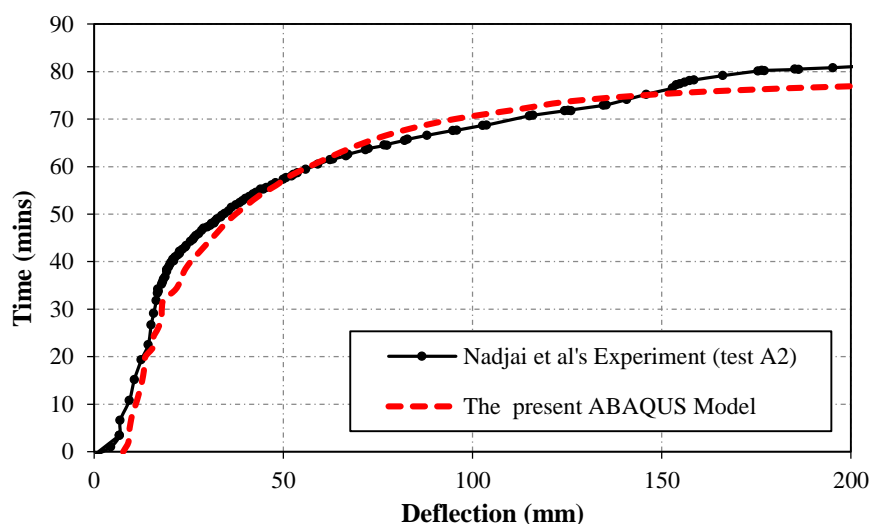


(ب)



شکل ۱۳ تغییر شکل های ایجاد شده در نمونه A1، الف) توزیع میزان جابجایی تحت اثر بارگذاری تغییر مکان کنترل و ب) مودهای خرابی ایجاد شده در حالت آزمایشگاهی و عددی

نتایج آزمایشگاهی و عددی منحنی زمان-جابجایی نمونه مورد بررسی A2 تحت بارگذاری حرارتی در شکل ۱۴ آورده شده است. با مقایسه بین دو نمودار پاسخ به دست آمده از روش المان محدود و آزمایشگاهی تا جابجایی ۲۰۰ میلی متر، انطباق قابل قبولی در رفتار آنها مشاهده می گردد. مود های خرابی دیده شده در آزمایشگاه و نتایج عددی در شکل ۱۵ نشان دهنده این است که مدل سازی انجام شده از صحت قابل قبولی برخوردار است.

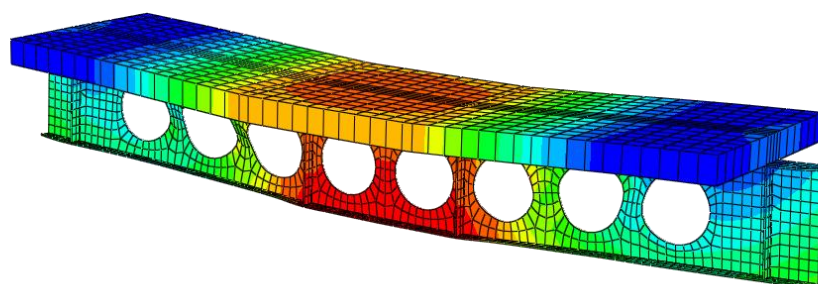
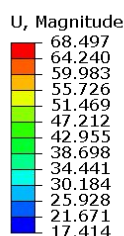


شکل ۱۴ مقایسه نتایج بار-تغییر مکان نمونه آزمایشگاهی A2 [۲۳] و نتایج عددی تحقیق حاضر

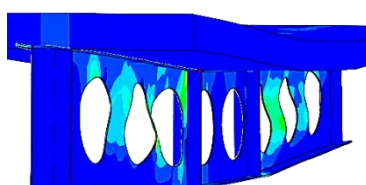
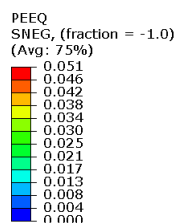
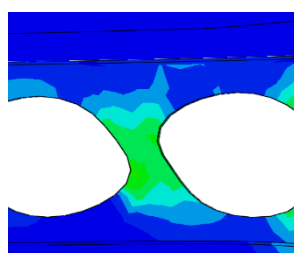
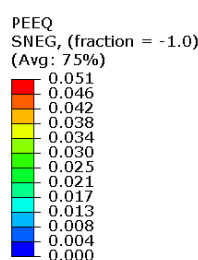
۴- تحلیل و بررسی سقف مرکب ساختمان مورد مطالعه

بعد از مشخص شدن توانایی بالای روش اجزا محدود در شبیه سازی رفتار سقف‌های مرکب در آتش‌سوزی در ادامه به تحلیل و بررسی سقف‌های ساختمان مسکن مهر پرداخته شده است. دتایل اجرایی سقف مرکب با تیر لانه‌زنبوری اجرا شده در ساختمان مسکن مهر در شکل ۱۶ و شکل ۱۷ و همچنین جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت دال بتنی ۱۰ سانتی‌متر است. برش گیرها به فاصله ۳۰ سانتی‌متری از یکدیگر اجرا شده‌اند. سایز تیر های لانه زنبوری به کار رفته در ساخت سقف های مرکب CPE20 و CPE22 است.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و تحلیل‌های حرارتی در بخش بعدی و مشابه بودن دتایل های اجرای سقف طبقات، سقف‌های مرکب در دو ناحیه Zone 1 و Zone 2 در طبقات بحرانی یازدهم و دوازدهم مورد بررسی قرار گرفتند که پلان‌های سقف‌های مورد بررسی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که Zone 2 و Zone 3 مشابه یکدیگر هستند.

