

بررسی رفتار سقف کامپوزیت با تیر لانه زنبروی در آتش سوزی

محمود یحیائی (دانشیار)

بنفشه حسن پور قمصری* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نیما خشایار (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)
دربی ۲ - ۳۱، شماره ۲/۱، ص. ۱۰۵-۱۱۰، (یادداشت شفاهی)

مقاومت و سختی فولاد در حرارت‌های بالا کاهش می‌یابد و بررسی رفتار سازه‌های فولادی را در حرارت‌های بالا ضروری می‌سازد. در ایران، ساخت سازه‌های فولادی و اجرای سقف کامپوزیت بسیار مورد توجه است و در این پژوهش از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS برای مطالعه‌ی رفتار سقف کامپوزیت با تیر لانه زنبروی در دماهای بالا استفاده شده و تحت آنالیز کوپله‌ی مکانیکی - حرارتی برای در نظر گرفتن اثر نیروهای مکانیکی و بار حرارتی قرار گرفته است. بعد از صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی، مقدار تغییر مکان نمونه‌های مختلف تحت بارگذاری در حرارت‌های بالا با هم مقایسه و به بررسی ابعاد تیر در میزان مقاومت آن در آتش پرداخته شده است. نمودارهای نیرو - تغییر مکان نمونه‌ها در ترازهای حرارتی مختلف به دست آمده است. با مقایسه‌ی نمودارها در ترازهای حرارتی مختلف دیده می‌شود که سقف کامپوزیت با فولاد و بتن معمول ساختمانی امکان مقاومت در برابر حرارت‌های بالای 80° درجه سانتی‌گراد را ندارد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی اجزاء محدود، آتش‌سوزی، نمودار نیرو - تغییر مکان، سقف کامپوزیت، حرارت‌های بالا، تیر لانه زنبروی.

yahyai@kntu.ac.ir
banafshehasanpour@sina.kntu.ac.ir
nima.khashayar@live.com

۱. مقدمه

و توجه پژوهشگران را برای بررسی و پژوهش‌های بیشتر در این زمینه جلب کرده است.

نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی تحت شرایط آتش‌سوزی به علت هزینه‌های زیاد و محدودیت در ابعاد کوره مورد استفاده قرار گرفته است و همچنین به علت محدودیت امکان بررسی تعداد اندکی از پارامترها، بیشتر به مطالعات تحلیلی و عددی و نیز به مرور تعدادی از کارهای آزمایشگاهی و عددی در این زمینه پرداخته شده است؛ در پژوهشی در سال ۱۹۹۵، پیوستگی سازه‌ی تحت شرایط آتش براساس نتایج مجموعه‌ی آزمون‌های آتش روی اتصالات معمول تیر به ستون به صورت عددی ارائه شده و هدف آزمایش توسعه‌ی یک رویکرد طراحی برای تیرهای فولادی بوده است، که مقاومت چرخشی ایجاد شده توسط اتصالات را در نظر بگیرد.^[۱] همچنین در پژوهش دیگری آزمایش‌هایی روی تیرهای ساده و تیرهای با بازشوی دایروی بدون عایق به منظور بررسی سرعت گرم‌شدن جان تیر با بازشو نسبت به تیر ساده انجام و مشاهده شده است که دمای ثبت شده در طول آزمایش در وسط جان تیر ساده از دمای جان تیر با بازشو بیشتر بوده است.^[۲] در پژوهشی در سال ۲۰۰۶، نیز تعدادی آزمایش آتش با مقیاس کامل از سال ۱۹۹۴، در آزمایشگاه کاردینگتون مؤسسه‌ی تحقیقات مسکن، UK، انجام و یک ساختمان ۸ طبقه‌ی فولادی با مقیاس واقعی و با سیستم دال بتن مسلح کامپوزیت روی یک عرشه‌ی فلزی ساخته و ۷ آزمون آتش‌سوزی در موقعیت‌های متفاوت درون ساختمان فولادی انجام شد. هدف اصلی آزمایش‌ها،

