

Numerical Study of Prestressed Concrete Joist Slab System Under Fire Conditions

Freydoon Rezaie^{1*}, Newsha Sayad Sedgh Herfeh²

1- Associate Professor, BU-ALI SINA University, Hamedan, Iran.

2- M.Sc. Student, BU-ALI SINA University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

Due to the large number of fire and the resulting financial and human costs, it is necessary to prevent the roof from collapsing as one of the key members of the building during a fire. Because concrete has an inherent weakness in tensile stress, cracking in the tensile area of slabs is inevitable. On the other hand, in a system of prestressed concrete joist slab system, the tensile area of the concrete is usually completely eliminated or effectively reduced, and the performance of the floor can be expected to improve under fire conditions. The critical temperature was obtained and compared in 9 samples that differed in the amount of prestressing force, strength and concrete cover as well as the span length. The thermal load was applied to the studied samples according to the ISO 834-1 standard protocol. The temperature distribution across the slab was applied uniformly and incrementally and the failure states in the model were predicted and verified with laboratory results. The results showed that the prestressing force has the greatest effect and the span length has the least effect on decreasing or increasing the critical temperature index. Changing the prestressing parameter from zero to 600 and 1120 MPa, increases the critical temperature index by 20 and 43% and changing the beam length parameter from the initial value of 4.5 m to 6 and 7.5 m, decreasing the critical temperature index by 1 and 2%, respectively. Changing the parameter of concrete cover from 20 mm to 10 and 30 mm has caused a decrease and increase of critical temperature index by 11 and 9%, respectively. Also, in all samples, the same failure mode occurred in the middle of the joist in a bending manner.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 September 2021

Revise Date: 21 July 2022

Accept Date: 01 August 2022

Keywords:

Fire

Numerical study

Prestressing force

Prestressed concrete joist

Critical temperature Concrete cover

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.305003.2575>

*Corresponding author: Freydoon Rezaie.

Email address: frezaie@basu.ac.ir

مطالعه عددی سیستم دال با تیرچه بتنی پیش تنیده تحت شرایط آتش

فریدون رضایی^{۱*}، نیوشا صیاد صدق حرفه^۲

۱- دانشیار، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

با توجه به آمار بالای آتش‌سوزی و هزینه‌های مالی و جانی ناشی از آن، جلوگیری از فروریزش سقف به عنوان یکی از اعضای اساسی در ساختمان، به هنگام آتش‌سوزی ضروری است. از آنجا که بتن دارای ضعف ذاتی در کشش می‌باشد، ترک خوردگی در ناحیه کششی دال‌ها اجتناب ناپذیر است. از طرف دیگر در سیستم دال‌های با تیرچه پیش‌تنیده، معمولاً ناحیه‌ی کششی بتن بکلی حذف و یا به صورت موثری کاهش می‌یابد و می‌توان انتظار داشت که عملکرد سقف تحت شرایط آتش بهبود یابد. در این پژوهش رفتار عددی دال بتنی ساده با سیستم تیرچه بتنی پیش‌تنیده یک طرفه تحت شرایط آتش بررسی شد. دمای بحرانی در ۹ نمونه که در مقدار نیروی پیش‌تنیدگی، مقاومت و پوشش بتن و همچنین طول دهانه با یکدیگر تفاوت داشتند، به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شد. بار حرارتی بر اساس پروتکل استاندارد ISO 834-1 به نمونه‌های مورد مطالعه اعمال شد. توزیع دما در سراسر دال به صورت یکنواخت و افزایش‌دهنده اعمال شد و حالت‌های خرابی در مدل پیش‌بینی شده و با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیروی پیش‌تنیدگی بیشترین تاثیر و طول دهانه کمترین تاثیر را بر کاهش و یا افزایش شاخص دمای بحرانی دارد. به این صورت که تغییر پارامتر میزان پیش‌تنیدگی از صفر به ۶۰۰ و ۱۱۲۰ مگاپاسکال سبب افزایش شاخص دمای بحرانی به مقدار ۲۰ و ۴۳ درصد و تغییر پارامتر میزان تیرچه از مقدار اولیه ۴/۵ متر به ۶ و ۷/۵ متر به ترتیب سبب کاهش شاخص دمای بحرانی به مقدار ۱ و ۲ درصد شده است. تغییر پارامتر میزان پوشش بتن از ۲۰ میلی‌متر به ۱۰ و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب سبب کاهش شاخص دمای بحرانی به مقدار ۱۱ و ۹ درصد گردیده است. همچنین در تمامی نمونه‌ها مود شکست یکسان و به صورت خمشی در وسط دهانه تیرچه رخ داد.

کلمات کلیدی: آتش، مطالعه عددی، نیروی پیش‌تنیدگی، تیرچه پیش‌تنیده، دمای بحرانی، پوشش بتنی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.305003.2575
۱۴۰۰/۰۷/۰۵	۱۴۰۱/۰۴/۳۰	۱۴۰۱/۰۵/۱۰	۱۴۰۱/۰۵/۱۰	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2022.305003.2575
*نویسنده مسئول:		فریدون رضایی			
پست الکترونیکی:		frezaie@basu.ac.ir			

۱- مقدمه

رفتار سازه‌های بتنی به هنگام آتش‌سوزی به دلیل تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بتن، بسیار متفاوت‌تر از زمانی است که در درجه حرارت معمولی قرار می‌گیرند [۳،۲۰۱]. به دلیل کاهش مقاومت بتن در دماهای بالا، مقاومت و پایداری نهایی سازه به‌طور چشم‌گیری کاهش یافته و در صورتی که آتش در زمان مناسب کنترل و خاموش نگردد، باعث تخریب و فروریزش سازه می‌شود. در سازه‌های پیش‌تنیده، به دلیل نقش مهم فولادهای پیش‌تنیدگی و بتن پرمقاومت در رفتار آنها، نگرانی‌های بیشتری را در مورد عملکرد در برابر آتش ایجاد کرده است [۵،۴]. یکی دیگر از نگرانی‌ها، اتلاف شدید پیش‌تنیدگی در فولادهای پیش‌تنیدگی در دمای بالا در اعضای بتن آرمه است. در این راستا نیاز به اطمینان از پوشش بتنی مناسب برای کنترل میزان پیش‌تنیدگی و ایمنی سازه در برابر آتش است [۶]. همچنین پژوهش‌های متعددی بر روی ظرفیت باقی‌مانده سازه‌های پیش‌تنیده بعد از سرد شدن و با استفاده از مطالعات عددی انجام شده است [۷]. لذا در جهت شناخت دقیق‌تر رفتار سازه‌های بتن‌آرمه در دماهای بالا، لازم است رفتار و مشخصات مکانیکی مصالح و مدل‌های ریاضی اثراتی همچون جمع‌شدگی و خزش ارائه شود [۸]. در اعضای خمشی، وجود منطقه کششی وسیع ترک خورده می‌تواند اثر آتش را تحت تاثیر قرار دهد. در طراحی و ساخت تیرهای بتنی پیش‌تنیده به نحوی عمل می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که تنش کششی بتن در قسمت تحتانی تیر، تحت اثر بارهای بهره‌برداری از مدول گسیختگی بتن فراتر نرود [۹].

کارلسن (۱۹۶۲)، اولین مجموعه گزارشات مربوط به نتایج آزمایش‌های آتش استاندارد بر روی ۱۸ تیر I شکل پیش‌تنیده پیش‌کشیده را ارائه و تحلیل کرد. متغیر اصلی در این تحقیق ضخامت پوشش بتنی کابل‌ها بود. این ضخامت برای بتن معمولی و بتن سبک مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. اعضای سازه‌ای تحت حرارت تمایل به منبسط شدن دارند. انبساط حرارتی اعضا به نسبت گیردار بودن محل تکیه‌گاه و یا در اثر سختی ناشی از اعضای مجاور محدود می‌شود. محدود شدن انبساط حرارتی توسط بسیاری از آزمایش‌های آتش بررسی شده است و طبق داده‌ها، تاثیر مهمی بر رفتار اعضای سازه در طی آتش‌سوزی دارد [۱۱]. دال‌های پیش‌تنیده، از جمله اعضای سازه‌ای حساس در برابر آتش هستند. نتایج آزمایش بر روی دال‌های بتنی پیش‌تنیده نشان داده است که مقاومت در برابر آتش با افزایش پوشش بتنی و کاهش بارگذاری ثقلی بهبود می‌یابد [۱۲،۱۳]. در آزمایش‌های آتش بر روی دال بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده چسبیده توسط بیل و الوبادی (۲۰۰۸)، پارامترهای دیگری از جمله شرایط مرزی دال (مفصلی یا گیردار)، نوع سنگدانه آن (آهکی و یا سیلیسی) و همچنین نوع غلاف مورد استفاده (پلاستیکی و یا فولادی) نیز مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها خیز دال‌های با سنگدانه سیلیسی، به علت بالاتر بودن ضریب انبساط حرارتی، بیشتر از دال‌های با سنگدانه آهکی بود. دال‌های گیردار در مقایسه با دال‌های مفصلی، خیز کمتری داشتند. در آزمایش‌های آتش، ترک‌هایی موازی با مسیر کابل‌ها، به علت تنش حرارتی اتفاق افتاد. همچنین در نتیجه‌ی آب شدن غلاف پلاستیکی در دمای ۲۳۰ درجه سلسیوس، دمای کابل در دال‌های با غلاف پلاستیکی، به دلیل خروج آب از گروت، از دال‌های با غلاف فولادی بیشتر بود و دال‌های با غلاف فولادی خیز بیشتری نسبت به دال‌های با غلاف پلاستیکی داشتند [۱۴]. همچنین این محققین، رفتار عددی دال بتنی یک طرفه پس‌کشیده چسبیده را با استفاده از مدل المان محدود غیرخطی بررسی کردند. این مدل، خواص غیرخطی مکانیکی و حرارتی مصالح اجزای مختلف دال، از جمله بتن و کابل‌ها را در نظر گرفته بود. علاوه بر این، اندرکنش بین گروت و کابل نیز با اطمینان از اینکه مقطع کابل در طی تغییرشکل دال بدون تغییر باقی بماند، در مدل در نظر گرفته شد. توزیع دما در دال همراه با توزیع تنش و خیز در دال تحت حرارت قرار گرفته، توسط مدل پیش‌بینی شد و با نتایج آزمایش آن‌ها صحت‌سنجی شد [۱۵]. مطالعه پارامتری بر روی تاثیر نوع سنگدانه، نوع غلاف، میزان بار، شرایط تکیه‌گاهی و سناریوهای متفاوت آتش‌سوزی انجام شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقاومت در برابر آتش ارائه شده توسط استاندارد اروپا و استاندارد بریتانیا برای طراحی دال بتنی پیش‌تنیده پس‌کشیده چسبیده یک طرفه تحت شرایط آتش قابل قبول می‌باشد [۱۵].