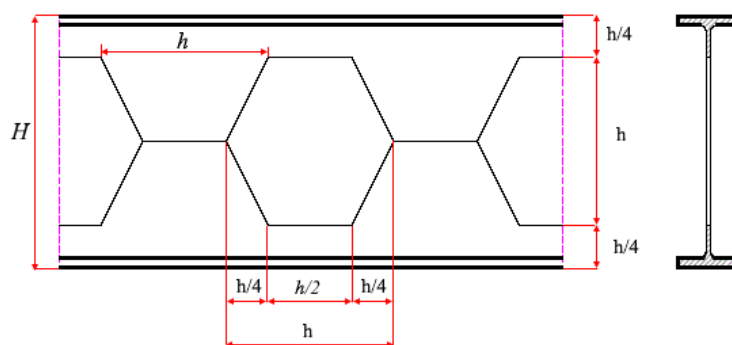


(الف)



(ب)

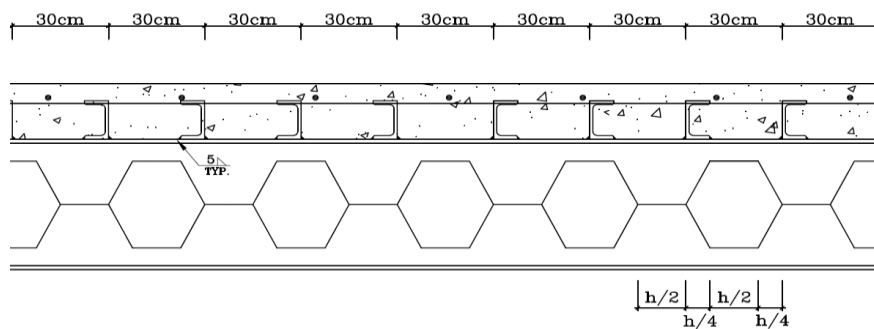
شکل ۱۵ تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه A2، الف) توزیع میزان جابجایی تحت اثر بارگذاری ثقلی و حرارتی و ب) مودهای خرابی ایجاد شده در حالت آزمایشگاهی و عددی



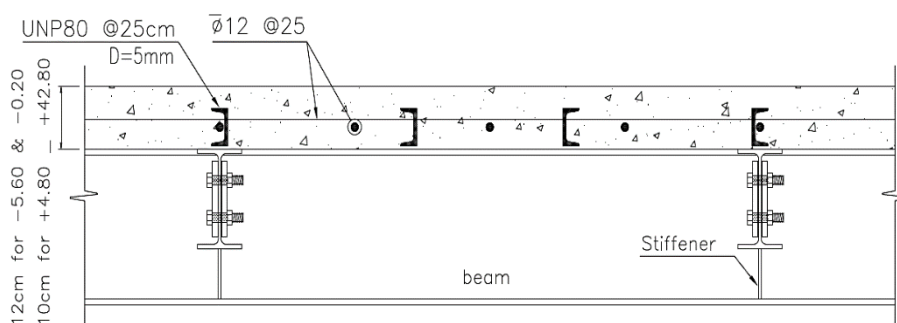
شکل ۱۶ مشخصات هندسی تیر لانه زنبوری

جدول ۳ مشخصات هندسی تیرهای لانه زنبوری

t	s	H	h	CPE
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
۸/۵	۵/۶	۳۰۰	۲۰۰	۲۰
۹/۲	۵/۹	۳۳۰	۲۲۰	۲۲

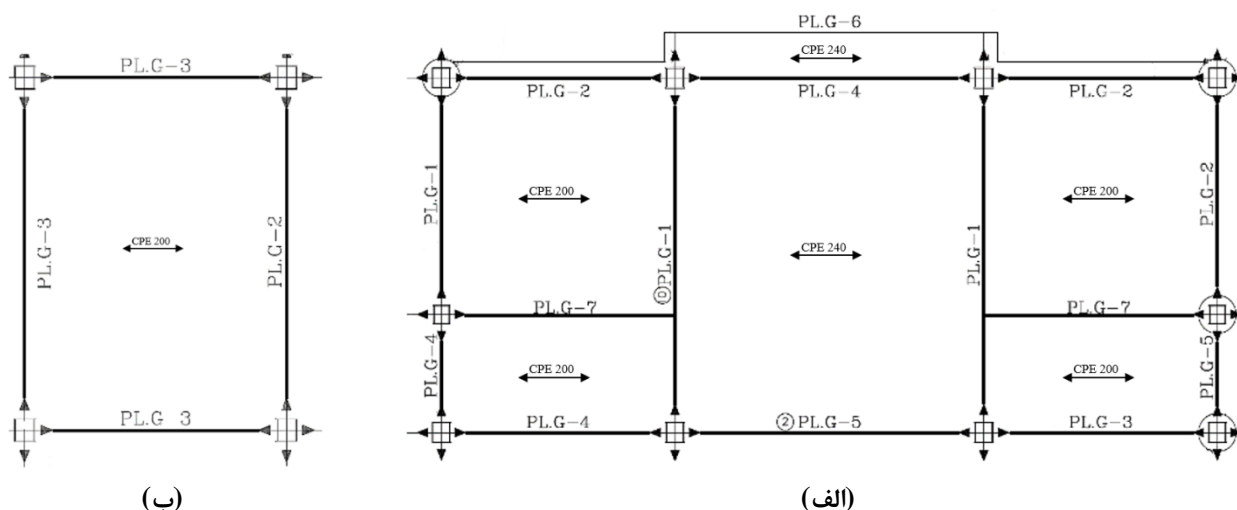


(الف)



(ب)

شکل ۱۷ دتایل اجرایی سقف مرکب اجرا شده در ساختمان مسکن مهر، (الف) تیر لانه زنبوری و (ب) در محل اتصال به تیرهای اصلی