ساختمان‌های قاب فولادی ممکن است در معرض آتش قرار بگیرند، اما خصوصیات فولاد ساختمانی مثل ظرفیت حمل بار و لنگر خمشی به علت کاهش سختی و همچنین مقاومت مصالح به سرعت در آتش‌سوزی کاهش می‌یابد. یک راه معمول حفاظت سازه، استفاده از کپسول آتش خاموش‌کن یا پوشاندن سطح سازه‌ی فولادی در معرض آتش‌سوزی با یک ضخامت از قبل تعیین شده از مصالح ضد حریق است، گرچه استفاده از سیستم اطفاء حریق و صفحات عایق هر دو مانع افزایش دمای فولاد می‌شود، لیکن در صورتی که فقط به کمک این مواد سازه در برابر آتش مقاوم شود، هزینه‌ی ساخت بالا می‌رود. همچنین در بسیاری موارد امکان از بین رفتن و یا عمل نکردن این پوشش‌ها و سیستم اطفاء حریق وجود دارد. امکان چنین خرابی‌هایی در زلزله به علت لرزش افزایش می‌یابد و بنابراین عامل کنترل‌کننده بر روی عملکرد سازه در حین آتش‌سوزی می‌تواند خود سیستم سازه‌ی باشد. استفاده‌ی روزافزون از سقف کامپوزیت و کاربرد تیر لانه زنبروی در ساختمان‌ها موجب افزایش مطالعات درباره‌ی رفتار سازه‌ی آنها شده است. هر چند مطالعات گوناگونی درباره‌ی رفتار کشسان، خمیری و توزیع تنش در سطح مقطع تیرهای لانه زنبروی به طرق مختلف انجام شده است، اما مطالعات محدودی درباره‌ی نحوه‌ی رفتار آنها در آتش صورت گرفته

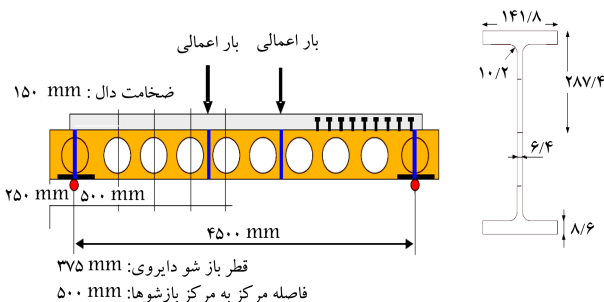
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۱، پذیرش ۱۳۹۲/۷/۱۳.

ارزیابی رفتار المان‌های سازه‌یی با گیرداری واقعی تحت یک آتش طبیعی بود.^[۳] همچنین در پژوهش دیگری برای بررسی تیرهای با بازشوی دایروی، آزمایش‌هایی روی تیرهای یک ساختمان یک طبقه انجام شد تا اثرات نیروی محوری و برهمکنش اجزاء سازه‌یی را در مقاومت این تیرها بررسی کنند.^[۴] تعدادی آزمایش مقیاس کامل نیز برای بررسی رفتار سازه‌های فولادی تحت بار آتش در ایران انجام شده است، که عمده‌ی این آزمایش‌ها روی اتصالات دارای نبشی بالا و پایین، با و بدون نبشی جان با پیچ و نیز با جوش صورت گرفته است.^[۵،۶] و همچنین اتصالات خورجینی در آتش‌سوزی نیز مورد آزمایش قرار گرفته است،^[۷] پژوهشگرانی نیز به مدل‌سازی اتصال خورجینی و اتصال پیوسته‌ی تیر به ستون و بررسی رفتار دال‌های کامپوزیت تحت دمای بالا با در نظر گرفتن عوامل مختلف فیزیکی و هندسی پرداخته‌اند.^[۸-۱۰] همچنین در سال ۲۰۰۷ پژوهش‌هایی روی عملکرد تیرهای کامپوزیت (به طول ۴۵۰۰ میلی‌متر) با باز شوی دایروی انجام و رفتار آنها در مطالعات آزمایشگاهی و عددی بررسی و آزمایش با مقیاس کامل انجام شده است. برای این منظور دو نوع سطح مقطع متقارن و نامتقارن به کار رفته است: نمونه‌ی اول (A1) تماماً از پروفیل T شکل (۳۹ × ۱۴۰ × UB۴۰۶) با عمق تمام‌شده‌ی ۵۷۵ میلی‌متر و نمونه‌ی دوم (B1) با دو پروفیل متفاوت T شکل، برای بال بالا (۳۹ × ۱۴۰ × UB۴۰۶) و بال پایین (۵۲ × ۱۵۲ × UB۴۵۷) و با عمق تمام‌شده‌ی ۶۳۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند و هر تیر تحت دو نوع مختلف بار متمرکز، در دمای اتاق و دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شده است که به علت کمانش جان بین بازشوها و همچنین ناپایداری ناشی از افت ناگهانی سختی و مقاومت در تیرها، گسیختگی تیر رخ می‌دهد.^[۱۱] در این مطالعه، نمونه‌ی نخست انتخاب و به صورت دقیق مدل‌سازی شده است. در انتها، نتایج حاصل از تحلیل با نتایج آزمایش صحت‌سنجی شده است.