سپس در سال ۲۰۰۹، توسط بیلی و الوادی مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل رفتار دال‌های بتنی پس‌کشیده غیرچسبیده نیز در شرایط آتش، با استفاده از مدل المان محدود انجام شد. تفاوت نمونه‌های این مطالعه با تحقیقات قبلی، در عدم استفاده از گروت در دال‌های پیش‌تنیده پس‌کشیده بود تا دال‌ها به صورت غیرچسبیده مدل‌سازی شوند. نتایج این مدل‌سازی نشان داد، ضرایب انبساط حرارتی که در حال حاضر در آیین‌نامه‌های اروپایی استفاده می‌شود، ممکن است منجر به پیش‌بینی‌های نادرست در مورد رفتار سازه شود. همچنین مطالعه پارامتری برای بررسی تاثیر نوع سنگدانه، نسبت بار و شرایط مرزی بر رفتار سازه‌ها انجام شد و نشان داده شد تغییر شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها بر مقاومت در برابر آتش تاثیر بسیار زیادی دارد. همچنین نوع سنگدانه و نسبت بار بر روی پاسخ‌های زمان-جابجایی تاثیر دارد [۱۷، ۱۶]. در رابطه با انبساط حرارتی در اعضای سازه‌ای، بویژه در اعضای مرکب فولادی-بتنی، پژوهشی توسط معمارزاده و همکاران در سال ۲۰۲۱ نیز انجام گردید [۱۸]. در این راستا تحقیقات دیگری بر روی عملکرد ساختمان‌ها در برابر آتش نیز انجام شد [۲۰، ۱۹]. در مطالعه انجام شده توسط بنگر و شاه‌منصوری در سال ۲۰۲۱، رفتار فشاری بتن با مصالح لاستیکی محصور شده توسط لوله‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه ۳۰ نمونه با درصد‌های مختلف جایگزینی پلاستیک به جای سنگدانه در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد، افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سلسیوس تاثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن ندارد، در حالی که افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سلسیوس باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری می‌گردد. همچنین نشان داده شد، افزایش دما به همراه افزایش درصد جایگزینی مصالح لاستیکی باعث افزایش کرنش در نمونه‌ها می‌شود [۲۱].

اثر آتش بر روی پارامترهای مختلف بر پاسخ‌های دینامیکی و حرارتی و برش دال‌های سوراخ دار پس‌کشیده نیز مطالعه شده است [۲۲- ۲۵]. نتایج نشان داد پوشش بتنی و میزان بار تاثیر زیادی بر مقاومت در برابر آتش این دال‌ها دارند. داده‌های حاصل از آزمایش‌های آتش نشان داد که پوسته پوسته شدن بتن منجر به خرابی دال می‌شود و با افزایش پیش‌تنیدگی وسعت ناحیه پوسته پوسته شدن بتن افزایش می‌یابد. همچنین ضخامت دال و الگوی بارگذاری تاثیر زیادی بر مود شکست دارند و تحت یک سناریوی مشخص شکست دال‌ها می‌تواند از طریق شکست برشی قبل از رسیدن به شکست خمشی رخ دهد. مطالعه مشابهی بر روی تاثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باقی مانده، پاسخ‌های مکانیکی و حرارتی، پیوستگی و برش تیرهای پیش‌تنیده چسبیده تحت شرایط آتش انجام شده است [۲۶، ۲۷]. نتایج نشان داد، تغییرات این پارامترها تاثیر مهمی بر مقاومت در برابر آتش این تیرها دارد و مقاومت در برابر آتش تیرهای دو سر گیردار به طرز قابل توجهی بیشتر از تیرهای مفصلی است.

مطالعه عددی مقاومت در برابر آتش دال‌های در معرض آتش هیدروکربن، که یک سناریوی آتش محتمل در تونل، پارکینگ‌ها و تاسیسات شیمیایی است، نشان داد که مقاومت در برابر آتش در آتش‌سوزی هیدروکربن ۲۲/۴ درصد کمتر از زمانی است که دال در معرض آتش استاندارد ISO 834-1 قرار می‌گیرد [۲۸]. در سال ۲۰۱۸، ژو و همکاران اثر آتش بر تیرهای مرکب پیوسته پیش‌تنیده را با استفاده از تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند. به این منظور مدلی المان محدود برای پیش‌بینی رفتار این تیرها در حرارت‌های بالا ساخته و با آزمایش‌های آتش صحت‌سنجی شد. در ادامه مطالعات پارامتری شامل تاثیر مقدار بار، میزان پیش‌تنیدگی، قطر کابل‌ها و همچنین طول دهانه بر مقاومت در برابر آتش انجام گرفت. نتایج این مطالعات نشان داد، میزان بار تاثیر زیادی در مقاومت در برابر آتش تیرهای مورد بررسی دارد [۲۹]. همچنین در سال ۲۰۲۰، بررسی عملکرد پل‌های بتنی پیش‌تنیده در آتش هیدروکربن توسط سانگ و همکاران نشان داد، افزایش پوشش بتنی و همچنین افزایش بار تاثیر زیادی بر مقاومت در برابر آتش این پل‌ها دارد. به این منظور مدلی المان محدود غیرخطی سه بعدی ساخته شد و برای مدل‌سازی اثرات آتش، از دمای استاندارد کوره ISO 834-1 استفاده شد. همچنین مطالعه‌ی پارامتری با تغییر میزان بار، نیروی پیش‌تنیدگی، پوشش بتنی روی کابل‌ها و همچنین تغییر مقدار و جهت آتش، انجام شد [۳۰].

حیدری و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی احتمالاتی مقاومت در برابر آتش دالی بتن‌آرمه با تکیه‌گاه ساده بر پایه روش مونت کارلو پرداختند. نتایج نشان داد که زمانی که دال با تمام موارد ایمنی طراحی شده باشد (سیستم‌های تشخیص آتش و اسپرینکلر، مسیر

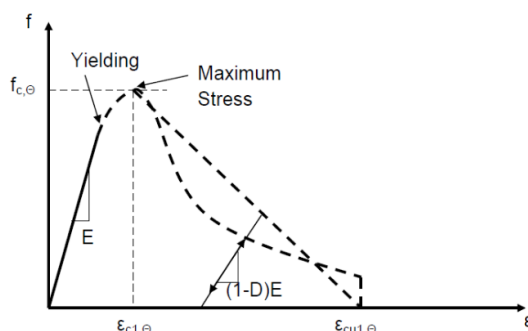
دسترسی ایمن و دستگاه‌های اطفاء حریق در دسترس باشند) احتمال خرابی ۰/۳ درصد است. در دسترس نبودن سیستم‌های اسپرینکلر منجر به ۱ درصد احتمال خرابی می‌شود [۳۱]. عدم وجود سیستم‌های تشخیص و اسپرینکلر احتمال خرابی را به ۸ درصد افزایش می‌دهد. کنزیاک و همکاران در سال ۲۰۱۹، میزان آسیب ناشی از آتش سوزی دال بتنی یک مرکز خرید را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، روش‌های تعمیر اعضایی که به طور قابل توجهی آسیب دیده بودند، در نظر گرفته شد. تقویت دال با استفاده از سازه فولادی اضافی به عنوان روشی کارآمدتر از ترمیم جزئی دال آسیب دیده پیشنهاد شد [۳۲]. ژو و همکاران در سال ۲۰۲۰، پژوهشی در زمینه بررسی آزمایشگاهی مقاومت در برابر آتش دال‌های بتنی پیش‌ساخته دو طرفه مرکب با شرایط مرزی مختلفی را انجام دادند. در این آزمایش‌ها هیچ‌گونه ناپیوستگی بین دال پیش‌ساخته و لایه بتنی فوقانی درجا مشاهده نشد، اما ترک‌هایی در محل‌های مهار نشده دال مرکب ایجاد شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر آتش به دلیل اثرات گیرداری (۱۹۵ دقیقه به جای ۱۳۰ دقیقه) در صورت اعمال بار یکسان (۱۹۵ کیلونیوتن) بود [۳۳]. بولینا و همکاران در سال ۲۰۲۱، به تجزیه و تحلیل حرارتی دال‌های بتنی عرشه فولادی در مواقع آتش‌سوزی پرداختند. توزیع دما در مقطع دال‌های بتنی عرشه فولادی در برابر آتش از سه روش مختلف تجربی، عددی و تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت. در این مطالعه رویکرد تحلیلی جدیدی برای ارزیابی دمای میلگرد منفی و ضرایب جدیدی برای ارزیابی عملکرد عایق حرارتی جهت اعمال در استاندارد یوروکد پیشنهاد شده است [۳۴]. هوا و همکاران در سال ۲۰۲۲، در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، آسیب ناشی از آتش بر روی پوشش بتنی تونل‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه الگوی ترک، نحوه‌ی پوسته‌شدن بتن، تغییر رنگ لایه بتنی، نتایج آزمایش‌های غیرمخرب و تغییر شکل‌ها در حین آتش‌سوزی و پس از سرد شدن بررسی گردید [۳۵].

معمولاً به هنگام آتش‌سوزی شعله‌های آتش در اثر عمل انتقال حرارت با حرکتی عمودی به طرف بالا رانده می‌شود و با رسیدن به سقف ساختمان به صورت افقی توسعه یافته و درجه حرارت در زیر سقف و نزدیک به شعله‌ها به سرعت بالا می‌رود. بنابراین، رفتار سقف به عنوان عضوی که وظیفه تحمل و انتقال بارهای ثقلی و جانبی را داشته و معمولاً به هنگام آتش‌سوزی در مقایسه با دیگر اجزای ساختمان سریع‌تر در معرض حرارت ناشی از شعله‌های آتش قرار می‌گیرد، اهمیت داشته و نقش آن از جهت حفظ پایداری در حرارت‌های بالا و همچنین جلوگیری از سرایت آتش اهمیت دو چندان می‌یابد. در این پژوهش برای اولین بار، رفتار دال‌های تیرچه و بلوک با تیرچه‌های بتنی پیش‌تنیده پیش‌کشیده تحت شرایط آتش با هدف شناخت بیشتر رفتار این نوع دال مرکب در دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از مشخصات فنی و هندسی تیرچه‌های شرکت بتن پیش‌فشرده ایران استفاده گردید. برای تحلیل رفتار این نوع دال‌ها، دالی ساده با یک دهانه در نظر گرفته شد و رفتار دال سقف و تیرچه‌ها شامل تنش، کرنش و خیز در طی آتش بررسی گردید. همچنین تاثیر طول تیرچه، نیروی پیش‌تنیدگی موثر، پوشش و مقاومت بتن مورد بررسی پارامتری قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

ابتدا با صحت‌سنجی یک دال پیش‌تنیده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، پارامترهای موثر بر رفتار تیرچه پیش‌تنیده در حرارت مورد بررسی قرار داده شد. از دو گام برای بررسی رفتار تحت بار حرارتی استفاده شده است. در گام اول، بارگذاری بصورت حرارتی و در گام بعدی بارگذاری بصورت بار ثقلی دال اعمال گردید و بارگذاری بصورت حرارتی مطابق استاندارد ISO 834-1 اعمال گردید. برای اعمال اندرکنش بین کابل و بتن از حالت سطح به سطح و با ضریب اصطکاک ۰/۵، که در مطالعه بیلی و الوبادی (۲۰۰۸) [۱۴] پیشنهاد شده بود، استفاده گردید. شرایط مرزی دال ساده اعمال شده و تاریخچه بارگذاری طبق الگوی پیشنهاد شده توسط استاندارد اروپا [۳۶] انتخاب گردید. این تاریخچه بصورت دمای افزایشی به مدل‌ها اعمال گردید. در این پژوهش از مدل ساختاری پلاستیسیته بتن آسیب دیده استفاده شده است و پارامترهای مربوط به رفتار تنش-کرنش فشاری، کششی و پارامترهای سطح پلاستیسیته تعریف گردید. در نرم‌افزار آباکوس برای تعریف رفتار پلاستیک بتن، پلاستیسیته، رفتار فشاری و رفتار کششی تعریف شده است. در این تحقیق، برای تعیین نمودار تنش-کرنش فشاری بتن در دمای معمولی و دماهای بالا از مدل تنش-کرنش مندرج در استاندارد اروپا [۳۶] استفاده شده است. در منحنی تنش-کرنش بتن (شکل ۱)، با داشتن مقاومت فشاری بتن، در هرگام تنش معادل با کرنش برای هر دما محاسبه شده و توسط نرم‌افزار

آباکوس شاخص خرابی بتن D محاسبه و براساس آن از رابطه $E(1-D)$ مدول الاستیسیته جدید بتن محاسبه و در مدل اعمال شده است.