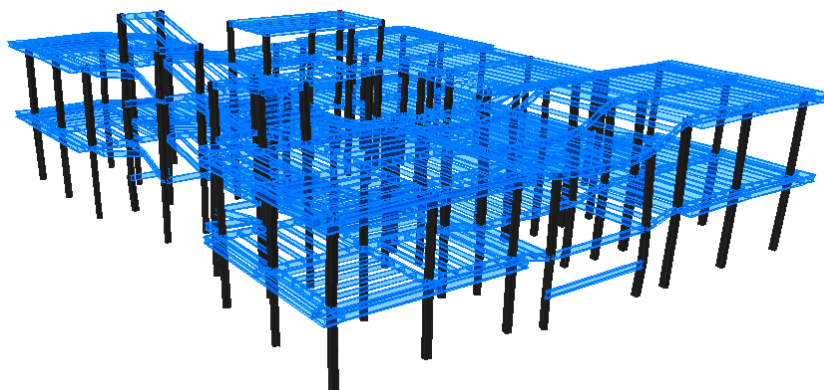


شکل ۱۸ پلان تیر ریزی سقف مرکب طبقات در ناحیه‌های بحرانی الف (zone 1) و ب (zone 2)

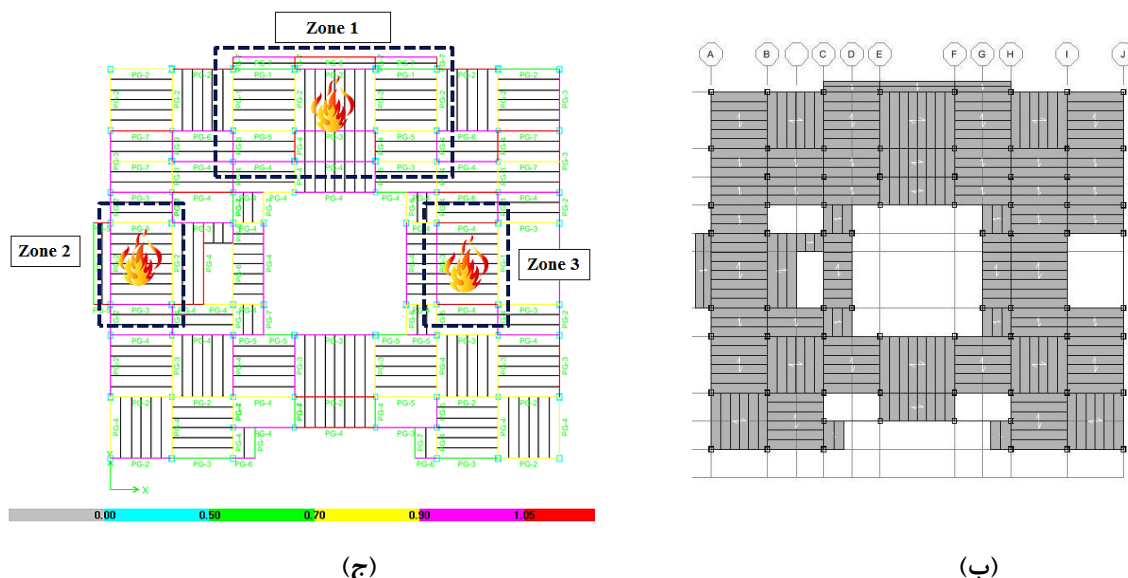
۴-۱- شناسایی دهانه‌های بحرانی

در این قسمت برای ارزیابی سقف‌های مرکب، ساختمان موردنظر از دو نظر مدل ماکرو و میکرو مورد بررسی گرفت. در ابتدا با کمک نرم‌افزار ایتبس با مدل‌سازی ماکرو، چشمه‌های بحرانی شناسایی شدند و سپس پس از شناسایی چشمه‌های بحرانی با کمک نرم‌افزار آباکوس چشمه‌های بحرانی به کمک مدل‌سازی میکرو مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۱۹). به‌منظور ارزیابی رفتار سقف‌های ساختمان مسکن مهر در ابتدا به کمک نرم‌افزار ایتبس تحلیل حرارتی انجام شد تا دهانه‌های بحرانی شناسایی شوند. دهانه‌های بحرانی، دهانه‌های هستند که احتمال خرابی در آن دهانه تحت اثر آتش‌سوزی بیشتر از سایر دهانه‌های دیگر است. پس از شناسایی، دهانه‌های بحرانی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند و مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه رفتار فولاد تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به‌صورت خطی است و افت مقاومت و سختی در رفتار فولاد دید نمی‌شود می‌توان به کمک آنالیز حرارتی در نرم‌افزار ایتبس نحوه فروریزش سقف‌ها و جابجایی‌ها ایجاد شده را پیش‌بینی کرد.

تحلیل‌های حرارتی انجام شده در نرم‌افزار ایتبس در شکل ۱۹ نشان داده شده است. چشمه‌های بحرانی بر اساس حداکثر خیز و حداکثر نسبت نیاز به ظرفیت شناسایی شدند. با توجه به اینکه سیستم سازه‌ای ساختمان قاب خمشی ویژه است ابعاد تیرها در طبقات پایین‌تر بیشتر از طبقات بالاتر است و همین‌طور با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در نرم‌افزار ایتبس، خرابی سقف‌های طبقات بالاتر بیشتر است. ناحیه بحرانی طبقات ۱۱ و ۱۲ در شکل ۱۹- ج آورده شده است.