۲. مشخصات نمونه‌ی آزمایشی

مشخصات نمونه‌ی انتخابی مطابق مدل آزمایشگاهی علی نجای و همکاران،^[۱۱] در نظر گرفته شده و در شکل ۱، جزئیات آن نشان داده شده است. مقاومت مصالح بتنی مورد استفاده در دال برابر با ۳۵ مگاپاسکال و مقاومت آرماتور موجود در آن ۴۶۰ مگاپاسکال بوده است. ضخامت دال بتنی ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع گل‌میخ‌ها ۱۲ سانتی‌متر بوده و در فواصل ۱۵۰ میلی‌متری از هم به کار رفته و مقاومت جاری شدن آنها ۳۲۷ مگاپاسکال ارزیابی شده است. دمای کوره مطابق منحنی‌های ISO۸۳۴ و ASTM E۱۱۹^[۱۲،۱۳] افزایش یافته است.



شکل ۱. نمونه‌ی آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی.^[۱۱]

۳. مدل‌سازی مصالح در دمای اتاق و دماهای بالا

مدل‌سازی مصالح با توجه به رفتار ککسان‌خمیری تیرها در طول آزمایش‌های مختلف صورت گرفته است تا بتوان تغییر شکل‌های غیرخطی مصالح را به درستی در نظر گرفت. برای کاهش خصوصیات سختی و مقاومت فولاد و بتن نیز از ضرایب کاهش ذکر شده در آئین‌نامه‌ی اروپا (Euro code) استفاده شده است.^[۱۴] در جدول ۱، ضرایب کاهش برای خصوصیات اصلی فولاد و در جدول ۲، نیز ضرایب کاهش برای خصوصیات اصلی بتن بر اساس آئین‌نامه‌ی اروپا ارائه شده است.

۴. اعمال بار و شرایط مرزی

با توجه به اهمیت شرایط مرزی و به منظور مدل‌سازی واقع‌گرایانه و هر چه دقیق‌تر سعی شده است که تکیه‌گاه‌های موجود در دو انتهای تیر، که طبق مدل آزمایشگاهی از نوع مفصلی بودند، در مدل اجزاء محدود نیز به همان صورت شبیه‌سازی شوند. لذا، ۲ قطعه‌ی هرمی مشابه شرایط آزمایش در دو انتها مدل شده‌اند. این تذکر لازم است که ۲ قطعه‌ی هرم از پایین در هر دو جهت گیردار شده‌اند و نکته‌ی دیگر در این‌جا بحث کاربرد المان‌های تماسی در تحلیل 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 به طور دقیق مدل‌سازی شده است. برای تماس و چسبندگی آرماتورهای درون دال از قید محصورشدگی^۱ شبکه‌ی آرماتور درون بتن استفاده شده است. قید محصورشدگی، که از کتابخانه‌ی آباکوس انتخاب شده است، برای محصورکردن آرماتورهای درون بتن به کار می‌رود. این قید رابطه‌ی هندسی بین نقاط محصورشده و فضای محصورکننده را می‌یابد و درجه‌ی آزادی انتقالی اعضاء محصورشده را مطابق با نقطه‌ی متناظر روی محیط محصورکننده قرار می‌دهد. در این اعضاء فقط درجه‌های آزادی چرخشی مستقلاً فعال هستند. برای تماس بین بتن و بال تیر و عدم لغزش بتن روی تیر به جای 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.

