مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
وزارت راه و شهرسازی

بخش مهندسی آتش

نام پروژه:

گزارش تحقیقاتی ارزیابی و بررسی کیفی پوشش ضد حریق NAX CB

کارفرما:

شرکت نانو عایق آکسون

گزارش نهایی

زمستان ۱۳۹۹

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- مبانی محافظت سازه‌های فولادی در مقابل آتش	۳
۲- استانداردهای مورد استفاده	۱۸
۳- تاریخ آزمون	۱۸
۴- شرح نمونه مورد آزمون	۱۸
۵- نصب ترموکوپل‌ها و اندازه‌گیری‌ها	۲۱
۶- منحنی دما-زمان کوره	۲۲
۷- منحنی دما-زمان ترموکوپل‌های نصب شده بر سطح آزمونه‌ها و مشاهدات	۲۲
۸- خلاصه گزارش آزمون‌های مقاومت در برابر آتش	۳۱

۱- مبانی محافظت سازه‌های فولادی در مقابل آتش

۱-۱- مبانی مقرراتی در خصوص مبحث مقاومت در مقابل آتش

محافظت ساختمان‌ها در برابر آتش‌سوزی از ابعاد ایمنی جانی، مالی و منافع ملی از ضروری‌ترین نیازها و الزامات در طرح و اجرای ساختمان‌ها است. دانش فنی و فناوری‌های ایمنی در برابر آتش در دنیا به سرعت در حال رشد است. این موضوع فقط به ساختمان‌های متعارف محدود نمی‌شود و زمینه‌های متعدد دیگر در کشور مانند سیستم‌های حمل و نقل و سازه‌های خاص همگی نیازمند تحقیقات و فناوری‌های ایمنی در برابر آتش هستند.

ضوابط ایمنی در برابر آتش شامل موارد متعددی همچون تعیین مشخصات راه‌های خروج، طراحی سیستم‌های کشف، اعلام و اطفای حریق، کنترل مصالح ساختمانی، کنترل دود و نیز محافظت اجزای ساختمانی در برابر آتش می‌باشد. در این میان، حفاظت از اعضای سازه‌ای به وسیله پوشش‌های محافظت‌کننده در برابر آتش از اهمیت زیادی برخوردار است.

مطابق ویرایش سوم مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ایران مورخ ۱۳۹۵، یکی از پیش‌نیازهای اصلی برای تامین ایمنی در برابر حریق ساختمان‌ها، تامین ضوابط مقاومت در مقابل آتش اجزای ساختمان می‌باشد. بر اساس مقررات این مبحث، تمامی ساختمان‌ها باید در یکی از پنج نوع ساختار تعریف شده در آن دسته‌بندی قرار گیرند. حداقل درجه‌بندی الزامی مقاومت در برابر آتش اجزای ساختمان در هر ساختار نیز مطابق این مبحث در جدول ۱ ارائه شده است.

از طرف دیگر مطابق مبحث سوم مقررات ملی ساختمان، ارتفاع و مساحت مجاز یک ساختمان به ساختار و تصرف آن بستگی دارد که برای نمونه قسمتی از آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱: درجه الزامی مقاومت در برابر حریق اجزای ساختمان در ساختارهای مختلف

جزء ساختمان	نوع ۱		نوع ۲		نوع ۳		نوع ۴	نوع ۵	
	الف	ب	الف (پ)	ب	الف (پ)	ب	الوار سنگین	الف (پ)	ب
قاب سازه‌ای[الف] شامل ستونها، تیرهای اصلی و خرپاها	۳(پ)	۲(پ)	۱	-	۱	-	الوار سنگین	۱	-
دیوارهای باربر خارجی[ت]	۳	۲	۱	-	۲	۲	۲	۲	۱
دیوارهای باربر داخلی	۳(پ)	۲(پ)	۱	-	۱	-	۱ یا الوار سنگین	۱	-
دیوارها وجدا کننده‌های غیر باربر خارجی	به جدول ۳-۳-۲-ب مراجعه کنید								
دیوارها و جداکننده‌های غیر باربر داخلی بین واحدها و نیز بین واحدها با مشاعات[ت]	-	-	-	-	-	-	۱	-	-
ساختار سقف سازه‌ای شامل تیرهای فرعی و تیرچه‌ها	۲	۲	۱	-	۱	-	الوار	۱	-
ساختار بام شامل تیرهای فرعی و تیرچه ها	۱/۵	۱	۱	-	۱	-	الوار	۱	-

جدول ۲: مقادیر مجاز ارتفاع و مساحت ساختمان از نظر ایمنی در برابر آتش

		نوع ساختار ساختمان									
		نوع ۱		نوع ۲		نوع ۳		نوع ۴	نوع ۵		
		الف	ب	الف	ب	الف	ب	الوار سنگین	الف	ب	
تصرف	ارتفاع (m)	م.ن	۵۰	۲۰	۱۵	۲۰	۱۵	۲۰	۱۵	۱۲	
	حد مجاز تعداد طبقات و مساحت										
ت_۱	طبقات	م.ن	۵	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۱	
	مساحت	م.ن	م.ن	۱۵۰۰	۸۰۰	۱۳۰۰	۸۰۰	۱۴۰۰	۱۱۰۰	۵۰۰	
ت_۲	طبقات	م.ن	۱۱	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۱	
	مساحت	م.ن	م.ن	۱۵۰۰	۹۰۰	۱۳۰۰	۹۰۰	۱۴۰۰	۱۱۰۰	۵۵۰	
ت_۳	طبقات	م.ن	۱۱	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۱	
	مساحت	م.ن	م.ن	۱۵۰۰	۹۰۰	۱۳۰۰	۹۰۰	۱۴۰۰	۱۱۰۰	۵۵۰	
ت_٤	طبقات	م.ن	۱۱	۳	۲	۳	۲	۳	۲	۱	
	مساحت	م.ن	م.ن	۱۵۰۰	۹۰۰	۱۳۰۰	۹۰۰	۱۴۰۰	۱۱۰۰	۵۵۰	
ت_ه	طبقات	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	
	مساحت	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	م.ن	
ح	طبقات	م.ن	۱۱	۵	۴	۵	۴	۵	۳	۲	
	مساحت	م.ن	م.ن	۳۵۰۰	۲۱۰۰	۲۶۵۰	۱۷۵۰	۳۳۵۰	۱۶۵۰	۸۵۰	