(الف)



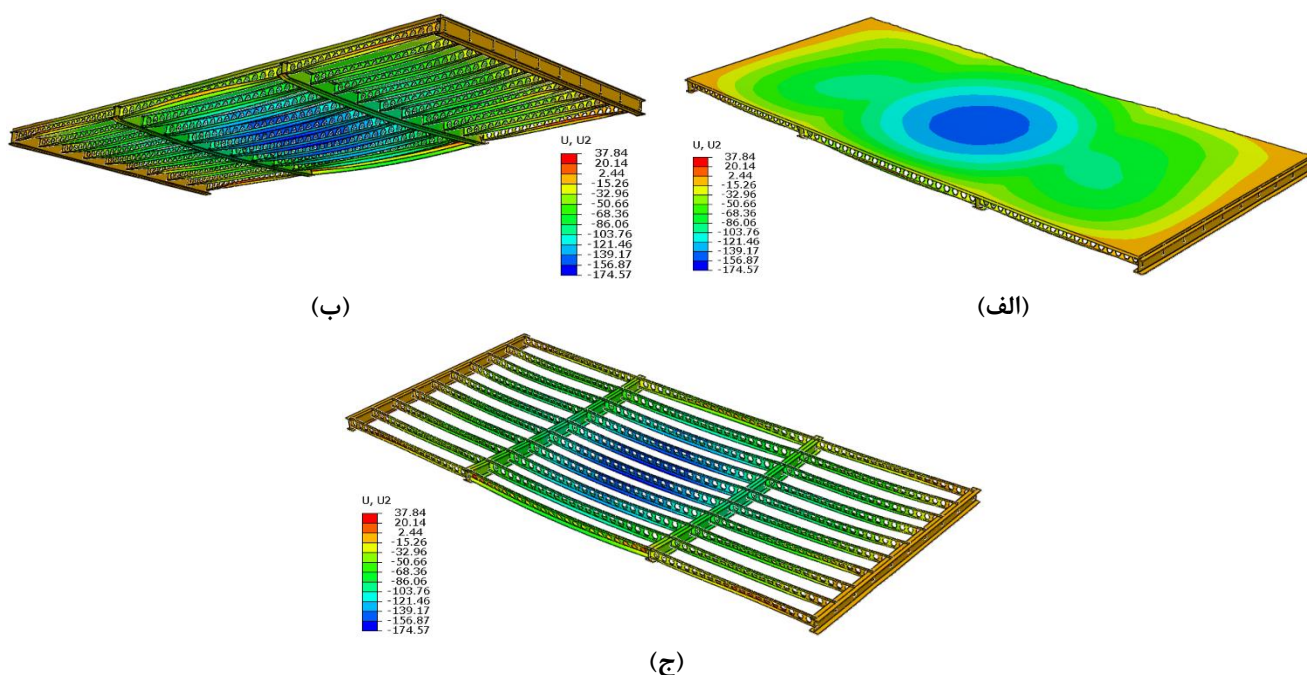
(ب)

(ج)

شکل ۱۹ مشخص کردن دهانه های بحرانی از طریق حداکثر میزان جابجایی و میزان تنش الف) تاثیر درجه حرارت ۱۰۰ سلسیوس بر طبقات یازدهم و دوازدهم، ب) پلان سقف طبقه یازدهم و دوازدهم و ج) انجام تحلیل حرارتی در نرم افزار ایتبس تا دمای ۱۰۰ سلسیوس

۲-۴- بررسی نتایج تحلیل اجزا محدود سقف مرکب

در این بخش ابتدا تحلیل استاتیکی غیرخطی با استفاده از نرم افزار آباکوس بر روی Zone 1 انجام شد (شکل ۲۰) و سپس با انجام تحلیل کوپله دینامیکی رفتار سقف های مرکب ناحیه های مورد نظر تحت آتش سوزی تعیین شده است. در شکل ۲۱ نتیجه های حاصل از تحلیل در قالب نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما ارائه شده است. اگر خیزهای ایجاد شده در المان های خمشی ساختمان (مثل تیرها و دال های بتن آرمه) کنترل نشده و از خیز مجاز فراتر روند، خرابی های غیر سازه ای را به وجود خواهد آورد. این مورد علاوه بر نازیبایی فضای داخلی، احساس ایمنی ساکنین را سلب خواهد نمود. لذا در طراحی دال ها کنترل خیز مجاز بسیار حائز اهمیت است. به طوری که مهم ترین عامل تعیین ضخامت دال ها کنترل خیز مجاز آن هاست.



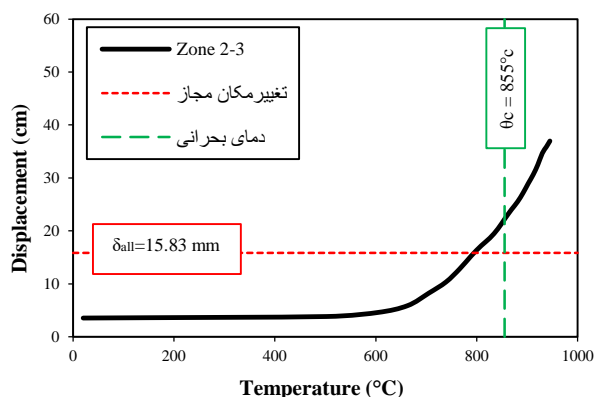
(الف)

(ب)

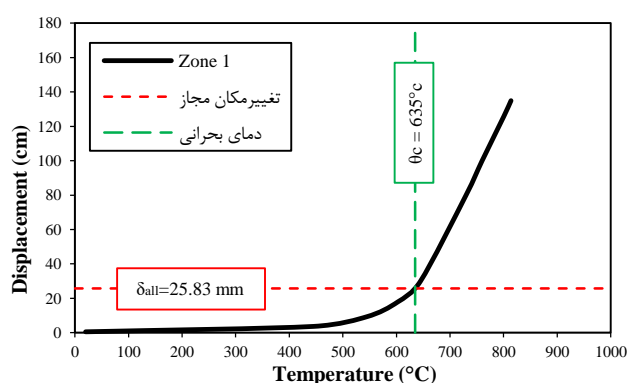
(ج)

شکل ۲۰ تغییر شکل‌های به وجود آمده در Zone 1 در اثر آتش‌سوزی (بر حسب mm)

مطابق آیین‌نامه مبحث دهم خیز مجاز در سقف‌های مرکب در اثر بار زنده $L/360$ و خیز مجاز در اثر بار زنده و مرده $L/240$ است. لذا با محاسبه میزان خیز مجاز و تعیین محل برخورد خیز مجاز با منحنی دما-جابجایی دما و زمان بحرانی در دهانه بحرانی محاسبه می‌شود. بر این اساس خیز مجاز برای Zone 1، $25/83$ میلی‌متر است. مطابق با نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما برای سقف مرکب Zone 1، پس از گذشت ۸ دقیقه از فلاش آور دمای بحرانی برابر 635 درجه سلسیوس می‌شود. خیز مجاز برای Zone 2-3، $15/83$ میلی‌متر است. مطابق با نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما برای سقف مرکب Zone 2-3، پس از گذشت ۳۳ دقیقه از فلاش آور دمای بحرانی برابر 855 درجه سلسیوس می‌شود.