شکل ۱: رفتار تنش-کرنش فشاری بتن در دماهای مختلف [۳۶]

طیف وسیعی از المان‌ها در آباکوس قابل استفاده است که از این جهت توانایی بسیار زیادی به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسایل را مدل کرده و تحلیل نماید. در این مطالعه برای بررسی کرنش‌های حرارتی ایجاد شده در المان، اختصاصاً از المان C3D20RT استفاده شده است که می‌تواند کرنش‌های حرارتی را نیز در المان مدل نماید. این المان دارای ۱۱ درجه آزادی در هر گره می‌باشد. برای نشان دادن تغییرات دقیق متغیرهایی همچون تنش و جابجایی، از المان‌های مکعبی شش وجهی (Solid) استفاده شده است. مش بندی درشت از مقطع، نتایج غیرمحافظة کارانه با خطای زیادی در خروجی‌ها نمونه‌های مدلسازی شده را می‌دهد. همچنین استفاده از مش بندی بسیار ریز، وقت گیر و غیراقتصادی است. مؤثرترین روش برای بررسی ابعاد مش بندی مناسب، این است که تحلیل با اندازه‌های مش مختلف را انجام داده و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد. با مقایسه نتایج، مش بندی به ابعاد ۲۰ میلی‌متر مناسب تشخیص داده شد.

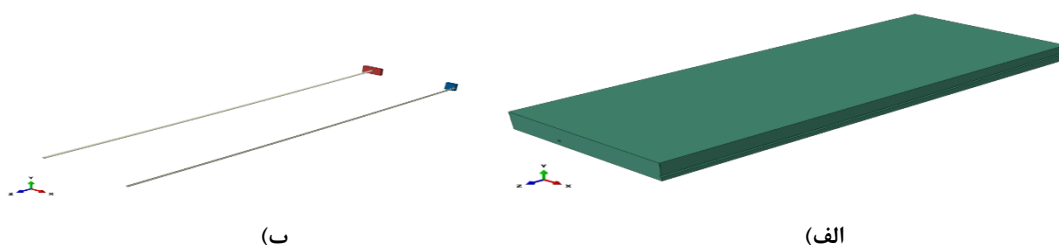
۲-۱- صحت سنجی

به منظور بررسی صحت روش مدل سازی، دال بتنی پیش تنیده آزمایش شده توسط بیلی و الوبادی (۲۰۰۸) انتخاب شد [۱۴]. این دال دارای ابعاد ۱۶۰۰×۴۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر و دارای ۳ کابل پیش تنیدگی به قطر $۱۵/۷$ میلی‌متر با فاصله ۵۳۰ میلی‌متر از یکدیگر و با انحنا در طول است (شکل ۲). به طوری که ارتفاع کابل‌ها در ابتدا و انتهای دال ۸۰ میلی‌متر و در وسط دال ۴۲ میلی‌متر است. کابل‌ها توسط صفحات مهارکننده در انتهای مقطع مهار شده‌اند. این آزمایش‌ها، شامل دو دسته‌ی آزمایش‌های محیطی و آزمایش‌های آتش بودند. در آزمایش‌های محیطی، دال‌ها با تکیه گاه ساده تا گسیختگی بارگذاری شده بودند، در حالی که در آزمایش‌های آتش، دال‌ها تحت بار استاتیکی ثابت $۷۸/۳$ کیلونیوتن قرار گرفته بودند. این بار به صورت آزمایش ۴ نقطه بر ورق‌های فولادی نشیمن‌گاهی به ابعاد $۱۶۰۰ \times ۳۵۰ \times ۴۰$ میلی‌متر به دال اعمال شده بود. همچنین نیروی پیش تنیدگی ۱۶۹ کیلونیوتن به کابل‌ها اعمال شده بود [۱۴].



شکل ۲: قالب دال پیش‌تنیده پیش از بتن ریزی [۱۴]

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی، نمونه TB2 مربوط به آزمایش محیطی با مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه ۴۰ مگاپاسکال و نمونه TB5 مربوط به آزمایش آتش با مقاومت فشاری ۳۵/۳ مگاپاسکال انتخاب و مدل‌سازی شد و نتایج آن با مطالعه آزمایشگاهی مقایسه گردید (شکل ۳). همچنین فولاد مورد استفاده در کابل‌ها از نوع فولاد پرمقاومت با مقاومت تسلیم ۱۸۴۶ مگاپاسکال بود.

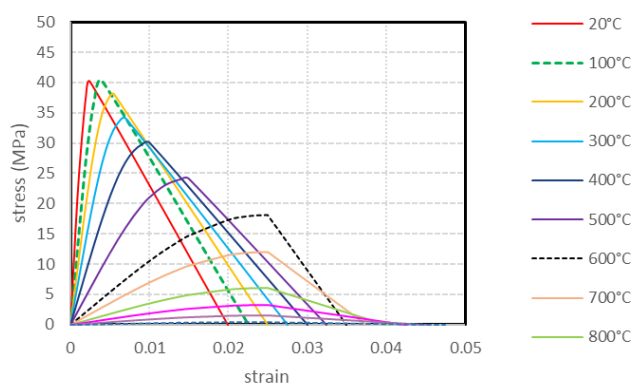


شکل ۳: هندسه مدل صحت‌سنجی در آباکوس (الف) دال بتنی ساده (ب) کابل‌های پیش‌تنیده

در آزمایش‌های آتش در محدوده ۳/۲ متر میانی دهانه، دال طبق منحنی استاندارد دما-زمان ISO 834-1 حرارت داده شد. در این مرحله برای تحلیل دمایی، داده‌های گرمایی مصالح تعریف شد. چگالی بتن و فولاد در همه دماها ثابت و به ترتیب ۲۴۰۰ و ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض گردید. گرمای ویژه و هدایت گرمایی بتن طبق روابط ارائه شده در استاندارد اروپا در نظر گرفته شد [۳۶]. گرمای ویژه و هدایت گرمایی فولاد نیز مطابق با روابط استاندارد اروپا منظور شد [۳۷].

در مرحله بعد ویژگی‌های مکانیکی بتن در دماهای بالا به مدل تخصیص یافت. در همین راستا مدول الاستیسیته بتن، مطابق با ضرایب کاهش در استاندارد اروپا در دماهای بالا محاسبه شد. ضریب پواسون بتن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ۰/۲ در نظر گرفته شد که تا دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد این مقدار ثابت است. اما با افزایش دما تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، این نسبت تا حدود ۰/۱ به صورت خطی کاهش یافته و پس از آن نیز تا مقدار صفر تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد روند کاهش خطی دارد [۳۹، ۳۸].

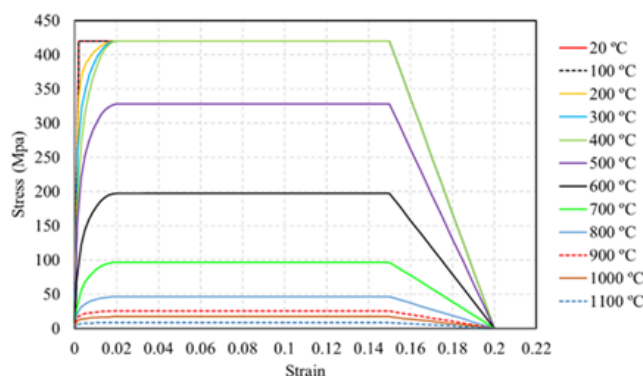
در این تحقیق، برای تعیین نمودار تنش-کرنش فشاری بتن در دمای معمولی و دماهای بالا، از مدل تنش-کرنش مندرج در استاندارد اروپا استفاده شد. مطابق شکل (۴)، رفتار بتن در این مدل تا حدود ۰/۴ برابر تنش فشاری ماکزیمم به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود [۳۷].



شکل ۴: نمودار تنش-کرنش بتن در دماهای بالا برای بتن با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال [۳۷]

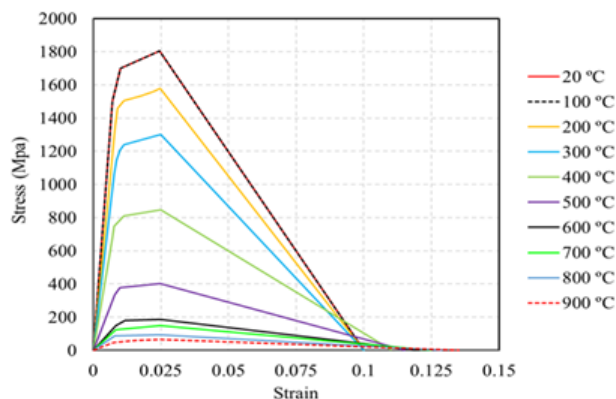
در دماهای بالا نیز رفتار کششی بتن وابسته به دما می‌باشد، به این ترتیب که مقاومت کششی بیشینه و سختی الاستیک بتن با افزایش دما کاهش می‌یابد. در این تحقیق، با توجه به اینکه سختی الاستیک بتن در فشار و کشش یکسان فرض گردید، بنابراین سختی کششی بتن با افزایش دما مطابق با همان روابط ذکر شده در قسمت بتن در فشار کاهش یافت. از طرفی مقاومت کششی بتن در دمای معمولی در حدود ۰/۱ مقاومت فشاری آن در نظر گرفته شد که با ضرایب کاهشی استاندارد اروپا، با افزایش دما کاهش یافت [۳۷].

در دمای معمولی، رفتار فولاد نسبتاً ساده بوده و نمودار تنش-کرنش مشخص دارد. فولاد در محدوده پلاستیک و قبل از نرم‌شوندگی، سخت‌شوندگی کوچکی را تا حدود تنش نهایی تحمل می‌کند. این رفتار فولاد وابسته به دما است. کاهش در مقاومت و سختی فولاد از دماهای کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود. در دماهای بیشتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت نهایی فولاد کاهش چشم‌گیری داشته و با افزایش بیشتر دما، رفتار فولاد به شدت شکل‌پذیر و غیرالاستیک می‌شود. جهت تعیین روابط تنش-کرنش فولاد در دماهای بالا نیز از آیین‌نامه استاندارد اروپا مطابق شکل (۵) استفاده شد. مدول الاستیسیته فولاد نیز صرف نظر از مقاومت آن در دمای معمولی ۲۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد و این مقدار در دماهای بالا براساس ضرایب کاهش استاندارد اروپا کاهش داده شد [۳۷].