۵. صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی

با توجه به مدل‌هایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، دو نوع ماده یعنی بتن و فولاد در طول این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور بیان رفتار ساختاری بتن و فولاد مصرفی در تیر از المان C3D۸ استفاده شده است. این المان مکعبی، ۸ گره و تابع شکل خطی دارد. هر گره المان فوق سه درجه آزادی انتقالی در جهت‌های x و y و z دارد، که برای المان کلاً ۲۴ درجه‌ی آزادی فراهم می‌سازد. این المان قابلیت اعمال تغییر شکل‌های خمیری و تغییر شکل‌ها و کرنش‌های زیاد را دارد. برای شناسایی مش‌بندی مناسب سعی شده است از یک روال منطقی و شناخته‌شده بهره گرفته شود. برای این منظور آزمون هم‌گرایی^۲ طرح شده است. در این آزمون، حل مسئله از یک شبکه‌ی درشت آغاز و در هر گام، مش ریزتر شده است. برای المان‌های یک بعدی، یک المان در مش ریزتر به دو المان و برای حالت دو بعدی و سه بعدی به ترتیب یک المان به ۴ و ۸ المان تقسیم

جدول ۱. ضرایب کاهش خصوصیات اصلی فولاد در یورو کد ۳.

دما (θ_a) (°C)	ضرایب کاهش		
	مقاومت تسلیم ($k_{y, \theta}$)	حد تناسب (k_p, θ)	مدول خمیرسانی (k_E, θ)
۲۰	۱	۱	۱
۱۰۰	۱	۱	۱
۲۰۰	۱	۰٫۸۰۷	۰٫۹
۳۰۰	۱	۰٫۶۱۳	۰٫۸
۴۰۰	۱	۰٫۴۲	۰٫۷
۵۰۰	۰٫۷۸	۰٫۳۶	۰٫۶
۶۰۰	۰٫۴۷	۰٫۱۸	۰٫۳۱
۷۰۰	۰٫۲۳	۰٫۰۷۵	۰٫۱۳
۸۰۰	۰٫۱۱	۰٫۰۵	۰٫۰۹
۹۰۰	۰٫۰۶	۰٫۰۳۷۵	۰٫۰۶۷۵
۱۰۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۲۵	۰٫۰۴۵
۱۱۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱۲۵	۰٫۰۲۵
۱۲۰۰	۰	۰	۰

جدول ۲. ضرایب کاهش خصوصیات اصلی بتن در یورو کد ۳.

دما (θ_c) (°C)	ضرایب کاهش مقاومت [$k_c(\theta_c)$]			$\epsilon_{cu, \theta}$	$\epsilon_{c, \theta}$
	سیلیسی	آهکی	سبک		
۲۰	۱	۱	۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰۲۵
۱۰۰	۱	۱	۱	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۰۴
۲۰۰	۰٫۹۵	۰٫۹۷	۱	۰٫۰۲۵	۰٫۰۰۵۵
۳۰۰	۰٫۸۵	۰٫۹۱	۱	۰٫۰۲۷۵	۰٫۰۰۷
۴۰۰	۰٫۷۵	۰٫۸۵	۰٫۸۸	۰٫۰۳	۰٫۰۱
۵۰۰	۰٫۶	۰٫۷۴	۰٫۷۶	۰٫۰۳۲۵	۰٫۰۱۵
۶۰۰	۰٫۴۵	۰٫۶	۰٫۶۴	۰٫۰۳۵	۰٫۰۲۵
۷۰۰	۰٫۳	۰٫۴۳	۰٫۵۲	۰٫۰۳۷۵	۰٫۰۲۵
۸۰۰	۰٫۱۵	۰٫۲۷	۰٫۴	۰٫۰۴	۰٫۰۲۵
۹۰۰	۰٫۰۸	۰٫۱۵	۰٫۲۸	۰٫۰۴۲۵	۰٫۰۲۵
۱۰۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۱۶	۰٫۰۴۵	۰٫۰۲۵
۱۱۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۴	۰٫۰۴۷۵	۰٫۰۲۵
۱۲۰۰	۰	۰	۰	-	-

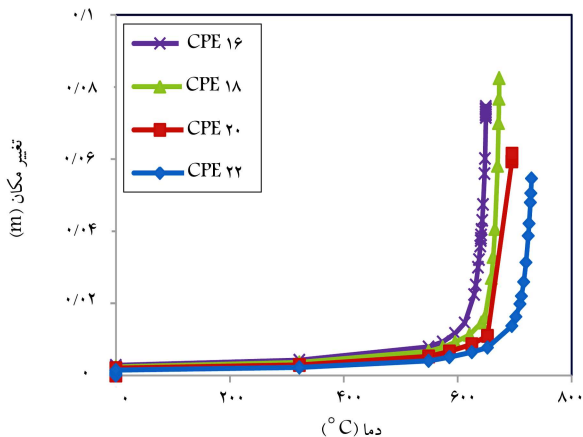
مقادیر $\epsilon_{cu, \theta}$ و $\epsilon_{c, \theta}$ فقط در بتن معمولی منظور می‌گردد.