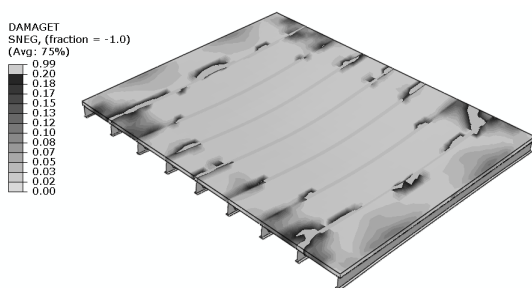
(ب)



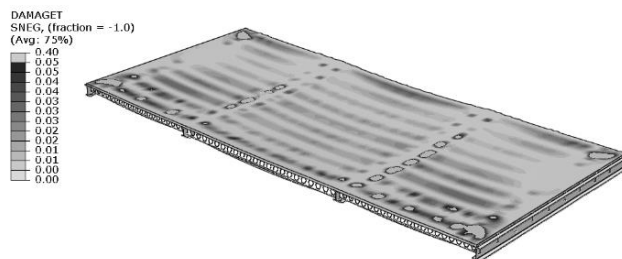
(الف)

شکل ۲۱ نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما بدست آمده از تحلیل‌های آباکوس الف) نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما برای سقف مرکب Zone 1 و ب) نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما برای سقف مرکب Zone 2-3

الگوی تشکیل ترک در دال سقف مرکب در اثر آتش‌سوزی در شکل ۲۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر آتش‌سوزی تیرهای لانه‌زنبوری مقاومت خود را از دست می‌دهند و دال بتنی در اثر عملکرد غشایی کششی توزیع بار ثقلی را به ستون‌ها منتقل می‌کند به همین دلیل در ابتدا ترک‌های بر روی تیرهای اصلی ایجاد می‌شود سپس بر روی تیرهای فرعی و در نهایت در اطراف ستون‌های گوشه به وجود می‌آید.



(ب)



(الف)

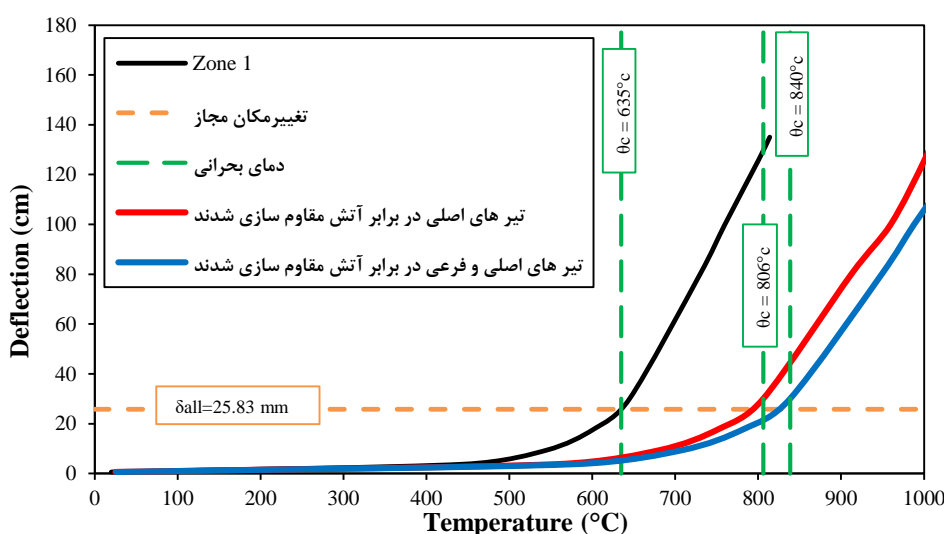
شکل ۲۲ الگوی تشکیل ترک خوردگی سقف مرکب Zone 1 و ب) الگوی تشکیل ترک خوردگی سقف مرکب Zone 2-3

۵- ارائه طرح های مقاوم سازی و هزینه ها

مقاوم سازی سازه ها به عنوان یکی از ارکان ایمنی ساختمان ها در برابر آتش از چند منظر قابل بررسی است. به عبارتی در صورت وقوع آتش سوزی در یک ساختمان، امکان خروج ساکنین در درجه اول حائز اهمیت است و پس از آن می بایستی امکان امداد رسانی توسط نیروهای آتش نشانی و اکیپ های امداد و نجات فراهم شود و در نهایت، پایداری ساختمان به عنوان سرمایه ملی می بایستی حفظ شود. مقاوم سازی سازه های فولادی در برابر آتش یکی از مقوله های مهم در صنعت ساختمان است. این امر در کنار تأمین سیستم های اعلام و اطفاء حریق می تواند تضمین کننده ایمنی ساختمان باشد. به منظور مقاوم سازی سقف های ساختمان مورد نظر در برابر آتش سوزی سه طرح کلی مورد بررسی قرار گرفت که در زیر به هر یک پرداخته می شود.