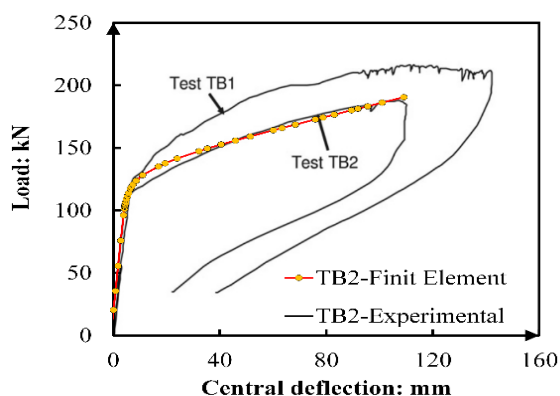
شکل ۵: نمودار تنش-کرنش فولاد در دماهای بالا [۳۷]

در این تحقیق از آنجا که کابل‌ها از نوع فولاد پرمقاومت بودند، برای مدل‌سازی رفتار فولاد پرمقاومت در دماهای بالا، نیز از نمودارهای شکل (۶) استفاده شد [۴۰].

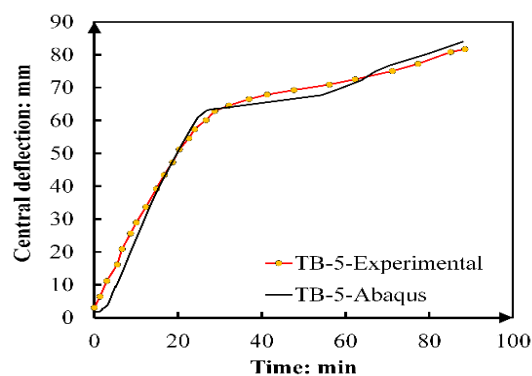


شکل ۶: رفتار تنش-کرنش فولاد پیش تنیدگی در دماهای بالا با مقاومت تسلیم ۱۸۰۰ مگاپاسکال [۴۰]

پس از تکمیل کلیه مراحل مدل‌سازی و تعریف تمامی پارامترهای مورد نیاز، برای نمونه آزمایش محیطی و تحت شرایط آتش نمودارهای مکان - زمان به صورت شکل (۷) به دست آمد. این نمودارها در مقایسه با نتایج آزمایشی و مدل تحلیل عددی مقاله مورد بررسی دقت خوبی را نشان دادند. همچنین مطابق با شکل‌های (۸) و (۹) جابه‌جایی وسط دهانه در مدل مطابق با نتایج آزمایشگاهی به دست آمد.

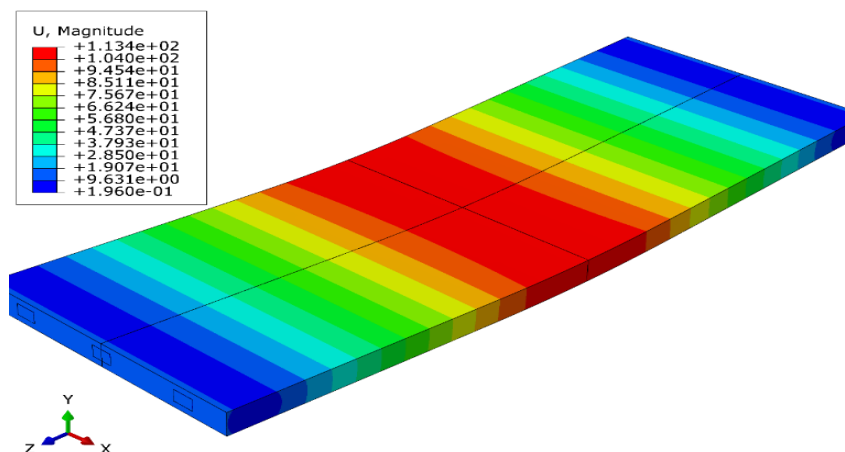


(ب)



(الف)

شکل ۷: مقایسه نتایج عددی با مطالعه آزمایشگاهی: الف) نمونه محیطی ب) نمونه تحت شرایط آتش



شکل ۸: مدل سازی و کانتور جابه جایی نمونه TB2



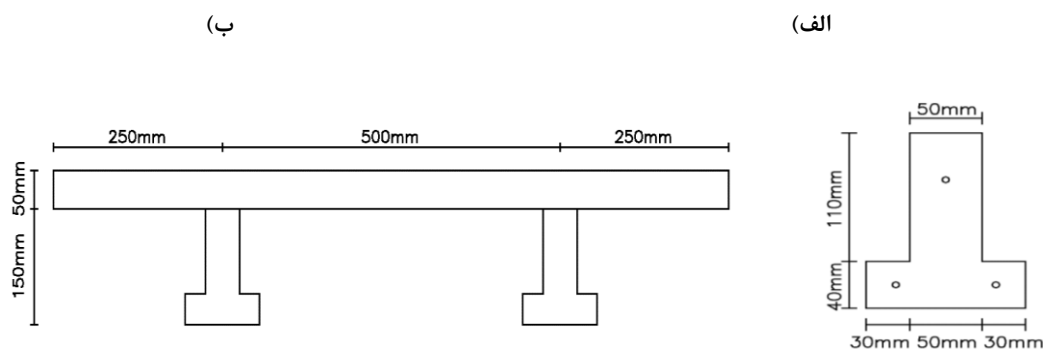
شکل ۹: تغییر شکل دال در مطالعه آزمایشگاهی نمونه TB2 [۱۴]

۲-۲- مدل سازی دال با تیرچه پیش تنیده

به منظور بررسی رفتار دال با تیرچه پیش تنیده تحت شرایط آتش، مقطع مرکب مطابق شکل (۱۰)، شامل دو تیرچه پیش تنیده و یک دال بتنی مدل سازی شد. عرض دال برابر یک متر، با فاصله محور تا محور تیرچه‌ها برابر ۵۰۰ میلی‌متر و ضخامت دال ۵۰ میلی‌متر منظور شد. ارتفاع کل مقطع مرکب ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

مقطع تیرچه‌های پیش تنیده، به صورت T شکل وارونه و دارای ۳ وایر بودند. عرض پاشنه ۱۱۰ میلی‌متر، ضخامت پاشنه ۴۰ میلی‌متر، عرض جان در قسمت فوقانی ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع کل تیرچه ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در تیرچه مرکز ثقل اولین ردیف وایرها (۲ وایر) به فاصله ۲۰ میلی‌متر از وجه تحتانی قرار داشت. مرکز ثقل دومین ردیف تک کابل به فاصله ۱۱۰ میلی‌متر از وجه تحتانی قرار گرفته بود.

مقاومت فشاری بتن تیرچه ۴۵ مگاپاسکال، بر اساس مشخصات سازنده تیرچه پیش تنیده (شرکت تیرچه پیش تنیده ایران) و بتن دال ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. مقاومت تسلیم فولاد معمولی استفاده شده در شبکه دال نیز ۴۰۰ مگاپاسکال منظور شد. همچنین فولاد پیش تنیدگی از نوع فولاد پرمقاومت به صورت کابل با قطر اسمی ۵ میلی‌متر (مساحت ۱۹/۶ میلی‌متر مربع)، مقاومت کششی ۱۷۲۵ مگاپاسکال، مدول ارتجاعی ۱۹۶۵۰۰ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم ۹۰ درصد مقاومت کششی با وادادگی کم بود [۴۱].



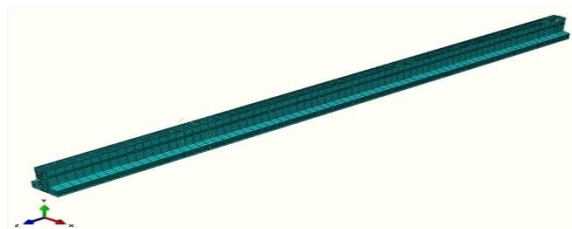
شکل ۱۰: مقاطع مدل سازی شده: الف) مقطع تیرچه پیش تنیده ب) مقطع دال مرکب

نیروی پیش تنیدگی با در نظر گرفتن ۲۰ درصد افت برابر با ۱۱۲۰ کیلونیوتن و به صورت فشاری به کابل‌ها اعمال شد [۴۲]. بارگذاری گسترده یکنواخت برابر با مقدار بار مرده به علاوه ۲۰ درصد بار زنده و بارگذاری چهار نقطه‌ای به صورت ۰/۱ مقاومت خمشی مقطع مرکب در نظر گرفته شد [۴۳]. همچنین حرارت مطابق با استاندارد ISO 834-1 از زیر دال اعمال شد [۴۴].

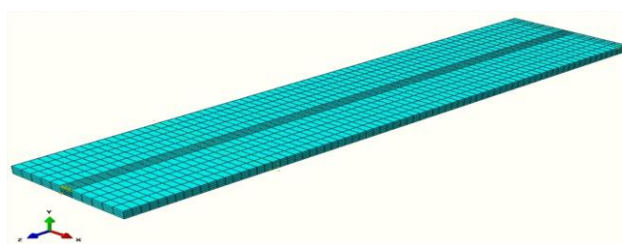
هندسه‌ی مدل شده و مش بندی شده این اجزا در شکل (۱۱) نمایش داده شده است:



(ب)



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: مدل عددی دال دارای تیرچه بتنی پیش تنیده: الف) تیرچه پیش تنیده ب) وایرها ب) دال بتنی

۳- بحث و بررسی

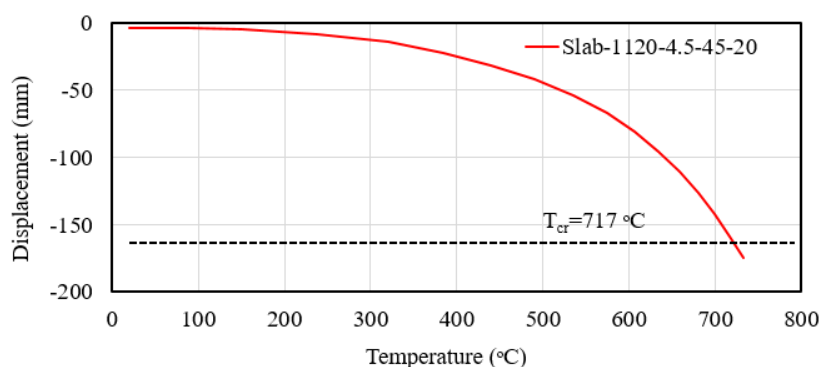
در این بخش برای ترسیم نمودار جابه‌جایی بر حسب دما برای هر یک از مدل‌های دال با تیرچه پیش تنیده از پروتکل استاندارد حرارتی ISO 834-1 استفاده شد. از آنجا که پروتکل استاندارد حرارتی ISO 834-1 روند افزایش دما بر حسب زمان را به دال‌های با تیرچه پیش تنیده اعمال می‌کند، تیرچه‌ها و دال نیز با توجه به مصالح وابسته به دما دچار افزایش کرنش شده و سازه شروع به ترک خوردن و آسیب می‌کند. حد نهایی این ترک خوردگی و آسیب برای توقف تحلیل حداکثر میزان خیز مجاز آیین نامه که $(L/28)$ برای دال یکطرفه با تیرچه است، در نظر گرفته شد که در آن L طول تیرچه می‌باشد. بعد از رسیدن جابه‌جایی وسط دهانه دال به حداکثر تغییر مکان مجاز، از