برای صحت‌سنجی اعتبار مدل‌های اجزاء محدود، نتایج آنها با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی علمی نجایی و همکاران،^[۱۱] در شکل ۲ مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که منحنی‌ها تا حدود ثانیه‌ای 250° با هم اختلاف کمی دارند، چون در این زمان با توجه به منحنی ISO 8334 که در شکل ۳ آمده است، دما در حدود 90° درجه‌ی سانتی‌گراد است که در آن مقاومت فولاد و بتن به ترتیب به ۶ و ۸ درصد مقاومت اولیه (در دمای اتاق) و مدول کشسانی فولاد نیز به ۶٫۷۵٪ مقدار

شده‌اند. مدلی مناسب است که ریزش‌دهن مش در جواب‌های نهایی تغییری کمتر از یک مقدار مشخص (در این تحقیق ۱٪) را ایجاد کند. برای این پژوهش پارامتر هم‌گرایی تغییرمکان در نقطه‌ی میانی تیرهاست. در تمام طول حل مسئله، این پارامتر برای هر دو مدل متوالی قرأت و مقایسه شده است. در نهایت ابعاد مش به‌کاررفته بعد از مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی، ۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است، که شامل 4800 المان در بخش دال، 1088 المان آرماتور و 6656 المان در قسمت تیر لانه زنبوری بوده است.

جدول ۳. مشخصات مصالح به کاررفته در مدل سازی.

۲۰۰۰۰۰ MPa	مدول کشسانی فولاد
۲۰۰۰۰ MPa	مدول کشسانی بتن
۲۴۰ MPa	تنش جاری شدن فولاد
۲۵ MPa	مقاومت ۲۸ روزهی بتن



شکل ۴. نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما در نمونه‌ها.

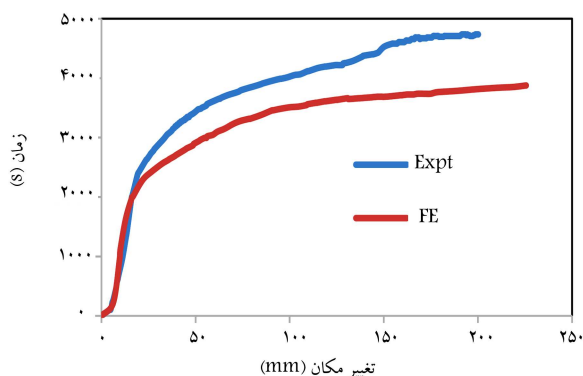
۱.۶. معرفی نمونه‌ها

در این پژوهش ۴ نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در کلیه‌ی نمونه‌ها دال بتنی به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر و یک لایه‌ی مش از جنس آرماتور ۱۰ به فواصل ۲۰۰ میلی‌متری ساخته شده است. طول دال بتنی ۵۰۰۰ میلی‌متر و عرض آن ۱۲۰۰ میلی‌متر است. ۴ تیر لانه زنبوری به شماره‌های CPE۲۲، CPE۲۰، CPE۱۸ و CPE۱۶ و با طول ۴۵۰۰ میلی‌متر به عنوان تیر لانه زنبوری زیر دال بتنی در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات مصالح در جدول ۳ آمده است.

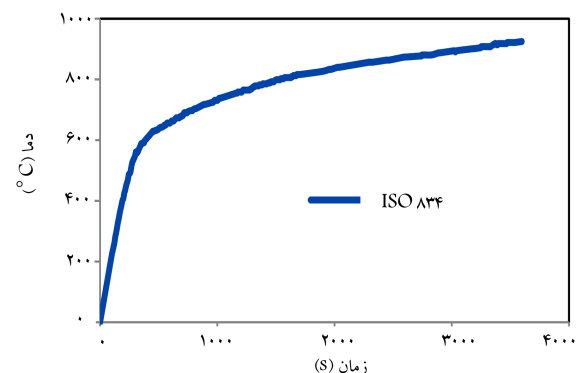
۲.۶. بررسی روند تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر کامپوزیت

از آنجا که نمونه‌ها تحت بار حرارتی و مکانیکی قرار دارند، از آنالیز کوپله مکانیکی - حرارتی بهره گرفته شده است تا اثرات بارهای مختلف را در گام‌های مجزا در نظر بگیرد. بدین منظور ابتدا در یک گام بار ثابتی روی سقف کامپوزیت قرار گرفته و تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی نمونه‌ها انجام و در گام دیگر رفتار تیر تحت آتش‌سوزی تعیین شده است. در شکل ۴، نتایج حاصل از تحلیل‌ها در قالب نمودار تغییر مکان وسط دهانه - دما ارائه شده است.