۵-۱- مقاوم سازی با پوشش ضد حریق

لزوم محافظت اسکلت ساختمان و سازه با پوشش ضد حریق سازه فولادی در برابر حریق به عنوان مهم ترین قسمت محافظت غیرعامل، باید مدنظر طراحان و محاسبان سازه قرار گیرد. اجرای پوشش ضد حریق سازه های فلزی از مهم ترین و کاربردی ترین روش های محافظت سازه در رشته مهندسی حریق به شمار می آید. در این روش بیشتر ستون ها و تیرهای اصلی سازه جهت محافظت قاب های سازه ای در مقابل حریق توسط پوشش ضد حریق سازه فولادی پوشش داده می شوند. با توجه به تحلیل های عددی انجام شده مشاهده می شود که استفاده از پوشش ضد حریق پایه سیمانی بر روی تیرهای اصلی نقش کلیدی نسبت تیرهای فرعی در هنگام آتش سوزی دارند (شکل ۲۳). پوشش ضد حریق پایه سیمانی با ضخامت ۳ سانتی متر از طریق مقطع کامپوزیت به المان های Shell اختصاص داده شد.



شکل ۲۳ بررسی مقاوم سازی ZONE1 با استفاده از پوشش ضد حریق پایه سیمانی

به منظور مقاوم سازی سقف های مرکب ساختمان مورد بررسی در برابر آتش سوزی استفاده از پوشش های ضد حریق می تواند یک گزینه مناسب باشد ولی در صورتی که استفاده از پوشش های ضد حریق مناسب است که توجه اقتصادی داشته باشد. پس از اینکه تیرهای فرعی مقاومت خود را از دست می دهند توزیع بارهای ثقلی توسط عملکرد غشایی کششی دال صورت می گیرد و با وجود از دست رفتن مقاومت تیرهای فرعی توزیع بارهای ثقلی از طریق تیرهای اصلی و عملکرد غشایی کششی دال انجام می شود. با توجه به این نکته اندود کردن تیرهای فرعی با استفاده از پوشش های ضد حریق توجه اقتصادی ندارد به همین دلیل ضد حریق کردن تیرهای اصلی کفایت می کند. با استفاده از فهرست بها اینپه سال ۹۸ مقاوم سازی سقف مرکب مسکن مهر با دو طرح مختلف و با توجه به نتایج

تحلیل‌های عددی برآورد قیمت شد. برآورد قیمت با توجه به جدول ۴ نشان می‌دهد در صورتی که روی عملکرد غشایی کششی دال اعتماد کنیم و از مقاوم‌سازی تیرهای فرعی صرف‌نظر کنیم و فقط تیرهای اصلی را با استفاده از پوشش‌های ضد حریق مقاوم‌سازی کنیم هزینه‌های مربوط به مقاوم‌سازی سقف‌های مرکب مسکن مهر نزدیک به ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند که نشان از یک طرح اقتصادی و کاربردی در مدت عمر مفید سازه است.

جدول ۴ محاسبه هزینه مقاوم‌سازی سقف‌های مرکب ساختمان مسکن مهر در برابر آتش

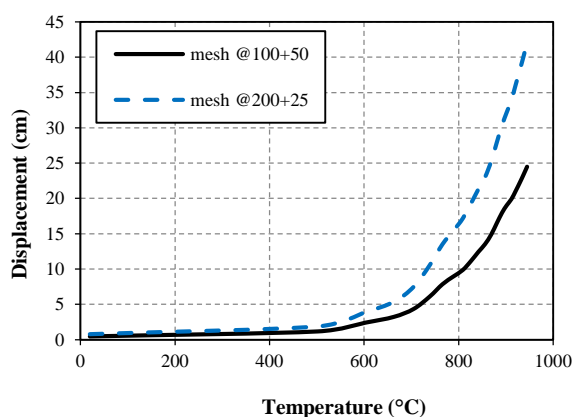
هزینه مقاوم‌سازی در برابر آتش، مجموع سقف‌های مرکب ساختمان مسکن مهر (تیرهای اصلی و تیرهای فرعی)	۱۳۹۶۵۷۶۷۰۳۵ ریال
هزینه مقاوم‌سازی در برابر آتش، مجموع سقف‌های مرکب ساختمان مسکن مهر (تیرهای اصلی) متکی بر عملکرد غشایی کششی دال	۷۲۵۶۹۰۴۰۳۳ ریال

مشخص شد که سقف مرکب فولادی نقش مهمی در افزایش مقاومت سقف در برابر تحمل بارهای ثقلی در هنگام آتش‌سوزی دارد که این موضوع توسط آزمون‌های انجام‌شده بر قسمتی و یا نواری از سقف‌ها ظاهر نمی‌شود. تیرهای محافظت نشده در اثر آتش‌سوزی مقاومت خود را از دست می‌دهند این امر سبب می‌شود که دال بتنی تغییر شکل دهد و توسط عملکرد میدان کشش بارهای ثقلی موجود را تحمل و به ستون‌ها منتقل کند. این اضافه مقاومت ظرفیت باربری را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. توسعه عملکرد غشای کششی دال بتنی در دو مرحله انجام می‌شود. در تغییر شکل‌های کم به دلیل المان‌های سازه‌ای مجاور دال و انبساط‌های حرارتی در دال بتنی عملکرد غشایی فشاری به وجود می‌آید در حالی که در تغییر شکل‌های زیاد در دال بتنی عملکرد غشایی کششی به وجود می‌آید و در وسط دال آرماتور به کشش می‌افتند و کناره‌های دال به فشار می‌افتند.