روی نمودار جابه‌جایی بر حسب دما مقدار دمای بحرانی محاسبه شد. مشخصات هندسی نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول ۹ نمونه بر اساس ۴ پارامتر اصلی مورد ارزیابی قرار گرفتند. میزان تاثیر تنش پیش‌تنیدگی برای مقادیر صفر، ۶۰۰ و ۱۱۲۰ مگاپاسکال، میزان تاثیر طول تیرچه برای مقادیر ۴/۵، ۶ و ۷/۵ متر، میزان تاثیر مقاومت فشاری بتن برای مقادیر ۳۰، ۴۵ و ۶۰ مگاپاسکال و پوشش تیرچه برای مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های عددی

پوشش بتنی تیرچه (mm)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	طول (m)	تنش پیش‌تنیدگی (MPa)	نام مدل دال با تیرچه پیش‌تنیده
۲۰	۴۵	۴/۵	۰	Slab-0-4.5-45-20
۲۰	۴۵	۴/۵	۱۱۲۰	Slab-1120-4.5-45-20
۲۰	۴۵	۴/۵	۶۰۰	Slab-600-4.5-45-20
۲۰	۴۵	۶	۱۱۲۰	Slab-1120-6-45-20
۲۰	۴۵	۷/۵	۱۱۲۰	Slab-1120-7.5-45-20
۲۰	۳۰	۴/۵	۱۱۲۰	Slab-1120-4.5-30-20
۲۰	۶۰	۴/۵	۱۱۲۰	Slab-1120-4.5-60-20
۱۰	۴۵	۴/۵	۱۱۲۰	Slab-1120-4.5-45-10
۳۰	۴۵	۴/۵	۱۱۲۰	Slab-1120-4.5-45-30

به عنوان نمونه در شکل (۱۲) نمودار جابه‌جایی-دما برای دال پیش‌تنیده Slab-1120-4.5-45-20 ترسیم و مقدار دمای بحرانی در این نمودار تعیین شد. در نمودار جابه‌جایی-دما، محور افقی نمودار، دمای گره در وسط دال و محور قائم نمودار میزان جابه‌جایی گره وسط دال در نظر گرفته شد. در این نمونه میزان پیش‌تنیدگی ۱۱۲۰، طول تیرچه ۴/۵ متر، مقاومت بتن ۴۵ مگاپاسکال و پوشش تیرچه ۲۰ میلی‌متر است. نمودار جابه‌جایی-دما این دال از دو ناحیه اصلی تشکیل شده است. در ناحیه اول اعضای دال پیش‌تنیده در ناحیه الاستیک خطی قرار دارند و به دلیل قرار گرفتن بتن در معرض حرارت تا دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد رفتار نمودار به صورت تقریباً افقی است و دال پیش‌تنیده در برابر حرارت مقاومت کرده است. با افزایش دمای اعمالی به دال پیش‌تنیده جابه‌جایی وسط دهانه دال به دلیل غیرخطی شدن مصالح بتنی و کاهش مقاومت در برابر حرارت بالا، تغییر شیب داده و دچار افزایش جابه‌جایی با شیب بیشتر شده است. در ادامه بارگذاری حرارتی با افزایش دما، حرارت از بتن به میلگرد فولادی مدفون در دال و کابل‌های پیش‌تنیده رسیده و سبب کاهش بیشتر مقاومت دال و تیرچه گردیده و میزان جابه‌جایی شدت بیشتری پیدا کرده است. میزان جابه‌جایی وسط دهانه دال در دمای ۷۱۷ درجه سانتی‌گراد به حداکثر مجاز خود رسید که این دما، دمای بحرانی در دال مورد بررسی بود. افزایش جابه‌جایی وسط دهانه دال با ایجاد ترک در تیرچه و دال با تغییرات کمی در دما به دلیل شکست به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. دمای بحرانی نمونه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.



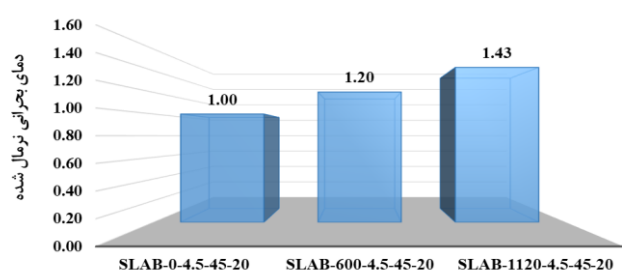
شکل ۱۲: نمودار جابه‌جایی-دما برای دال پیش‌تنیده Slab-1120-4.5-45-20

جدول ۲: دمای بحرانی نمونه‌ها

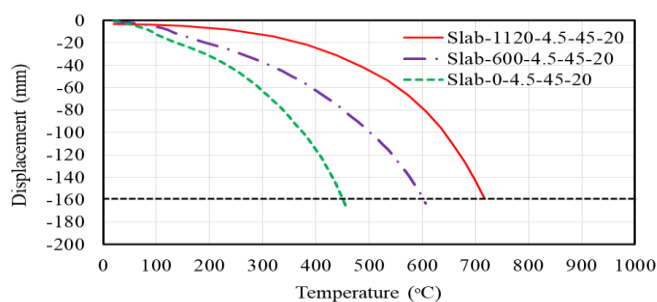
دمای بحرانی بر حسب درجه سانتی‌گراد	نام مدل دال با تیرچه پیش‌تنیده
۵۰۱	Slab-0-4.5-45-20
۶۰۳	Slab-600-4.5-45-20
۷۱۷	Slab-1120-4.5-45-20
۷۱۱	Slab-1120-6-45-20
۶۶۵	Slab-1120-7.5-45-20
۶۷۲	Slab-1120-4.5-30-20
۷۵۱	Slab-1120-4.5-60-20
۶۳۷	Slab-1120-4.5-45-10
۷۸۰	Slab-1120-4.5-45-30

۳-۱- تاثیر پارامتر پیش‌تنیدگی در رفتار حرارتی دال‌های با تیرچه پیش‌تنیده

مقدار جابه‌جایی مجاز نمونه‌های مورد بررسی در این قسمت به دلیل یکسان بودن طول نمونه‌ها (۴۵۰۰ میلی‌متر) ثابت و برابر با ۱۶۱ میلی‌متر است. در نمودار شکل (۱۳-الف) نمودار جابه‌جایی-دما برای دو نمونه Slab-1120-4.5-45-20 و Slab-600-4.5-45-20 نشان داده شده است. در این نمودار خط چین افقی سیاه محور قائم یا محور جابه‌جایی را در عدد ۱۶۱ قطع کرده که محل جابه‌جایی مجاز است. از محل برخورد این خط چین و نمودارهای ترسیمی مقدار دمای بحرانی هر نمونه عددی محاسبه گردید. سپس در این قسمت برای محاسبه تاثیر نسبی پارامتر پیش‌تنیدگی بر دمای بحرانی، ابتدا دمای بحرانی یکی از دو نمونه به‌عنوان دمای بحرانی نمونه شاهد انتخاب شد و در ادامه دمای بحرانی دو نمونه دیگر نسبت به آن محاسبه شد. در این بخش نمونه شاهد Slab-600-4.5-45-20 در نظر گرفته شده است که مقدار دمای بحرانی در آن ۶۰۳ درجه سانتی‌گراد بود و از تقسیم این دما بر خودش مقدار یک حاصل شد که در نمودار میله‌ای شکل (۱۳-ب) نشان داده شده است. در ادامه دمای بحرانی دو نمونه دیگر بر ۵۰۱ تقسیم شد و مقادیر $1/20$ و $1/43$ حاصل گردید. مقادیر حاصل شده نشان داد، با افزایش میزان پیش‌تنیدگی از صفر به ۶۰۰ مگاپاسکال، مقدار دمای بحرانی ۲۰ درصد و با افزایش میزان پیش‌تنیدگی از صفر به ۱۱۲۰ مگاپاسکال مقدار دمای بحرانی ۴۳ درصد افزایش داشته است. در نتیجه افزایش نیروی پیش‌تنیدگی، همانند مطالعات انجام شده قبلی [۳۰، ۲۵]، افزایش قابل توجه مقاومت در برابر حرارت را نشان داد.



(ب)

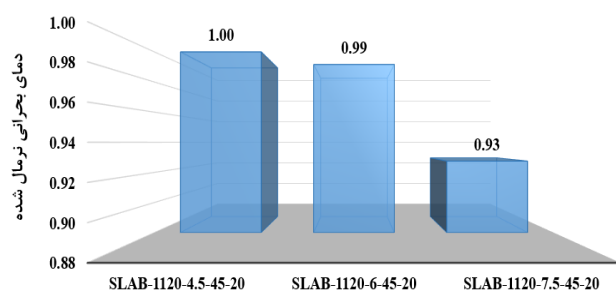


(الف)

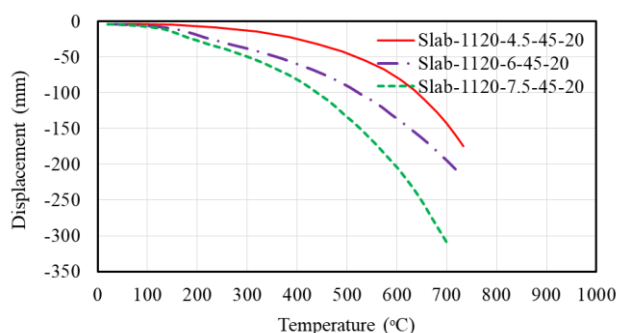
شکل ۱۳: اثر تغییر پارامتر پیش تنیدگی: الف) مقایسه منحنی‌های جابجایی-دما (ب) مقایسه نسبی دمای بحرانی

۳-۲- تاثیر پارامتر طول در رفتار حرارتی دال‌های با تیرچه پیش تنیده

از آنجا که طول نمونه‌های مورد بررسی در این بخش متغیر و دارای مقادیر $\frac{4}{5}$ ، $\frac{6}{5}$ و $\frac{7}{5}$ متر بود، در نتیجه مقدار تغییرمکان مجاز آنها به ترتیب ۱۶۱، ۲۱۴ و ۳۱۲ میلی‌متر محاسبه شد. در نمودار شکل (۱۴-الف) نمودار جابجایی-دما برای سه نمونه Slab-1120-4.5-45-20، Slab-1120-6-45-20 و Slab-1120-7.5-45-20 نشان داده شده است. مقدار دمای بحرانی هر نمونه عددی نیز به ترتیب ۷۱۱ و ۶۶۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. برای محاسبه تاثیر نسبی پارامتر طول تیرچه بر دمای بحرانی، ابتدا دمای بحرانی یکی از سه نمونه به عنوان دمای بحرانی نمونه شاهد انتخاب شد و در ادامه دمای بحرانی دو نمونه دیگر نسبت به آن محاسبه گردید (شکل ۱۴-ب). در این بخش نمونه شاهد Slab-1120-4.5-45-20 در نظر گرفته شد که مقدار دمای بحرانی آن ۷۱۱ درجه سانتی‌گراد بود.