۱-۲- تامین ضوابط مربوط به مقاومت در مقابل آتش برای ساختمان‌های فولادی

۱-۲-۱- مشخصات مکانیکی فولاد ساختمانی در دماهای بالا

همان طور که می‌دانیم ظرفیت باربری یک عضو فولادی به شرایط مرزی، مشخصات هندسی عضو (طول و شکل مقطع عضو) و مشخصات مکانیکی فولاد مورد استفاده در آن عضو وابسته است. در دماهای بالا، علاوه بر موارد فوق‌الذکر، با وابستگی مشخصات مکانیکی فولاد با دما نیز روبرو خواهیم بود. به عنوان مثال، مقاومت اسمی یک ستون فولادی برای مود خرابی کمانش خمشی مطابق آئین‌نامه AISC 360 از رابطه زیر بدست می‌آید:

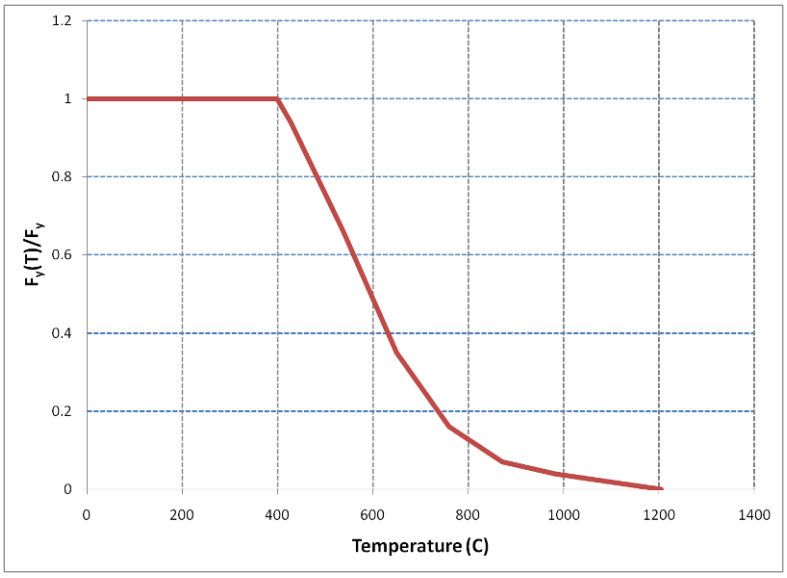
$$F_{cr}(T) = \left[0.42^{\sqrt{F_y(T)/F_e(T)}}\right] F_y(T) \qquad (۱)$$

$$F_e(T) = \frac{\pi^2 E(T)}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \qquad (۲)$$

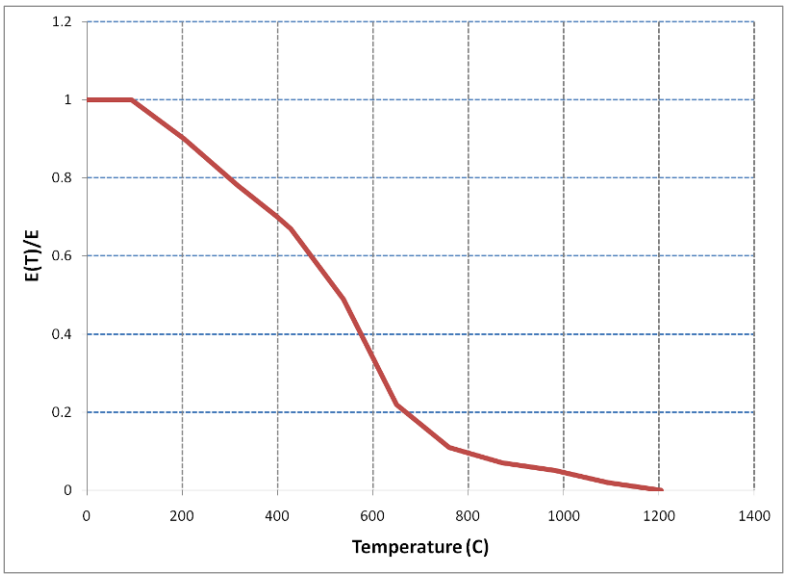
در این روابط، $F_y(T)$، مقاومت تسلیم فولاد در دمای بالا و $F_e(T)$، مقاومت کمانش الاستیک بحرانی در دمای بالا است که به $E(T)$، مدول الاستیک فولاد در دمای بالا وابسته است. پارامترهای K، L و r، به ترتیب بیانگر ضریب لاغری، طول ستون و شعاع ژیراسیون مقطع ستون هستند.

دو پارامتر مکانیکی مهم فولاد که در محاسبه ظرفیت باربری یک عضو فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از: مقاومت تسلیم و مدول الاستیک. البته سختی یک عضو فولادی به مدول الاستیک فولاد نیز وابسته می‌باشد.

برای فولادهای ساختمانی متداول با تنش تسلیم کوچکتر از ۴۴۸ مگاپاسکال، نحوه کاهش تنش تسلیم و مدول الاستیک فولاد با افزایش دما در آئین‌نامه AISC 360 ارائه شده است. مطابق این آئین‌نامه، ضریب انبساط حرارتی فولاد برای دماهای بالاتر از ۶۵ درجه سلسیوس، برابر 1.4×10^{-5} (1/°C) می‌باشد. همچنین مطابق این آئین‌نامه، نسبت مقاومت تسلیم و مدول الاستیک فولاد در دماهای بالا نسبت به مقادیر آنها در دمای اتاق (۲۰ درجه سلسیوس) در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: نسبت مقاومت تسلیم فولاد در دماهای بالا نسبت به دمای اتاق



شکل ۲: نسبت مدول الاستیک فولاد در دماهای بالا نسبت به دمای اتاق

بعد از مطالعه آئین‌نامه اروپایی BS EN 1993-1-2 نیز مشاهده می‌شود که رابطه ارائه شده در این آئین‌نامه در خصوص کاهش مشخصات مکانیکی فولاد (مقاومت تسلیم و مدول الاستیک) با افزایش دما، مشابه آئین‌نامه آمریکایی AISC 360 بوده و از این نظر اختلافی با هم ندارند.