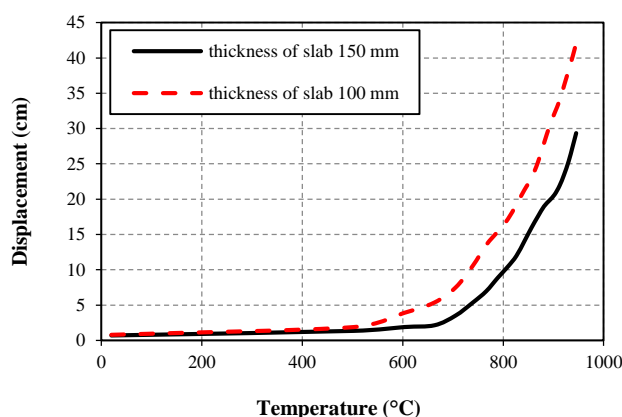
۵-۲- مقاوم‌سازی با افزایش ضخامت دال بتنی سقف مرکب موجود

در درجه حرارت ۸۰۰ درجه، ظرفیت سقف‌های مرکب تا حد بالایی به یکدیگر شباهت دارد. علت این مسئله در آن است که فولاد معمولی ساختمانی در دماهای ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه به‌سختی صفر می‌رسد و لذا در این دما تیرهای زنبوری سختی تقریباً برابر صفر دارند و کلیه فشار توسط دال بتنی تحمل می‌شود. پس می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که در یک سیستم ترکیبی مانند سقف مرکب با بالا رفتن حرارت نقش بخش بتنی پررنگ‌تر می‌شود. لذا به‌منظور مقاوم‌سازی می‌توان از دو رویکرد استفاده کرد. رویکرد اول: با افزایش ضخامت دال و افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن ظرفیت مقاومت سقف دال مرکب ساختمان موردبررسی را در برابر آتش‌سوزی را بهبود بخشید (شکل ۲۴-الف).

رویکرد دوم: با توجه به تأثیر موقعیت شبکه آرماتور در رفتار سقف‌های مرکب تحت اثر آتش‌سوزی پیشنهاد می‌شود فاصله شبکه آرماتورها به یکدیگر نزدیک‌تر باشند و نزدیک‌تر به سطح کف دال اجرا شوند به دلیل اینکه زمانی که دال بتنی وارد عملکرد غشایی کششی می‌شود کشش توسط میلگردها تحمل می‌شود. از این جهت این رویکرد هم جنبه طراحی دارد هم مقاوم‌سازی (شکل ۲۴-ب).



(ب)



(الف)

شکل ۲۴ مقاوم سازی با افزایش ضخامت دال بتنی سقف مرکب موجود، (الف) تأثیر افزایش ضخامت دال سقف‌های مرکب تحت اثر آتش‌سوزی و (ب) تأثیر موقعیت شبکه آرماتور سقف‌های مرکب تحت اثر آتش‌سوزی

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به روند رو به رشد شهرنشینی نیاز به مسکن به‌شدت در حال افزایش است. با توجه به این نکته ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه اهمیت بالایی دارد، در این بین در ایران ساخت سازه‌های فولادی به دلیل وزن کمتر و سرعت بالای ساخت طرفداران متعددی در بین سازندگان دارند. با توجه به وجود خطر دائمی آتش‌سوزی بررسی و رفتار سنجی این سازه‌ها در برابر آتش از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. با توجه به این مهم در این تحقیق سعی شده تا به نحو جامعی رفتار تیرهای کامپوزیت لانه‌زنبوری (دال بتنی با تیر لانه‌زنبوری) تحت آتش‌سوزی مورد بررسی قرار گیرند و سپس رفتار سقف‌های مرکب ساختمان مسکن مهر مورد بررسی قرار گرفت و طرح‌های مقاوم‌سازی بررسی شدند. چراکه این نوع سقف‌ها بالأخص در حال حاضر به‌شدت در ساختمان‌های فولادی بلندمرتبه در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور کسب نتایج دقیق در این تحقیق از روش اجزا محدود و نرم‌افزار قدرتمند ABAQUS [۱۶] استفاده شده است. مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی و با در نظر گرفتن کلیه جزئیات انجام شده است. به‌منظور تحلیل نمونه از تحلیل دینامیکی کوپله دما تغییر مکان و روش صریح استفاده شده است. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج حاصله از نرم‌افزار ابتدا با مقایسه نتایج یک نمونه آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تحلیل عددی توانایی نرم‌افزار به اثبات رسیده است. به منظور ارزیابی رفتار سقف‌های ساختمان مسکن مهر در ابتدا به کمک نرم‌افزار ایتبس تحلیل حرارتی انجام شد تا دهانه‌های بحرانی شناسایی شوند. دهانه‌های بحرانی دهانه‌های هستند که احتمال خرابی در آن دهانه تحت اثر آتش‌سوزی بیشتر از سایر دهانه‌های دیگر است. پس از شناسایی، دهانه‌های بحرانی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شدند و مورد بررسی قرار گرفتند و در آخر طرح‌های مقاوم‌سازی پیشنهاد می‌شود. با توجه به حیطة پژوهش نتایج نشان می‌دهند که:

روش اجزا محدود با دقت بالایی توانایی تعیین رفتار تیرهای کامپوزیت زنبوری در آتش را دارا است. بررسی نمودارهای نیرو تغییر مکان در حرارت‌های مختلف نشان می‌دهد که رفتار سازه کامپوزیت در آتش دارای دو فاز الاستیک خطی و پلاستیک با سخت‌شدگی می‌باشد. شیب فاز اول با افزایش حرارت کاهش می‌یابد و فاز دوم با افزایش حرارت از حالت منحنی شکل به حالت خطی تغییر شکل می‌دهد. در نمودارهای تغییر مکان زمان، بعد از رسیدن سازه به دمای بحرانی، تغییر مکان به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. از آنجا که سختی سقف مرکب به مدول الاستیسیته فولاد و بتن وابسته است، با افزایش دما مدول الاستیسیته فولاد و بتن کاهش پیدا کرده و متعاقباً سختی سقف مرکب کاهش یافته و سقف جابجایی‌های زیادی را تجربه می‌کند. با افزایش دما تا 600°C مدول الاستیسیته فولاد طبق شکل ۳-ب به میزان ۷۰٪ کاهش می‌یابد و در نهایت با افزایش بیشتر دما تا دمای بحرانی، سختی سقف مرکب به حدی کاهش می‌یابد که جابجایی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. در این لحظه نرم‌افزار آباکوس قادر به برقرار کردن معادلات تعادل برای سقف مرکب نبوده و از تحلیل خارج می‌شود.