(ب)



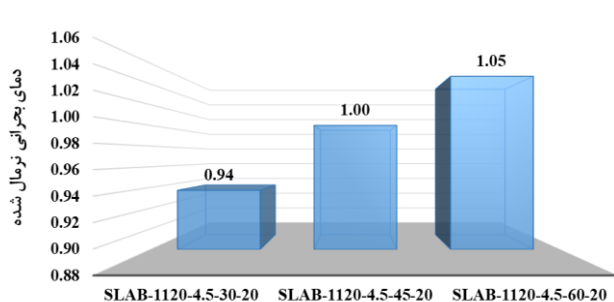
(الف)

شکل ۱۴: اثر تغییر پارامتر طول: الف) مقایسه منحنی‌های جابجایی-دما (ب) مقایسه نسبی دمای بحرانی

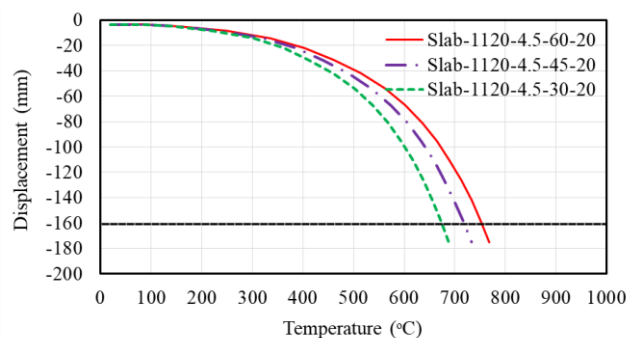
مقادیر حاصل شده نشان می‌دهد، با افزایش میزان طول از $\frac{4}{5}$ به $\frac{6}{5}$ متر، مقدار دمای بحرانی ۱ درصد و با افزایش میزان طول از $\frac{4}{5}$ به $\frac{7}{5}$ متر مقدار دمای بحرانی ۷ درصد کاهش داشته است. در نتیجه افزایش ۳۳ و ۶۶ درصدی طول تیر تاثیر بر مقاومت در برابر حرارت را نشان نداد. در صورتی که در جابجایی یکسان وسط دهانه دال، به دلیل سختی مختلف ناشی از تغییر طول، کاهش ۱۴ درصدی دما را به همراه دارد.

۳-۳- تاثیر پارامتر مقاومت فشاری بتن در رفتار حرارتی دال های با تیرچه پیش تنیده

در این بخش نیز طول نمونه‌های مورد بررسی ثابت و دارای مقادیر ۴/۵ متر است، در نتیجه مقدار جابه‌جایی مجاز آنها ۱۶۱ میلی‌متر بود. در شکل (۱۵) نمودار جابه‌جایی-دما و دمای بحرانی نرمال شده برای سه نمونه Slab-1120-4.5-30-20، Slab-1120-4.5-45-20 و Slab-1120-4.5-60-20 نشان داده شده است. مقدار دمای بحرانی هر نمونه عددی به ترتیب ۶۷۲، ۷۱۷ و ۷۵۱ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید. در این بخش نمونه شاهد Slab-600-4.5-45-20 در نظر گرفته شد. که مقدار دمای بحرانی در آن ۷۱۷ درجه سانتی‌گراد است. مقادیر حاصل شده نشان داد، با کاهش میزان مقاومت بتن از ۴۵ به ۳۰ مگاپاسکال، مقدار دمای بحرانی ۶ درصد کاهش و با افزایش میزان مقاومت بتن از ۴۵ به ۶۰ مگاپاسکال مقدار دمای بحرانی ۵ درصد افزایش داشته است. در نتیجه افزایش و کاهش ۳۳ درصدی مقاومت فشاری بتن، تاثیری در حدود ۵/۵ درصد بر مقاومت در برابر حرارت را نشان داد.



(ب)

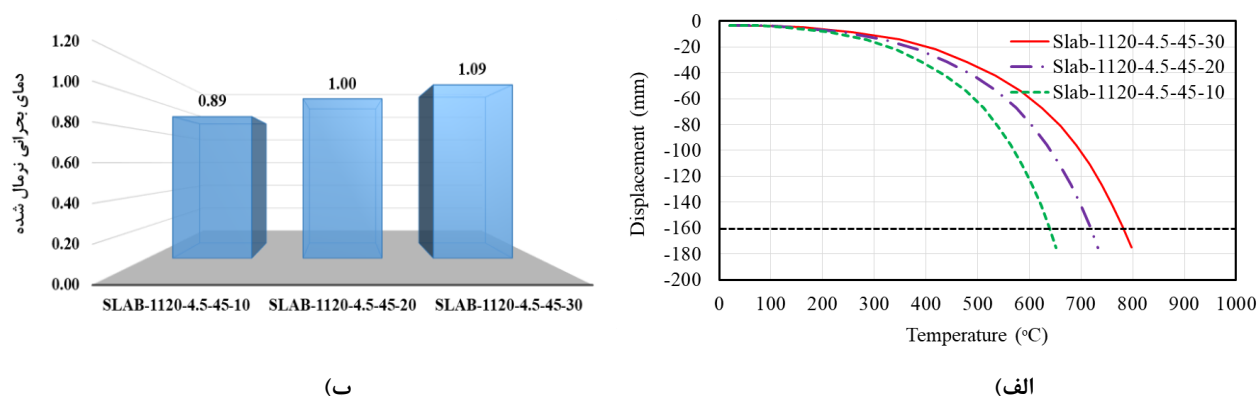


(الف)

شکل ۱۵: اثر تغییر پارامتر مقاومت فشاری بتن: الف) مقایسه منحنی‌های جابه‌جایی-دما ب) مقایسه نسبی دمای بحرانی

۳-۴- تاثیر پارامتر پوشش بتنی در رفتار حرارتی دال های با تیرچه پیش تنیده

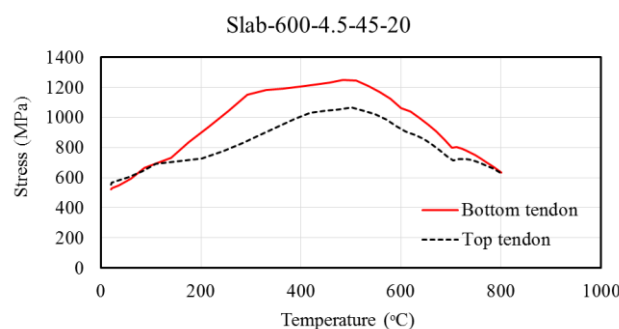
مقدار جابه‌جایی مجاز نمونه‌ها در این قسمت نیز ۱۶۱ میلی‌متر بود و مقایسه نسبی دمای بحرانی بر این اساس انجام گرفت. در نمودار شکل (۱۶-الف) نمودار جابه‌جایی-دما برای سه نمونه Slab-1120-4.5-45-10، Slab-1120-4.5-45-20 و Slab-1120-4.5-45-30 نشان داده شده است. در این بخش نمونه شاهد Slab-1120-4.5-45-20 در نظر گرفته شد که مقدار دمای بحرانی در آن ۷۱۷ درجه سانتی‌گراد بود. مقادیر حاصل شده نشان داد، با کاهش میزان پوشش بتن از ۲۰ به ۱۰ میلی‌متر، مقدار دمای بحرانی ۱۱ درصد کاهش و با افزایش میزان پوشش بتن از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر مقدار دمای بحرانی ۹ درصد افزایش داشته است (شکل ۱۶-ب). در نتیجه افزایش و کاهش ۵۰ درصدی پوشش بتن تاثیر در حدود (میانگین) ۱۰ درصد بر مقاومت در برابر حرارت را نشان داد. اثر پوشش بتنی با مطالعات قبلی انجام شده مطابقت دارد [۳۰، ۲۵].



شکل ۱۶: اثر تغییر پارامتر پوشش بتنی: الف) مقایسه منحنی‌های جابجایی-دما ب) مقایسه نسبی دمای بحرانی

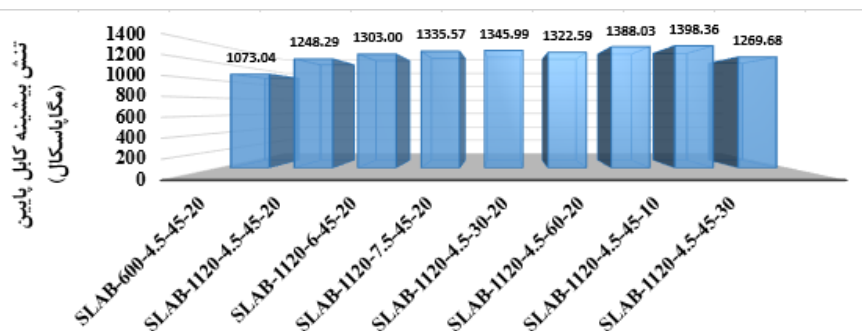
۳-۵- نمودار تنش-دما در کابل‌ها

برای ترسیم نمودار تنش-دما در کابل‌ها از بحرانی‌ترین المان کابل استفاده شد. بحرانی‌ترین المان که بیشترین تنش‌ها را در طول تحلیل حرارتی تجربه کرده بود در وسط تیرچه قرار دارد که بیشترین کرنش را نیز متحمل شده بود. میزان تغییرات تنش تا دمای ۸۰۰ درجه برای هر مدل ترسیم شده است چرا که هیچ یک از نمونه‌ها دمای بحرانی بالای ۸۰۰ درجه نداشتند. به عنوان نمونه در شکل (۱۷) نمودار تنش-دما برای کابل‌ها در دال پیش‌تنیده Slab-600-4.5-45-20 ترسیم شده است. در کابل پایین مقدار تنش در دمای ۲۰ درجه عدد نزدیک به ۵۲۳ مگاپاسکال است که حاصل از بار مرده و زنده، پیش‌تنیدگی و اتلاف پیش‌تنیدگی و قبل از گام حرارتی در تحلیل می‌باشد. در این مدل میزان پیش‌تنیدگی ۶۰۰ مگاپاسکال است و با افزایش حرارت در سازه و کاهش مقاومت مصالح در اثر دما، بار گسترده ثابت، باعث ایجاد تغییر شکل در نمونه شده و میزان تنش کابل را تا حد ظرفیت ممکن بالا برده است. به دلیل آسیب بتن و افزایش انتقال بیشتر حرارت به کابل، خواص مواد فولادی کابل تحت حرارت نیز روند کاهشی داشته و تنش بعد از روند افزایشی تا مقدار ۱۲۴۸ مگاپاسکال، روند کاهشی تا مقدار ۶۳۱ مگاپاسکال را پیش گرفته است.

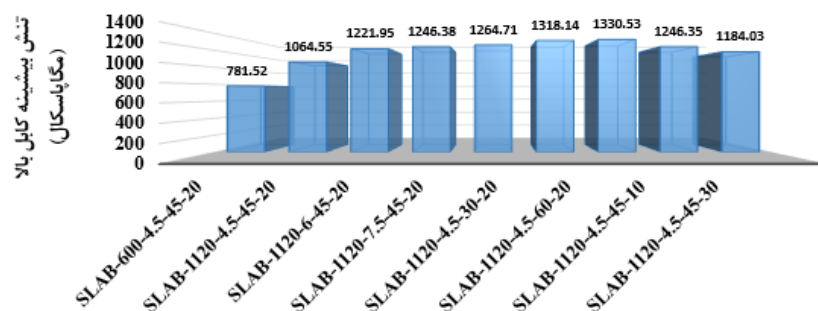


شکل ۱۷: نمودار تنش-دما برای کابل‌ها در سیستم دال با تیرچه پیش‌تنیده Slab-600-4.5-45-20

در شکل (۱۸) نمودار میله‌ای تنش بیشینه کابل پایین و بالا نشان داده شده است. در این شکل بیشینه تنش ۱۳۹۸ مگاپاسکال حاصل شده است که مربوط به پوشش ۱۰ میلی‌متری است که به دلیل دورتر بودن از تار خنثی سبب ایجاد بیشترین تنش در آن شده است. به غیر از نمونه‌ای که دارای تنش پیش‌تنیدگی ۶۰۰ مگاپاسکال است، باقی نمونه‌ها تنش‌های تقریباً یکسانی را در طول بارگذاری حرارتی از خود نشان دادند. در ادامه در شکل (۱۹) نمودار میله‌ای برای نسبت تنش کابل بالا به پایین در نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در تنش پیش‌تنیدگی یکسان اختلاف تنش دو کابل حداکثر ۱۱ درصد است.