مطابق شکل ۱ مشاهده می‌شود که تا دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت تسلیم فولاد، افتی ندارد ولی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، افت آن به میزان ۲۳ درصد شروع شده که در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، این افت به میزان قابل توجهی افزایش یافته و به ۵۲ درصد می‌رسد و نهایتاً در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس، با افت زیاد ۷۳ درصدی در مقاومت تسلیم فولاد مواجه هستیم.

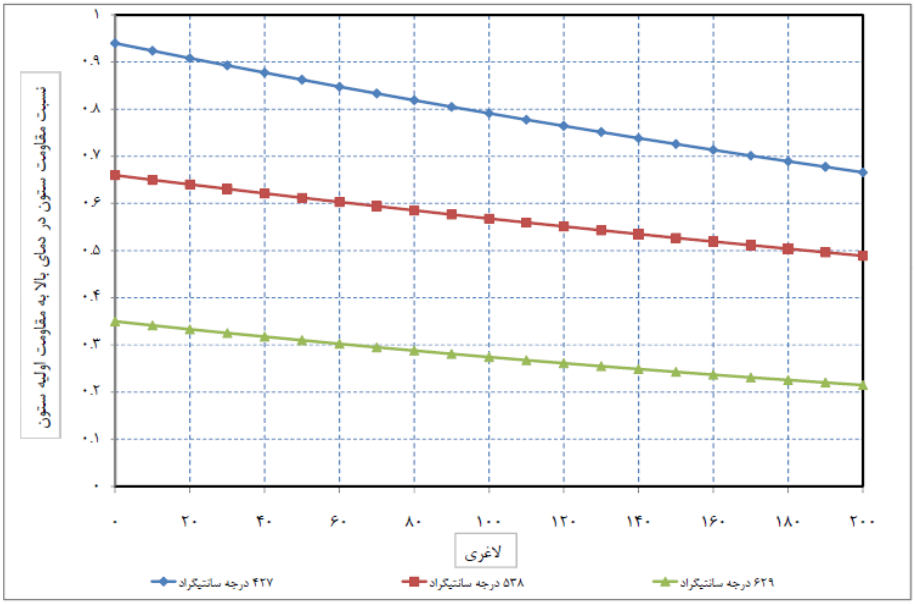
مطابق شکل ۲ مشاهده می‌شود که بر خلاف مقاومت تسلیم فولاد، شروع کاهش مدول الاستیک فولاد در دماهای پایین‌تری اتفاق می‌افتد که علاوه بر کاهش ظرفیت باربری اعضای فولادی، منجر به نرم شدن فولاد و بنابراین تغییر فرم اعضای فولادی می‌شود. همچنین میزان افت مدول الاستیک فولاد در مقایسه با مقاومت تسلیم فولاد در دماهای بالا، شدیدتر است. مطابق این شکل، تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، مدول الاستیک فولاد، افتی ندارد ولی در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، افت آن به میزان ۱۰ درصد شروع شده که در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، این افت به میزان قابل توجهی افزایش یافته و به ۴۴ درصد می‌رسد و نهایتاً در دماهای ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس، به ترتیب با افت زیاد ۶۴ و ۸۴ درصدی در مدول الاستیک فولاد مواجه هستیم.

در انتها می‌توان نتیجه گرفت که عملاً در دماهای بالای بین ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سلسیوس، زوال قابل ملاحظه‌ای در مشخصات مکانیکی فولاد رخ داده و بنابراین عملاً خرابی و فروریزش سازه‌های فولادی در آتش‌سوزی‌ها، بسته به حاشیه ایمنی در نظر گرفته شده در طراحی سازه، معمولاً جایی در این محدوده دمایی اتفاق خواهد افتاد.

۱-۲-۲- دمای بحرانی یک عضو سازه‌ای فولادی

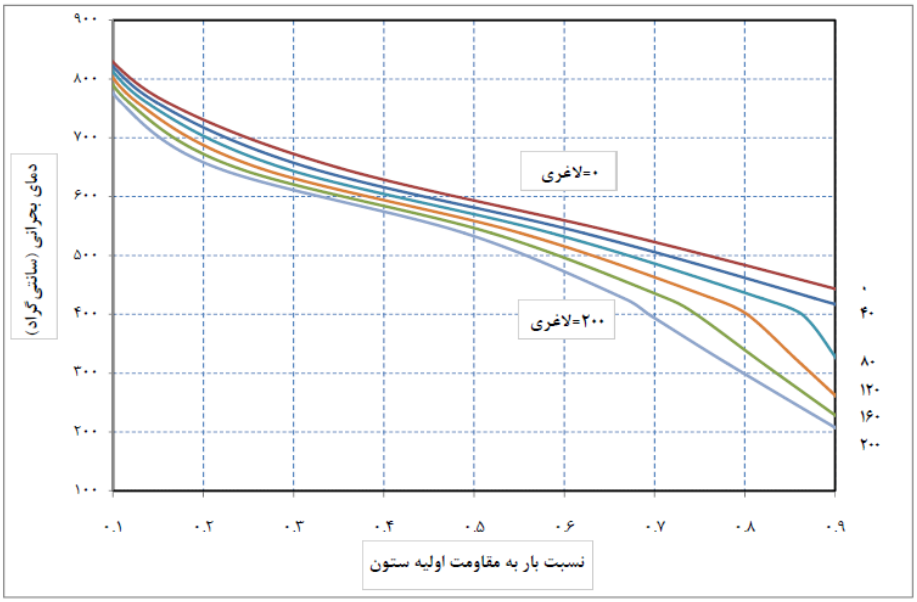
دمای بحرانی یک عضو فولادی بنا به تعریف دمایی است که در آن، دیگر عضو قادر به ادامه عملکرد اصلی خود نباشد به عبارت دیگر، دمایی است که اگر مصالح فولادی عضو سازه‌ای به آن برسد، دیگر آن عضو قادر به تحمل بارهای وارده نباشد.