با بررسی نتایج حاصل از تحلیل می‌توان گفت که تمامی نمودارها کمابیش روند تغییرات مشابهی دارند. روند تغییرات بدین نحو است که تا دمایی در حدود ۵۵۰ درجه، روند افزایش تغییر مکان‌ها شیب کمی دارد و بلافاصله با افزایش حرارت بیشتر از این مقدار، تغییر مکان‌ها با شیب تند قابل توجهی افزایش می‌یابند. این روند نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که بعد از این محدوده‌ی سختی تیر و دال بتنی به شدت کاهش می‌یابد و نتیجتاً توانایی تیر کامپوزیت برای حمل بار در برابر آتش به مقدار قابل توجهی کاهش و تغییر مکان‌ها به شدت افزایش می‌یابند. همچنین دیده می‌شود که با بالا رفتن شماره‌ی تیر، میزان تغییر مکان وسط دهانه کاهش می‌یابد. علت این مسئله این است که هم‌زمان با افزایش نمره‌ی تیر، میزان



شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با مدل اجزاء محدود.

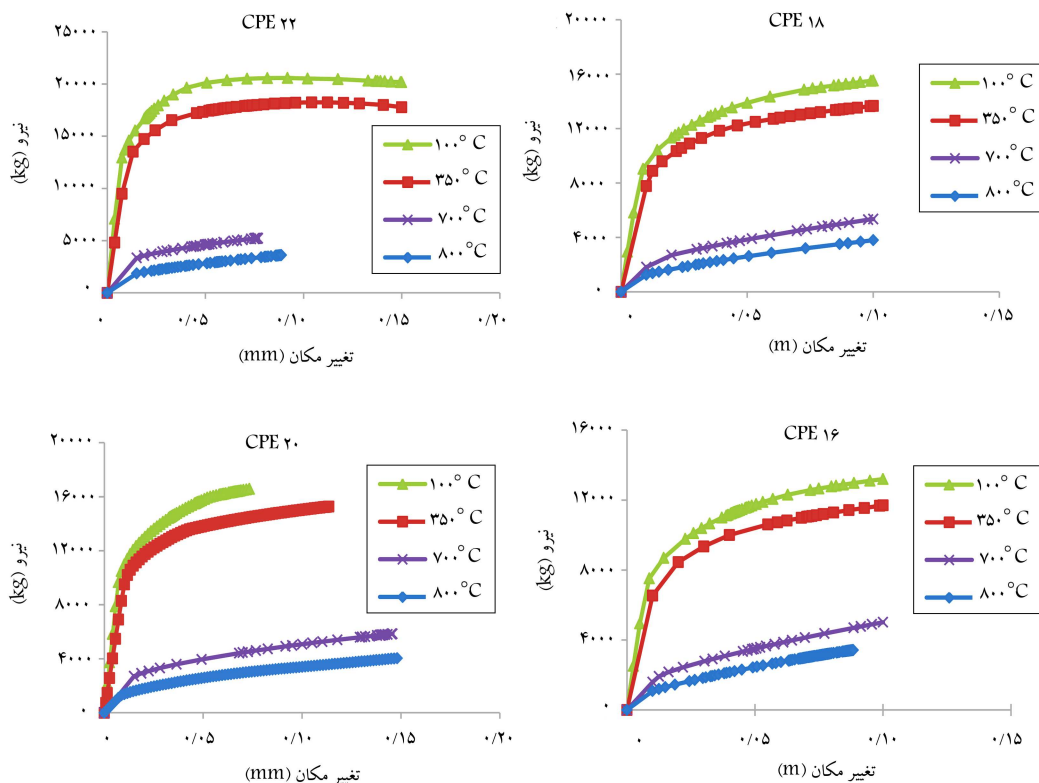


شکل ۳. منحنی آتش استاندارد ISO ۸۳۴.