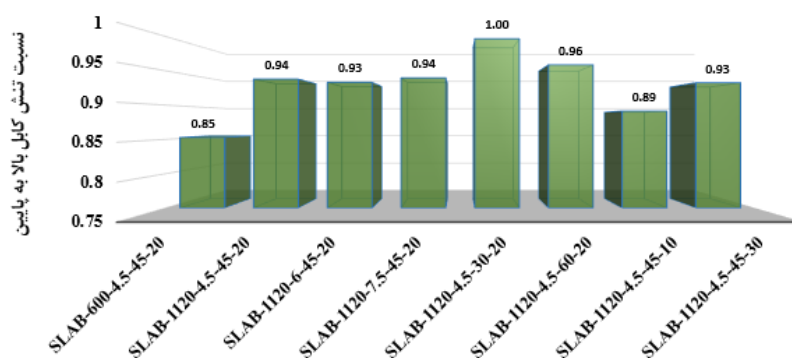


(الف)



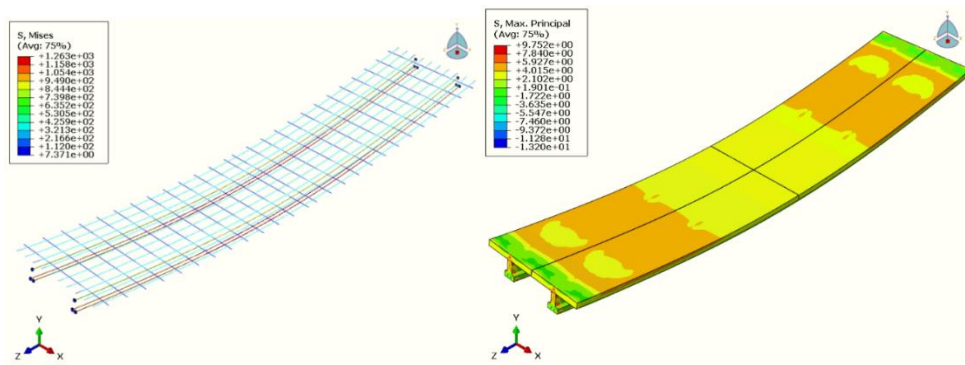
(ب)

شکل ۱۸: مقادیر تنش‌های کابل پیش‌تنیده در نمونه‌های مورد مطالعه: الف) کابل‌های بالا ب) کابل‌های پایین



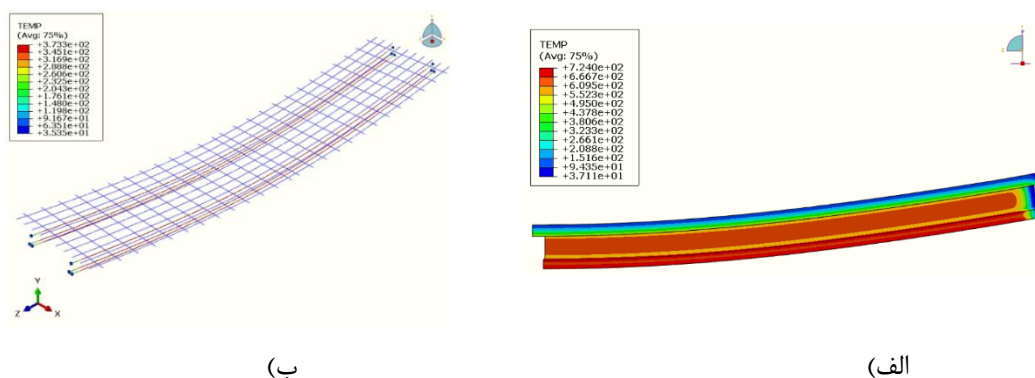
شکل ۱۹: نسبت تنش کابل بالا به پایین در نمونه‌های مورد مطالعه

مطابق با نتایج نشان داده شده در شکل (۲۰) روند توزیع تنش و کرنش در نمونه‌های مورد بررسی یکسان بوده و تمرکز تنش در دال و تیرچه در محل اتصال تیرچه به دال و در انتهای تیر مشاهده شد که به دلیل توزیع و انتقال تنش‌های برشی و خمشی از طریق بتن به تکیه‌گاه‌ها است. مقادیر حاصل شده که در لحظه انتهایی بارگذاری است، نشان داد که تنش موجود در اعضای بتنی در کشش از مقدار تنش کششی بیشینه فراتر رفته و دال و تیرچه دچار شکست شده است.



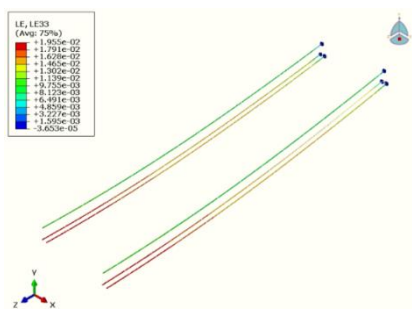
شکل ۲۰: کانتور توزیع تنش ماکزیمم در نمونه (الف) اعضای بتنی (ب) اعضای فولادی

مطابق با شکل (۲۱) که کانتور توزیع دما در اعضای فولادی و بتنی در نمونه Slab-600-4.5-45-20 را نشان می‌دهد، بیشینه حرارت در کابل‌ها ۳۷۳ درجه و در بتن ۷۲۴ درجه سانتی‌گراد حاصل شده بود. به عبارت دیگر، دمای تحمل شده در بتن ۹۴ درصد بیشتر از دمای کابل‌ها بود. از آنجا که شبکه میلگردها در سطح بالاتر قرار گرفته شده میزان حرارت در میلگردها تا حدود ۸۵ درجه سانتی‌گراد رسیده بود. توزیع دما نشان می‌دهد که عملکرد دال و تیرچه به شدت وابسته به بتن است. کمترین دما نیز به گوه‌های فولادی انتهایی کابل‌ها رسیده که مقدار آن ۳۵ درجه سانتی‌گراد است.

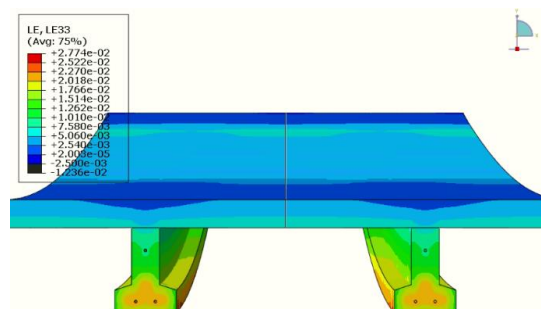


شکل ۲۱: کانتور توزیع دما در نمونه (الف) اعضای بتنی (ب) اعضای فولادی

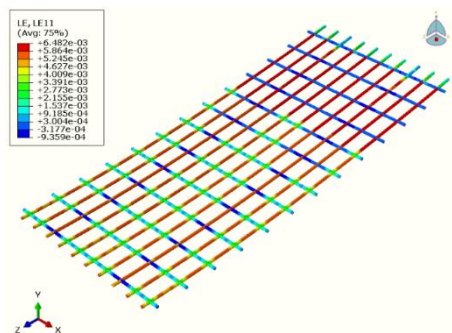
در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش در میانه تیرچه و در قسمتی که بیشترین خمش حاصل شده متمرکز شده است. بیشینه کرنش ۰/۰۲ در بتن بوده که این مقدار از کرنش ۰/۰۰۲۵ بیشتر است که نشان‌دهنده ترک‌خوردگی عضو بتنی است و همچنین بیشترین کرنش در وایرها ۰/۰۲ حاصل شد.



(ب)



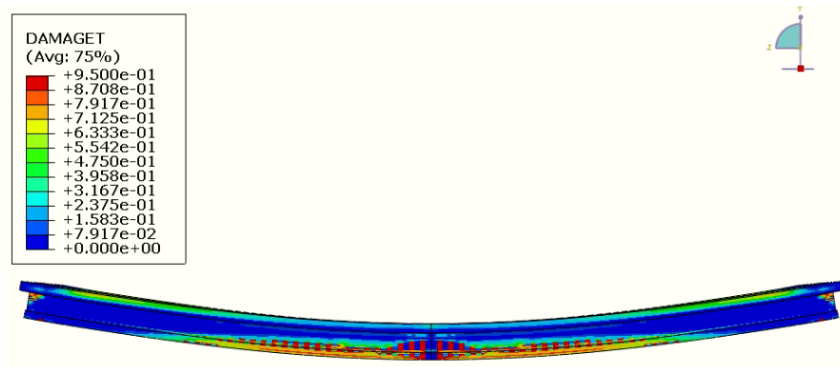
(الف)



(پ)

شکل ۲۲: کانتور توزیع کرنش در نمونه Slab-600-4.5-45-20 (الف مقطع بتنی ب) و ایرها (ب) میلگردها

شکل (۲۳) نشان دهنده محل ترک‌های کششی ایجاد شده است که با رنگ قرمز نمایان شده است و در آن ترک‌ها به صورت عرضی در میان تیرچه رخ داده و نشان دهنده‌ی غالب بودن مود شکست خمشی در نمونه است.



شکل ۲۳: کانتور توزیع آسیب کششی در نمونه Slab-600-4.5-45-20

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل اجزای محدود غیرخطی، برای تجزیه و تحلیل دال بتنی با تیرچه پیش تنیده در دمای بالا، ارائه شد. در این مدل رابطه بین کابل و بتن اطراف و حتی گوه فولادی انتهایی تیرچه آن به دقت مدل سازی شد و به کابل اجازه داد تا در هنگام تغییر شکل تیرچه، شکل پروفیل خود را حفظ کند. بار حرارتی اعمالی بر اساس پروتکل استاندارد ISO 834-1 به نمونه های مورد مطالعه وارد شد. توزیع دما در سراسر دال به صورت یکنواخت و افزایشده اعمال شد و حالت های خرابی در مدل پیش بینی شده و با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت سنجی قرار گرفت. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که این مدل می تواند به طور دقیق رفتار دال بتنی یک طرفه با تیرچه پیش تنیده پیش کشیده را در شرایط آتش سوزی پیش بینی کند. در این پژوهش نتایج حاصل از بررسی عددی هر یک از دال ها با تیرچه پیش تنیده تحت بار حرارتی نشان داد:

۱- تغییر پارامتر میزان پیش تنیدگی از صفر به ۶۰۰ و ۱۱۲۰ مگاپاسکال سبب افزایش شاخص دمای بحرانی دال ها با تیرچه پیش تنیده به مقدار ۲۰ و ۴۳ درصد می شود. از آنجا که دمای بحرانی بر اساس نمودار تغییر مکان-دما نمونه ها تعیین گردیده است، به دلیل تغییر مکان منفی ایجاد شده در پیش تنیدگی بالاتر، مقاومت بیشتری در برابر حرارت ایجاد شده است و دمای بحرانی روند افزایشی داشته است.