در هنگام آتش‌سوزی، در اثر حرارت بالای ایجاد شده، مشخصات مکانیکی فولاد شامل مقاومت تسلیم (Fy) و مدول الاستیسیته (E) متناسب با افزایش دما، کاهش یافته و به تبع آن، مقاومت عضو فولادی کم می‌شود. به عنوان مثال، نسبت مقاومت ستون با فولاد ST37 در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق با آئین‌نامه AISC 360، محاسبه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. برای نمونه مطابق با این شکل، دیده می‌شود که با افزایش دمای یک ستون با لاغری ۱۰۰ به ۴۲۷، ۵۳۸ و ۶۴۹ درجه سلسیوس، مقاومت فشاری ستون به ترتیب به میزان ۲۱، ۴۳ و ۷۳ درصد کاهش خواهد یافت.



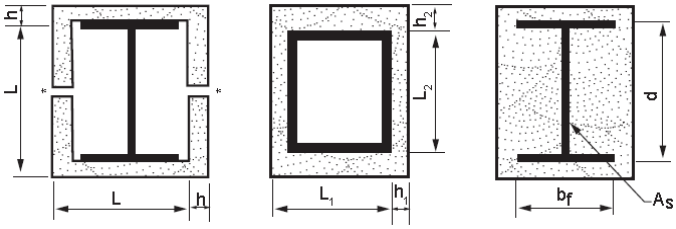
شکل ۳: میزان کاهش ظرفیت باربری فشاری ستون در دماهای بالا

همچنین دمای بحرانی ستون با فولاد ST37 برای لاغری‌ها و نسبت‌های مختلف بار فشاری وارده به مقاومت اولیه ستون مطابق با این آئین‌نامه، در شکل ۴ ارائه شده است. برای ستون‌های طراحی شده مطابق آئین‌نامه و لاغری پایین، نسبت بار به مقاومت ستون حدود ۰/۶ و برای ستون‌ها با لاغری بالا، این نسبت حدود ۰/۵ خواهد شد که در هر دو حالت، دمای بحرانی ستون فولادی در حوالی ۵۵۰ درج سلسیوس قرار خواهد گرفت. این دمای بحرانی در استاندارد ASTM E 119 نیز ذکر شده است که انطباق خوبی مشاهده می‌شود.

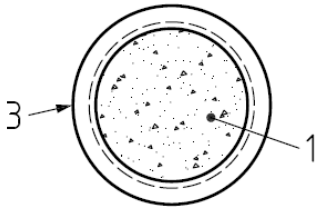


شکل ۴: گراف‌های مربوط به دمای بحرانی ستون فولادی متداول ساختمانی

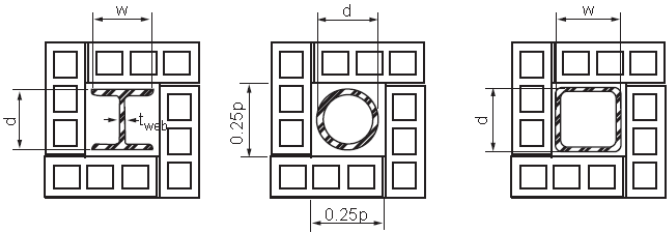
بنابراین برای تامین مقاومت در برابر آتش الزامی آئین‌نامه‌های ساختمانی برای سازه‌های فولادی، با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، این نوع سازه‌ها، نیازمند سیستم محافظ حریق می‌باشند. انواع متداول این سیستم‌های محافظت کننده در شکل ۵ نمایش داده شده است.



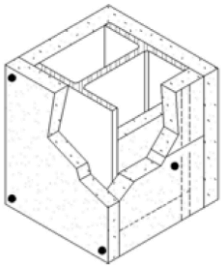
۱) استفاده از مصالح بتنی



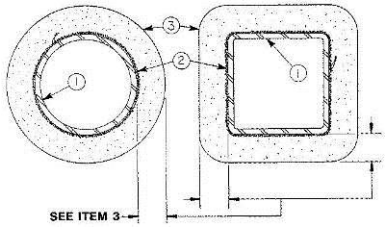
۲) پر کردن داخل ستون‌های فولادی با بتن



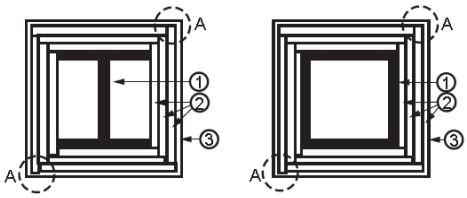
۳) استفاده از مصالح بنایی



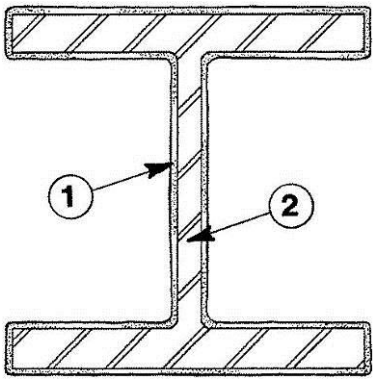
۴) استفاده از تخته‌های الیاف معدنی



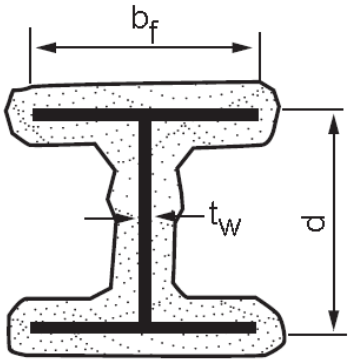
۵) استفاده از رابیتس و اندود سیمانی یا گچی



۶) استفاده از تخته گچی



۷) استفاده از رنگ‌های پف‌کننده



۸) استفاده از پوشش‌های معدنی پاششی

شکل ۵: انواع روش‌های معمول محافظت اعضای فولادی در مقابل آتش

۱-۲-۳- ضریب مقطع یک عضو فولادی

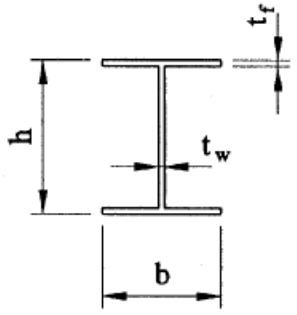
نرخ تغییر دما در یک جسم تابعی از جرم و مساحت سطح در معرض اختلاف دما می‌باشد. بنابراین یک ضریب تعیین کننده مقاومت در برابر آتش عضو فولادی، ضریب مقطع SF=P/A می‌باشد که در آن، A، مساحت مقطع عضو فولادی و P، محیط داخل سیستم محافظت کننده در برابر آتش است.