به منظور مقاوم سازی سقف های مرکب ساختمان مسکن مهر پیشنهاد می شود با توجه به عملکرد غشایی کششی دال بتنی، از لحاظ اقتصادی اندود کردن تیرهای فرعی به پوشش های ضد حریق ضروری نیست و اندود کردن تیرهای اصلی کفایت می کند.

ناحیه ZONE1 مورد مطالعه از ساختمان مسکن مهر پس از ۸ دقیقه از فلاش آور آتش سوزی کاربری خود را از دست می دهد لذا توجه به این ناحیه بحرانی اهمیت ویژه ای دارد.

در صورت اعتماد به عملکرد غشایی کششی دال و صرف نظر از مقاوم سازی تیرهای فرعی، استفاده از پوشش ضد حریق برای تیرهای، هزینه های مربوط به مقاوم سازی سقف های مرکب مسکن مهر نزدیک به ۵۰ درصد کاهش پیدا می کند که نشان از یک طرح اقتصادی و کاربردی در مدت عمر مفید سازه است.

جهت بررسی اثر ضخامت دال سقف های مرکب تحت اثر آتش سوزی، ضخامت دال بتنی از ۱۰۰mm به ۱۵۰mm داده شد و طی این فرایند تغییر مکان سقف مرکب با ضخامت بیشتر به میزان قابل توجهی کاهش یافت به طوریکه در دمای ۶۰۰°C از ۳/۹cm به ۱/۹cm و در دمای ۹۴۵°C از ۴۰cm به ۲۹cm کاهش یافت. همچنین جهت بررسی اثر موقعیت شبکه آرماتور سقف های مرکب تحت اثر آتش سوزی دو شبکه آرماتور در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که با نزدیک تر شدن فاصله شبکه آرماتورها به یکدیگر تغییر مکان سقف مرکب کاهش یافت به طوریکه در دمای ۶۰۰°C از ۳/۹cm به ۲/۴cm و در دمای ۹۴۵°C از ۴۲cm به ۲۴cm کاهش یافته است.

سقف های دال مرکب ساختمان مسکن مهر به گونه ای طراحی شده اند که در هنگام آتش سوزی دچار فروریزش نمی شوند و به دلیل خیز قابل توجه در هنگام آتش سوزی کاربری خود را از دست می دهند. پیش بینی فروریزش ساختمان مورد مطالعه در هنگام آتش سوزی را می توان به دلیل از دست دادن مقاومت و سختی ستون ها و اتصالات در هنگام آتش سوزی بررسی کرد.

مراجع

- [1] Ada, M., Sevim, B., Yuzer, N., & Ayvaz, Y. (2018). Assessment of damages on a RC building after a big fire. *Advances in concrete construction*, 6(2), 177-197.
- [2] Naik, T. R. (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(2), 98-103.
- [3] Keong, N. C. (2020). *assessment of externally bounded fibre reinforced polymer strengthening reinforced concrete beams at elevated temperature using finite element modelling* (Doctoral dissertation, University Teknologi Malaysia).
- [4] Hertz, K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Magazine of Concrete Research*, 57(8), 445-453.
- [5] Lin, W. M., Lin, T. D., & Powers-Couche, L. J. (1996). Microstructures of fire-damaged concrete. *Materials Journal*, 93(3), 199-205.
- [6] McCloud, T. S., Storz, S. A., Wylezinski, A., Reichard, R. P., & Lewit, S. M. (2019). *U.S. Patent No. 10,329,763*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [7] Ye, J., Chen, W., & Wang, Z. (2017). Fire-resistance behavior of a newly developed cold-formed steel composite floor. *Journal of Structural Engineering*, 143(6), 04017018.
- [8] Mohan, G. G., Upadhyay, A., & Kaushik, S. K. (2006). Assessment of longitudinal shear strength parameters of composite slab by artificial neural network. *Building and housing*, Volume (7), 287-300.
- [9] Selamet, S., & Yolaçan, T. F. (2017). Steel Frame-Concrete Slab Composite Floor Fire Resistance Experiment. *Teknik Dergi*, 28(3), 8007-8022.
- [10] Li, G. Q., Zhang, N., & Jiang, J. (2017). Experimental investigation on thermal and mechanical behaviour of composite floors exposed to standard fire. *Fire Safety Journal*, 89, 63-76.
- [11] Zaharia, R. (2011). Numerical model for steel-concrete composite slab in fire, considering the membrane effect. *Buletinul Institutului Politehnic din lasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 57(3), 141.
- [12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2005). EN1994-1-2: Eurocode 4; design of composite steel and concrete structures-part 1-2: general rules-structural fire design.
- [13] Nguyen, T. T., & Tan, K. H. (2017). Behaviour of composite floors with different sizes of edge beams in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 129, 28-41.
- [14] Stadler, M. (2012). Design of composite slab systems in case of fire using simplified finite element analyses (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- [15] Habibullah, A. (1992). ETABS users manual. *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, USA.
- [16] Manual, A. U. (2010). *Dassault Systems Simulia Corporation*. Providence USA.

- [17] EN 1993-1-2. (2005). *Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design*. British Standards Institution.
- [18] EN 1992-1-2. (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings*. British Standards Institution.
- [19] ISO, I. (1999). *834: Fire resistance tests-elements of building construction*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [20] Hendy, C. R., & Smith, D. A. (2007). *Designers' Guide to EN 1992-2: Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 2: Concrete Bridges* (Vol. 17). Thomas Telford.
- [21] AISC Committee. (2010). *Specification for structural steel buildings* (ANSI/AISC 360-10). American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois.
- [22] Kwasniewski, L., Bacinskas, D., Geda, E. & Couto, C. (2011). 2.1. *Analyses of structures under fire*. University of Technology, Poland.
- [23] Nadjai, A., Vassart, O., Ali, F., Talamona, D., Allam, A., & Hawes, M. (2007). Performance of cellular composite floor beams at elevated temperatures. *Fire safety journal*, 42(6-7), 489-497.