اولیه رسیده است. همان‌طور که در جداول ضرایب کاهش‌ی فولاد و بتن آمده است، با افزایش دما این مقادیر به سمت صفر میل می‌کنند و در عمل مقاومت و سختی خود را کاملاً از دست می‌دهند، لذا این روند موجود در منحنی زمان - تغییر مکان برای بررسی رفتاری سازه‌های معمولی در آتش‌سوزی کفایت می‌کند. علت تفاوت‌های موجود می‌تواند پیروی حرارت کوره‌ی آتش آزمایش از منحنی آتش طبیعی همراه با فاز سردشدگی و پیروی حرارت نمونه‌ی عددی از منحنی آتش استاندارد باشد. همچنین ساده‌سازی‌های عددی در مدل‌سازی، عدم مدل‌سازی نواقص آزمایش‌ها، تنش‌های پسماند، مدل‌های رفتاری غیرخطی مصالح در دماهای بالا و یا تفاوت در ضرایب کاهش مقاومت و سختی در بتن و فولاد با واقعیت می‌تواند علت‌های ثانویه به شمار رود.

۶. مدل‌سازی تیرهای کامپوزیت لانه زنبوری در آتش

مهندسی ایمنی در برابر آتش سازه‌ی، دو مطلب عمده یعنی تعیین زمان دوام سازه در حین آتش‌سوزی (به منظور امکان تخلیه‌ی سازه و انجام عملیات اطفاء حریق) و نیز طراحی اعضاء سازه‌ی و سازه‌های مقاوم در برابر آتش را مورد توجه قرار می‌دهد. به منظور دستیابی به این دو خواسته، دو جنبه‌ی مختلف از اعضاء سازه‌ی: ۱. اطلاع از رفتار عضو سازه‌ی در حین آتش‌سوزی، ۲. اطلاع از کاهش ظرفیت آن عضو در ترازهای مختلف حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه، برای روشن شدن مسئله، این دو جنبه و این دو نیاز موجود در تحلیل و طراحی حرارتی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۵. نمودارهای تغییر مکان - نیرو در ترازهای مختلف حرارتی.

نشان دهنده‌ی کاهش ظرفیت مقاومت و سختی تیرهای کامپوزیت با افزایش حرارت است، تا آنجا که بیشینه‌ی نیرو در حرارت ۸۰° درجه، تقریباً ۲/۵٪ این مقدار در حرارت ۲۰° درجه است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر آن است که در حرارت ۸۰° درجه‌ی سانتی‌گراد، ظرفیت هر ۴ نمونه تا حد بالایی به یکدیگر شباهت پیدا کرده است. علت این مسئله آن است که سختی فولاد معمولی ساختمانی در دماهای ۸۰° الی ۹۰° درجه‌ی سانتی‌گراد به سمت صفر میل می‌کند و کلیه‌ی فشار توسط دال بتنی تحمل می‌شود. دال بتنی هم که در هر ۴ نمونه وضعیت یکسانی دارد، پس هر ۴ نمونه رفتار تقریباً مشابهی دارند. پس می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که در یک سیستم ترکیبی مانند تیر کامپوزیت با بالارفتن حرارت، نقش بخش بتنی پر رنگ‌تر می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

مدل اجزاء محدود تیر کامپوزیت با دال بتنی با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی و مشاهده شده است که نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود با نمونه‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش شماره‌ی تیر لانه زنبوری به علت افزایش سختی خمشی تیر، موجب کاهش تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر کامپوزیت می‌شود و تیر تا دمای بالاتری مقاومت می‌کند و علاوه بر این با افزایش حرارت، نقش بخش فولادی تیر کامپوزیت کاهش و اهمیت بخش بتنی برای مقاومت در برابر حرارت افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که سیستم سقف کامپوزیت با فولاد و بتن معمولی ساختمانی امکان مقاومت در حرارت بیشتر از ۸۰° درجه‌ی سانتی‌گراد را ندارد، چرا که تیر کامپوزیت در این دما بدون افزایش نیرو دچار تغییر شکل‌های بزرگی می‌شود.

سختی آن نیز افزایش می‌یابد و لذا با افزایش حرارت میزان سختی در تیرهای سنگین‌تر نسبت به تیرهای سبک‌تر کمتر کاهش می‌یابد و نتیجه آنکه تحت بار ثقلی یکسان و حرارت یکسان سیستمی که سختی بیشتری دارد، تغییر مکان کمتری را بروز می‌دهد.