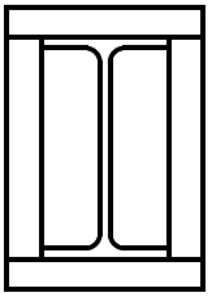
هرچه نسبت P/A کوچکتر باشد، نرخ تغییر دما کندتر است. بنابراین به عنوان یک قانون عمومی، مقاطع فولادی با نسبت‌های P/A کوچکتر، عملکرد بهتری در آزمون‌های آتش نسبت به مقطع‌های محافظت شده مشابه ولی با P/A بزرگتر، دارند.

در شکل‌های ۶ و ۷، نحوه محاسبه ضریب مقطع برای اعضای فولادی با مقطع I و توخالی نشان داده شده است. در شکل ۸ به طور شماتیک نیز اثر ضریب مقطع نمایش داده شده است.

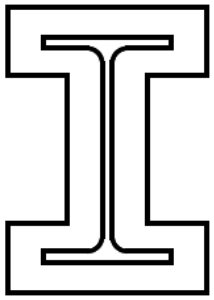
Section Factor=P/A

$A=t_w(h-2t_f)+2b\times t_f$

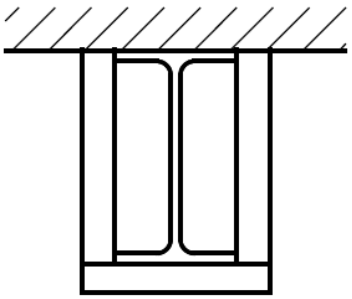




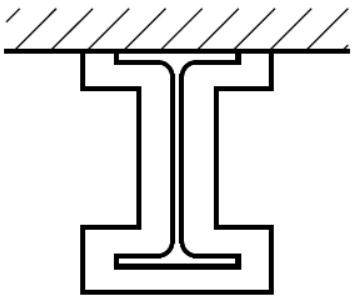
P=2b+2h



P=4b+2h-2t_w



P=b+2h

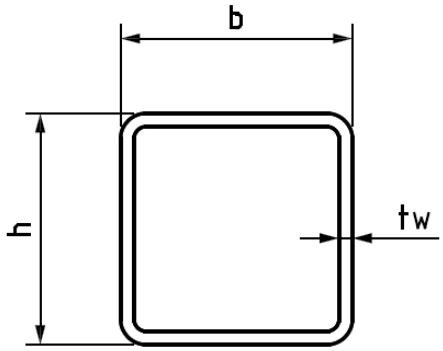


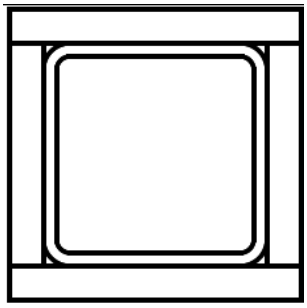
P=3b+2h-2tw

شکل ۶: نحوه تعیین ضریب مقطع برای ستون‌ها و تیرهای فولادی با مقطع I شکل

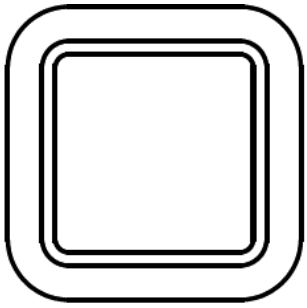
Section Factor=P/A

$A=t_w(2b+2h-4t_w)$



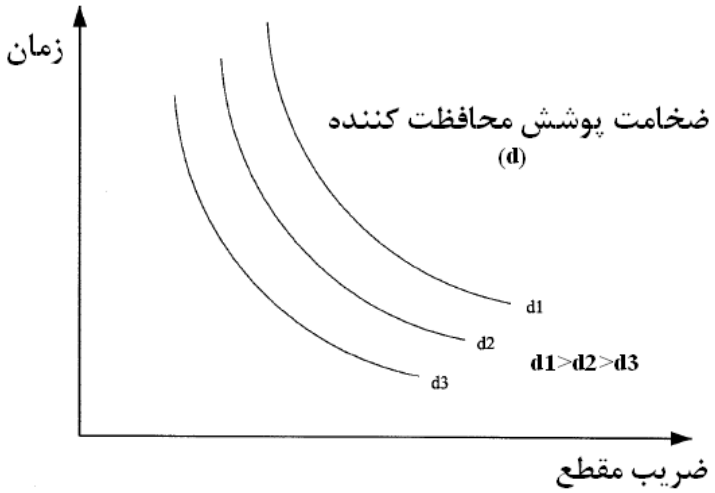


P=2b+2h



P=2b+2h

شکل ۷: نحوه تعیین ضریب مقطع برای ستون‌ها با مقطع مستطیلی توخالی



شکل ۸: منحنی تغییرات زمان، ضخامت پوشش محافظت‌کننده و ضریب مقطع برای یک دمای طراحی مشخص

مطابق شکل ۸، برای پوشش محافظ حریق با ضخامت ثابت، با افزایش ضریب مقطع عضو فولادی، زمان مقاومت در برابر آتش کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، برای یک زمان مقاومت در برابر آتش مشخص، با افزایش ضریب مقطع عضو فولادی، ضخامت پوشش محافظ حریق نیز باید افزایش یابد.

۱-۳- جداول ضخامت پوشش‌های محافظ حریق پایه معدنی پاششی

پوشش‌های محافظ حریق پایه معدنی پاششی عموماً دارای چسباننده سیمانی یا گچی بوده که چسبندگی لازم برای این مواد را تامین می‌کنند. همچنین این مواد عموماً دارای سبکدانه‌های ورمیکولیتی یا پرلیتی بوده که مقاومت حرارتی بالایی دارند. این نوع پوشش‌های محافظ حریق، اغلب به روش پاشش، اجرا شده ولی در کارهای جزئی، به کمک ماله نیز روی سطح مورد نظر، اجرا می‌شوند.