۲- تغییر پارامتر میزان طول تیرچه از ۴/۵ به ۶ و ۷/۵ متر سبب کاهش شاخص دمای بحرانی دال ها با تیرچه پیش تنیده به مقدار ۱ و ۷ درصد می شود. با افزایش طول تیرچه، تغییر مکان نمونه های روند افزایشی دارد که در دماهای پایین تر سبب آسیب و شکست نمونه ها شده است.

۳- تغییر پارامتر میزان مقاومت فشاری بتن از ۴۵ به ۳۰ و ۶۰ مگاپاسکال به ترتیب سبب کاهش و افزایش شاخص دمای بحرانی دال ها با تیرچه پیش تنیده به مقدار ۶ و ۵ درصد می شود. افزایش مقاومت فشاری بتن در تیرچه ها سبب مقاومت بیشتر نمونه ها شده که کاهش تغییر مکان وسط دهانه در دماهای بالاتر را به دنبال داشته است.

۴- تغییر پارامتر میزان پوشش بتن از ۲۰ به ۱۰ و ۳۰ میلی متر به ترتیب سبب کاهش و افزایش شاخص دمای بحرانی دال ها با تیرچه پیش تنیده به مقدار ۱۱ و ۹ درصد می شود. با افزایش پوشش بتن، میزان انتقال حرارت به کابل ها نسبت به نمونه های با پوشش کمتر، روند کاهشی دارد که این توزیع حرارت سبب افزایش دمای بحرانی دال ها می شود.

۵- پارامتری که بیشترین تاثیر را بر کاهش و یا افزایش شاخص دمای بحرانی دال ها با تیرچه پیش تنیده دارد، پارامتر میزان پیش تنیدگی می باشد.

۶- پارامتری که کمترین تاثیر را بر کاهش و یا افزایش شاخص دمای بحرانی دال ها با تیرچه پیش تنیده دارد، پارامتر طول تیرچه می باشد.

۷- ترتیب تاثیر پارامترهای مورد بررسی که سبب افزایش مقاومت تیرچه در برابر حرارت می شوند به ترتیب عبارت است از: میزان پیش تنیدگی، ضخامت پوشش بتن، مقاومت فشاری بتن و طول تیرچه.

۸- مود شکست در تمامی نمونه های مورد بررسی به دلیل رشد ترک های عرضی در میان تیرچه و شکست خمشی بوده است.

۹- نسبت تنش های تولید شده در کابل بالا و پایین در حالت پیش تنیدگی ثابت وابسته به مقاومت فشاری بتن و پوشش بتن بود که بیشترین نسبت تغییرات تنش ۶ درصد بود.

مراجع

- [1] Li, L.-y., and Purkiss, J. (2005). Stress-strain Constitutive Equations of Concrete Material at Elevated Temperatures. *Fire Safety Journal*, 40(7), 669-686.

- [2] Terro, M.J., (1998). Numerical Modelling of the Behaviour of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, 95(2), 183–93.
- [3] Khoury G.A. (2000). Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429-447.
- [4] Wang, G. F. and Yang, J. (2017). Residual Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Ultra-high-strength Concrete Exposed to High Temperature. *Journal of Harbin Institute of Technology*, vol. 24, no. 4, 62–70.
- [5] Zhao, J., Zheng, J.-J., Peng, G.-F., and Breugel, K. van. (2014). A Mesolevel Investigation into the Explosive Spalling Mechanism of High-performance Concrete under Fire Exposure. *Cement and Concrete Research*, vol. 65, 64–75.
- [6] Gales, J., Bisby, L. A., MacDougall, C., and MacLean, K. (2009). Transient High-temperature Stress Relaxation of Prestressing Tendons in Unbonded Construction. *Fire Safety Journal*, 44(4), 570–579.
- [7] Kodur, V. K. R. and Agrawal, A. (2016). An Approach for Evaluating Residual Capacity of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire. *Engineering Structures*, vol. 110, no. 5, 293–306.
- [8] Bazant, Z.P. and Kaplan, M.F. (1996). *Concrete at High Temperatures*. London: Longman.
- [9] Dolan, Charles W. and Hamilton Bailey, H. R. (Trey) (2019). *Prestressed Concrete - Building, Design, and Construction*. ISBN 978-3-319-97882-6 (eBook).
- [10] Carlson, C. C. (1962). Fire Resistance of Prestressed Concrete Beams, Study A-influence of Thickness of Concrete Covering over Prestressing Steel Strand. *Portland Cement Assoc., R and D Lab Bull*, (No. 147).
- [11] Carlson, C. C., Selvaggio, S. L. and Gustafarro, A. H. (1965). A Review of Studies of the Effects of Restraint on the Fire Resistance of Prestressed Concrete. *Portland Cement Assoc., R and D Lab Bull*, (206).
- [12] Gustafarro, A. H. and Selvaggio, S. L. (1967). Fire Endurance of Simply-Supported Prestressed Concrete Slabs. *Portland Cement Assoc., R and D Lab Bull*, (No. 212).
- [13] Gustafarro, A. H., Abrams, M. S. and Salse, E. A. (1971). Fire Resistance of Prestressed Concrete Beams-Study C: Structural Behaviour During Fire Tests. *Portland Cement Assoc. R and D Lab Bull*.
- [14] Bailey, C. G. and Ellobody, E. (2008). Fire Tests on Bonded Post-Tensioned Concrete Slabs. *Engineering Structures*, 31(3), 686-696.
- [15] Ellobody, E. and Bailey, C. G. (2008). Modelling of Bonded Post-Tensioned Concrete Slabs in Fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 161(6), 311-323.
- [16] Bailey, C. G. and Ellobody, E. (2009). Fire Tests on Unbonded Post-Tensioned One-Way Concrete Slabs. *Magazine of Concrete Research*, 61(1), 67-76.
- [17] Ellobody, E. and Bailey, C. G. (2009). Modelling of Unbonded Post-Tensioned Concrete Slabs Under Fire Conditions. *Fire Safety Journal*, 44(2), 159-167.
- [18] Memarzadeh, A., Shahmansouri, A. A., Nematzadeh, M., & Gholampour, A. (2021). A review on fire resistance of steel-concrete composite slim-floor beams. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 40(1), 13-32.
- [19] Bailey, C. G. and Ellobody, E. (2009). Whole-Building Behaviour of Bonded Post-Tensioned Concrete Floor Plates Exposed To Fire. *Engineering Structures*, 31(8), 1800-1810.
- [20] Ellobody, E. and Bailey, C. G. (2011). Structural Performance of a Post-Tensioned Concrete Floor during Horizontally Travelling Fires. *Engineering Structures*, 33(6), 1908-1917.
- [21] Bengar, H. A., & Shahmansouri, A. A. (2021, August). Post-fire behavior of unconfined and steel tube confined rubberized concrete under axial compression. In *Structures* (Vol. 32, pp. 731-745). Elsevier.
- [22] Kodur, V. K. and Shakya, A. M. (2014). Modeling the Response of Precast, Prestressed Concrete Hollow-Core Slabs Exposed To Fire. *PCI Journal*, 59(3), 78-94.
- [23] Shakya, A. M. and Kodur, V. K. R. (2015). Response of Precast Prestressed Concrete Hollow-Core Slabs Under Fire Conditions. *Engineering Structures*, 87, 126-138.
- [24] Shakya, A. M. and Kodur, V. K. (2017). Modeling Shear Failure in Precast Prestressed Concrete Hollow-Core Slabs Under Fire Conditions. *Journal of Structural Engineering*, 143(9), 04017093.
- [25] Kodur, V. K. R. and Shakya, A. M. (2017). Factors Governing the Shear Response of Prestressed Concrete Hollow-Core Slabs Under Fire Conditions. *Fire Safety Journal*, 88, 67-88.
- [26] Kodur, V. K. R. and Agrawal, A. (2016). An Approach For Evaluating Residual Capacity of Reinforced Concrete Beams Exposed To Fire. *Engineering Structures*, 110, 293-306.
- [27] Kodur, V. K. R. and Agrawal, A. (2017). Effect of Temperature Induced Bond Degradation on Fire Response of Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures*, 142, 98-109.
- [28] Hawileh, R. A. and Kodur, V. K. R. (2018). Performance of Reinforced Concrete Slabs Under Hydrocarbon Fire Exposure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 177-187.

- [29] Zhou, H., Li, S., Chen, L., & Zhang, C. (2018). Fire tests on composite steel-concrete beams prestressed with external tendons. *Journal of constructional steel research*, 143, 62-71.
- [30] Song, C., Zhang, G., Hou, W., & He, S. (2020). Performance of prestressed concrete box bridge girders under hydrocarbon fire exposure. *Advances in Structural Engineering*, 23(8), 1521-1533.
- [31] Heidari, M., Robert, F., Lange, D., & Rein, G. (2019). Probabilistic study of the resistance of a simply-supported reinforced concrete slab according to Eurocode parametric fire. *Fire technology*, 55(4), 1377-1404.
- [32] Knyziak, P., Kowalski, R., & Krentowski, J. R. (2019). Fire damage of RC slab structure of a shopping center. *Engineering Failure Analysis*, 97, 53-60.
- [33] Xu, Q., Chen, L., Li, X., Han, C., Wang, Y. C., & Zhang, Y. (2020). Comparative experimental study of fire resistance of two-way restrained and unrestrained precast concrete composite slabs. *Fire Safety Journal*, 118, 103225.
- [34] Bolina, F., Tutikian, B., & Rodrigues, J. P. C. (2021). Thermal analysis of steel decking concrete slabs in case of fire. *Fire Safety Journal*, 121, 103295.
- [35] Hua, N., Khorasani, N. E., Tessari, A., & Ranade, R. (2022). Experimental study of fire damage to reinforced concrete tunnel slabs. *Fire Safety Journal*, 127, 103504.
- [36] EN 1992-1-2 (2004). *Design of Concrete Structures. Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design*. Brussels: European Committee for Standardization.
- [37] EN 1993-1-2 (2005). *Design of Steel Structures. Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design*. Brussels: European Committee for Standardization.
- [38] Maréchal, J. C. (1972). Variations in the Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio with Temperature. *ACI Special Publication*, vol. 34, pp. 495-504.
- [39] Elghazouli, A. Y. and Izzuddin, B. A. (2001). Analytical Assessment of the Structural Performance of Composite Floors Subject To Compartment Fires. *Fire Safety Journal*, vol. 36, no. 8, pp. 769-793.
- [40] ZhoNG TAO. (2014). Stress-Strain Curves of Prestressing Steel After Exposure To Elevated Temperature. *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. DOI:10.13140/2.1.2503.5840.
- [41] ASTM A421 / A421M-15, (2015). *Standard Specification for Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete*. ASTM International.
- [42] ACI 423.10R-16 (2016). *Guide to Estimating Prestress Losses*. The American Concrete Institute (ACI).
- [43] Cai, B., Li, B. and Fu, F. (2020). Finite Element Analysis and Calculation Method of Residual Flexural Capacity of Post-Fire RC Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1), 1-17.
- [44] ISO 834-1, (1999). *Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction*. Technical Committee: ISO/TC 92 Fire safety.