۳.۶. بررسی تغییرات ظرفیت باربری تیر کامپوزیت

در این بخش هدف تعیین تغییرات ظرفیت و مقاومت نمونه‌ها در ترازهای مختلف حرارتی است. بدین منظور ۴ تراز حرارتی مختلف، ۲۰° درجه، ۳۵۰° درجه، ۷۰۰° درجه و ۸۰۰° درجه‌ی سانتی‌گراد انتخاب شده است. در این قسمت نیز از تحلیل کوپله‌ی مکانیکی - حرارتی بهره گرفته شده است و در هر یک از موارد، ابتدا نمونه تا تراز مورد نظر حرارت داده شده و سپس در همان تراز، نمونه بارگذاری شده و نمودار نیرو - تغییر مکان نمونه به دست آمده است. نتایج ارائه شده در این بخش در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در نمودارهای ارائه شده، ظرفیت نیرو - تغییر مکان تیرهای کامپوزیت بررسی شده در ترازهای مختلف حرارتی مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل می‌توان به این موارد اشاره کرد که در ترازهای حرارتی بالاتر میزان تغییر شکل‌های نمونه‌ها به طرز قابل توجهی افزایش یافته و این افزایش تا جایی ادامه داشته است که زوال مصالح در حرارت‌های بالا مانع پیشرفت تحلیل نشده باشد. مسئله‌ی افزایش تغییر شکل در دماهای بالا نشان دهنده‌ی این است که با افزایش حرارت، سختی نمونه‌ها به شدت کاهش یافته و با نیروی اندک، تغییر مکان‌های بزرگی ایجاد شده است. همچنین مشاهده شده است که ظرفیت نیرویی تیرهای کامپوزیت (بیشینه‌ی نیروی قابل تحمل سیستم)، که یکی از معیارهای اصلی برای طراحی سقف‌های کامپوزیت است، با افزایش حرارت به شدت کاهش یافته است. این مسئله

پانوشتها

1. embeded region constraint
2. convergence test

منابع (References)

1. Lawson, R.M. "Behaviour of steel beam-to-column connections in fire", *Struct. Engr.*, **68**(14), pp. 263-71 (1990).
2. Bailey, C. "Indicative fire test on a cellular and solid web steel beam", Manchester Centre for Civil and Constructional Engineering (May 2003).
3. Wald, F., Simoões da Silva, L., Moore, D.B., Lennon, T., Chaldna, M., Santiago, M. and et al. "Experimental behavior of a steel structure under natural fire", *Fire Safety Journal*, **41**(7), pp. 509-522 (2006).
4. Wald, F., Pelouchová, A., Chlouba, J. and Strejček, M. "To fire design of cellular beams", *Natural hazards Journal of Czech Republic*, pp. 85-92 (2009).
5. Saedi Daryan, A. and Yahyai, M. "Modeling of bolted angle connections in fire", *Fire Safety Journal*, **44**(7), pp. 976-988 (2009).
6. Saedi Daryan, A. and Yahyai, M. " Behavior of welded top-seat angle connections exposed to fire", *Fire Safety Journal*, **44**(4), pp. 603-611 (2009).
7. Saedi Daryan, A. and Bahrampoor, H. "The study of behavior of Khorjini connections in fire", *Fire Safety Journal*, **44**(4), pp. 659-664 (2009).
8. Hasanpour Ghamsari, B. "Study of behaviour of semi rigid connections at elevated temperatures", MS Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran (2012).
9. Yahyai, M. and Hasanpour Ghamsari, B. "Behaviour of continuous beam to column connections in post earthquake fire", 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal (24-28 September 2012).
10. Khashayar, N. "Behaviour of composite slab at elevated temperatures", MS Thesis, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran (2012).
11. Nadjaia, A., Vassartb, O., Alib, F. Talamonab, D., Al-lamb, A. and Hawesb, M. "Performance of cellular composite floor beams at elevated temperatures", *Fire Safety Journal*, **42**(6-7), pp. 489-497 (2007).
12. ASTM E119-05a, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials (2007).
13. ISO834, Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction (2009).
14. Euro code 3, *Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules Structural Fire Design (Drafts)*, Document CEN, European Committee for Standardization (2010).