در حالت متداول برای کاربرد پوشش‌های محافظ حریق پایه معدنی پاششی در پروژه‌های ساختمانی، با جداول ضخامت این پوشش‌ها سروکار داریم که یک نمونه از آن در جدول ۳ ارائه شده است. برای نمونه مطابق جدول ۳، بر روی یک عضو فولادی با ضریب مقطع $120\ m^{-1}$، اگر پوشش محافظ حریق با ضخامت ۲۴ میلی‌متر اجرا شود، ۱۲۰ دقیقه طول خواهد کشید تا دمای متوسط آن به ۵۴۰ درجه سلسیوس برسد.

با کمک این جداول ضخامت می‌توان ضخامت مورد نیاز برای رسیدن به زمان مقاومت در برابر آتش مورد نظر را برای هر نوع عضو فولادی تعیین نمود. البته باید توجه داشت که در حالت کلی، اگر ستون‌ها و تیرهای فولادی مطابق آئین‌نامه ساختمانی طراحی شده باشند با توجه به مقادیر ضرایب ایمنی این آئین‌نامه‌ها، به طور کلی، دمای بحرانی در حالت ستون‌ها و تیرهای فولادی تنها، برابر ۵۵۰ درجه سلسیوس است ولی در حالت تیر فولادی همراه با دال بتنی، برابر ۶۲۰ درجه سلسیوس خواهد بود. بدیهی است برای اعضای فولادی ضعیف‌تر و قوی‌تر از حد آئین‌نامه، دماهای بحرانی به ترتیب، کاهش و افزایش خواهد یافت که منجر به تغییر ضخامت مورد نیاز از پوشش‌های محافظ حریق خواهد شد (دمای بحرانی کمتر به معنای نیاز به افزایش ضخامت پوشش محافظ حریق و دمای بحرانی بیشتر به معنای نیاز به کاهش ضخامت پوشش محافظ حریق است).

جدول ۳: جدول ضخامت یک ماده محافظ حریق پایه معدنی پاششی برای زمان‌های مختلف مقاومت در برابر آتش و ضرایب مقطع مختلف عضو فولادی برای دمای طراحی ۵۴۰ درجه سلسیوس

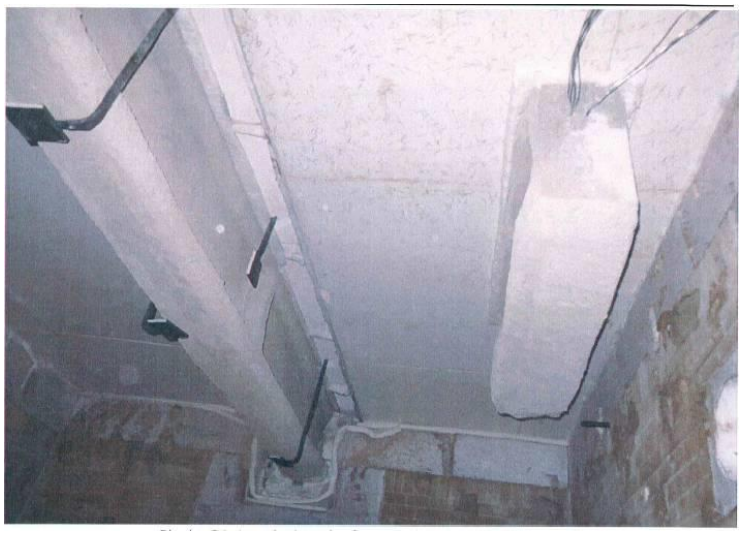
CRITICAL STEEL TEMPERATURE 540°C

Applicable to I section beams and columns and other sections having a re-entrant profile

Section Factor m-1	Thickness (mm) for fire resistance period of (mins)					
	30	60	90	120	180	240
30	10	10	10	12	17	23
40	10	10	11	15	21	27
50	10	10	13	16	24	31
60	10	10	14	18	26	34
70	10	11	15	19	28	36
80	10	12	16	21	30	38
90	10	12	17	22	31	40
100	10	13	18	23	32	42
110	10	13	18	23	33	44
120	10	14	19	24	34	45
130	10	14	19	25	35	46
140	10	14	20	25	36	47
150	10	15	20	26	37	48
160	10	15	21	26	38	49
170	10	15	21	27	38	50
180	10	15	21	27	39	50
190	10	16	21	27	39	51
200	10	16	22	28	40	52
210	10	16	22	28	40	52
220	10	16	22	28	41	53
230	10	16	22	29	41	53
240	10	16	23	29	41	54
250	10	16	23	29	42	54
260	10	17	23	29	42	55
270	10	17	23	29	42	55
280	10	17	23	30	43	55
290	10	17	23	30	43	56
300	11	17	24	30	43	56
310	11	17	24	30	43	56

در حال حاضر، مناسب‌ترین روش برای تولید جداول ضخامت پوشش‌های محافظ حریق پایه معدنی، روش استاندارد BS EN 13381-4 می‌باشد که مراحل مختلف آن به طور خلاصه به قرار زیر است. اطلاعات کامل در این خصوص در مجموعه‌ای تحت عنوان "دستورالعمل‌های ارزیابی پوشش‌های معدنی پاششی محافظت‌کننده در برابر آتش برای سازه‌های فولادی" ارائه شده است که در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در دست چاپ می‌باشد.

- آزمایش آتش دو نمونه تیر با مقیاس واقعی تحت بار و دو نمونه تیر کوتاه بدون بار مشابه به طور همزمان در دو حالت حداکثر و حداقل ضخامت پوشش محافظت‌کننده (ضریب مقطع تیر در وسط محدوده مورد نظر است) که برای نمونه در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: آزمون حریق همزمان دو تیر فولادی محافظت شده در دو حالت با و بدون بار

- تعیین ضریب اصلاح زمان از تقسیم مدت زمان تیر تحت بار به تیر کوتاه بدون بار مشابه برای رسیدن به دمای طراحی مورد نظر در دو حالت حداکثر و حداقل ضخامت پوشش محافظتکننده به منظور در نظر گرفتن آسیب و ترک پوشش محافظ ناشی از تغییرشکل تیر.

- تعیین ضریب اصلاح زمان برای هر ضخامت پوشش محافظتکننده برای دمای طراحی مورد نظر طبق رابطه زیر:

$$k_i = \left[\frac{k_{max} - k_{min}}{d_{max} - d_{min}}\right](d_i - d_{min}) + k_{min} \qquad (۳)$$

- انتخاب چند ستون کوتاه به عنوان نماینده‌ای از محدوده ضریب مقطع مورد نظر (۱۳ نمونه) که در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: ستون‌های فولادی کوتاه انتخابی برای آزمون‌های مقاومت در برابر آتش

Section Range Factor (K_s)	Thickness Range factor (K_d)			
	0,0 (d_{min})	0,2 to 0,5	0,5 to 0,8	1,0 (d_{max})
0,0 (s_{min})	✓	✓	✓	
	✓ptp			
0,2 to 0,5	✓		✓	✓
	✓ptp			
	✓ptp	✓ptp		✓ptp
0,5 to 0,8	✓	✓	✓	✓
		✓ptp	✓ptp	✓ptp
		✓ptp	✓ptp	✓ptp
1,0 (s_{max})		✓	✓	✓

- آزمایش آتش ستونهای کوتاه نماینده در حالت بدون بار که برای نمونه، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

شکل ۱۰: آزمون آتش یک ستون فولادی یک متری محافظت شده در مقابل حریق

- تصحیح زمان ستونهای کوتاه با توجه به ضریب اصلاح زمان محاسبه شده؛

- انتخاب تحلیل رگرسیون عددی و تعیین ثوابت رابطه زیر:

$$t = a_0 + a_1 d_p + a_2 \frac{d_p}{A_m / V} + a_3 \theta_a + a_4 d_p \theta_a + a_5 d_p \frac{\theta_a}{A_m / V} + a_6 \frac{\theta_a}{A_m / V} + a_7 \frac{1}{A_m / V} \quad (۴)$$

- کنترل معیارهای پذیرش زیر و در صورت نیاز، اصلاح ثوابت رابطه فوق:

الف) در هیچ ستونی نباید زمان پیش‌بینی شده برای رسیدن به یک دمای طراحی بیش از ۱۵٪ بیشتر از زمان اندازه‌گیری شده در آزمون باشد.

ب) مقدار متوسط همه درصد اختلافات، محاسبه شده مطابق بند (الف)، باید کمتر از صفر باشد.

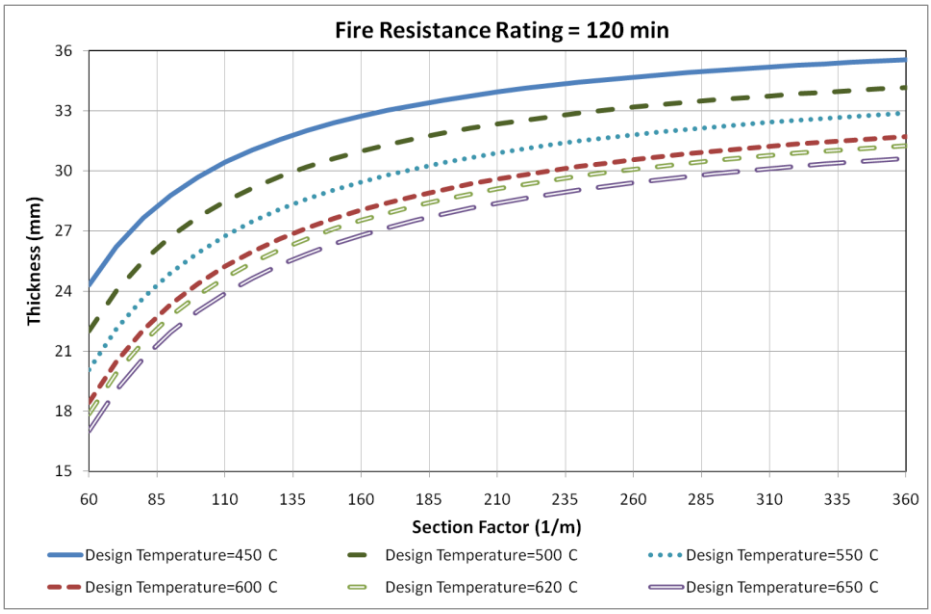
ج) حداکثر ۳۰٪ از مقادیر درصد اختلاف، محاسبه شده مطابق بند (الف)، می‌تواند بزرگتر از صفر باشد.

- تولید جداول ضخامت پوشش محافظت‌کننده برای دماهای طراحی مختلف. در تولید جدول ضخامت باید توجه داشت که محدوده جدول حداکثر می‌تواند ۵ درصد خارج از محدوده ضخامت‌های انتخابی برای پوشش و ۱۰ درصد خارج از محدوده ضرایب مقاطع پروفیل‌های انتخابی باشد.

برای مثال، یک جدول ضخامت تولید شده بر اساس این روش برای یک نوع ماده محافظ حریق پایه معدنی پاششی برای دو ساعت مقاومت در برابر آتش به همراه گراف‌های آن در جدول ۵ و شکل ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۵: جدول ضخامت پوشش محافظ معدنی برای ۲ ساعت مقاومت در برابر آتش

Thickness (mm)								
Fire Resistance Rating = 120 min								
Section Factor (1/m)	Design Temperature (°C)							
	350	400	450	500	550	600	620	650
60	31	27	24	22	20	18	18	17
70	32	29	26	24	22	20	20	19
80	33	30	28	26	24	22	21	21
90	34	31	29	27	25	23	23	22
100	35	32	30	28	26	24	24	23
110	35	33	30	28	27	25	25	24
120	36	33	31	29	27	26	25	25
130	36	34	32	30	28	27	26	25
140	36	34	32	30	29	27	27	26
150	37	34	32	31	29	28	27	26
160	37	35	33	31	29	28	28	27
170	37	35	33	31	30	28	28	27
180	37	35	33	32	30	29	28	28
190	37	35	34	32	30	29	29	28
200	38	36	34	32	31	29	29	28
210	38	36	34	32	31	30	29	28
220	38	36	34	33	31	30	29	29
230	38	36	34	33	31	30	30	29
240	38	36	34	33	31	30	30	29
250	38	36	35	33	32	30	30	29
260	38	36	35	33	32	31	30	29
270	38	36	35	33	32	31	30	30
280	38	37	35	33	32	31	30	30
290	38	37	35	34	32	31	31	30
300	38	37	35	34	32	31	31	30
310	39	37	35	34	32	31	31	30
320	39	37	35	34	33	31	31	30
330	39	37	35	34	33	31	31	30
340	39	37	35	34	33	32	31	30
350	39	37	35	34	33	32	31	31
360	39	37	36	34	33	32	31	31



شکل ۱۱: گراف‌های ضخامت پوشش محافظ معدنی برای ۲ ساعت مقاومت در برابر آتش

برای تعیین جدول ضخامت برای مقاطع فولادی قوطی و لوله‌ای، نیاز به انجام مجدد آزمون‌های مقاومت در برابر آتش می‌باشد. به عنوان روش جایگزین، می‌توان ضخامت مورد نیاز برای این مقاطع توخالی را از تصحیح ضخامت‌های مربوط به مقاطع I و H مطابق روابط زیر تعیین کرد:

$$T_B=T_I(1+SF/1000) \quad \text{for} \quad SF<250m^{-1}$$
$$T_B=1.25T_I \quad \text{for} \quad SF>250m^{-1} \qquad (۵)$$

در ادامه باید توجه داشت که به طور کلی در خصوص پوشش‌های محافظ حریق پاششی پایه معدنی، لازم است ملاحظات عمومی زیر مد نظر قرار گیرد:

- ملاحظات حفاظت و نگهداری: حفاظت از پوشش‌های پاششی در برابر رطوبت تا قبل از اجرا، لازم است. برخی از مصالح تحت تأثیر فشار زیاد دچار تغییر خواص می‌شوند، لذا رعایت نکات لازم در انبار کردن آنها، ضروری است.

- ملاحظات ایمنی و سلامت حین اجرا: اجرای انواعی از پوشش‌های پاششی ممکن است ذرات ریزی تولید کند که موجب سوزش پوست و چشم و مشکلات تنفسی شود لذا رعایت تمهیدات لازم در این خصوص ضروری است.

- ملاحظات بعد از اجرای پاشش: پوشش پاششی پس از اجرا تا زمان گیرش نهایی، بسیار آسیب‌پذیر بوده و بنابراین در این مدت ضروری است تا پوشش پاششی در معرض خشک شدن سریع، باران، آب جاری، یخ زدن، حرکت سازه‌ای، ارتعاش و ضربه قرار نگیرد.

۲- استانداردهای مورد استفاده

آزمون تعیین مقاومت در برابر آتش سلولزی بر روی پوشش معدنی پایه سیمانی محافظت کننده در برابر آتش NAX CB، که بر روی نمونه‌های ستون فولادی اجرا شده بود، در کوره مقاومت در برابر آتش مقیاس متوسط انجام شد. منحنی دما-زمان کوره مطابق با استانداردهای ملی و اروپایی زیر بود:

۱- استاندارد ملی ایران شماره ۱-۱۲۰۵۵ - مقاومت در برابر آتش - قسمت اول - الزامات عمومی.

2- BS EN 1363-1:2012, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements

3- BS EN 13381-4:2013, Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part4: Applied protection to steel members

۳- تاریخ انجام آزمون‌ها

تاریخ انجام آزمون‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

۴- شرح نمونه مورد آزمون

در راستای پروژه ارزیابی و بررسی کیفی پوشش ضد حریق NAX CB، تعداد ۱۳ آزمون بر روی ستون‌های فولادی کوتاه مطابق استاندارد BS EN 13381-4:2013 انجام شد. ستون‌های فولادی مطابق استاندارد مذکور به طول ۱۰۰ سانتی‌متر تهیه شدند. آزمونه‌ها به طور ایستاده در کوره قرار داده شدند و از چهار سمت جانبی به طور مستقیم در معرض حرارت قرار داشتند. پایین هر نمونه بر روی پشم سرامیک قرار داشت و بالای آن نیز پشم سرامیک قرار گرفت تا ستون‌ها از سطوح بالا و پایین در معرض مستقیم آتش قرار نداشته باشند. تعداد، مشخصات و ضخامت پوشش محافظ حریق آزمونه‌ها مطابق استاندارد BS EN 13381-4:2013 در جدول ۶ ارائه شده است. ضخامت پوشش آزمونه‌ها طبق درخواست شرکت نانو عایق آکسون بین ۱ سانتی‌متر تا ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بازدید و نمونه‌برداری از کارخانه شرکت نانو عایق آکسون توسط کارشناسان مرکز صورت گرفت. پاشش پوشش پایه معدنی بر روی ستون‌های یک متری توسط عوامل شرکت نانو عایق آکسون در اتاق پاشش مرکز انجام و کارشناسان مرکز بر روی نحوه اجرا و تعیین ضخامت آزمونه‌ها، نظارت داشتند.

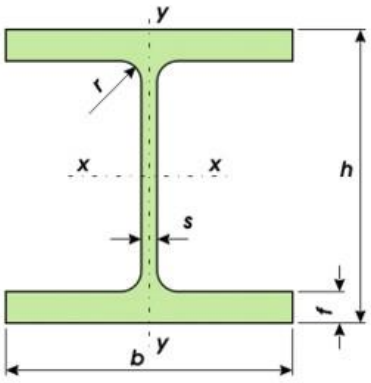
تمامی آزمونه‌ها حداقل به مدت ۲ ماه پس از اتمام عملیات پاشش در محل سوله آزمایشگاه به منظور تثبیت شرایط نگهداری شدند. تاریخ عملیات پاشش و انجام آزمون‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶: ستون‌های فولادی مورد آزمون و ضخامت‌های پوشش محافظ حریق پایه سیمانی NAX CB

Section Range Factor (K_s)	Thickness Range Factor (K_d)			
	0.0 (d_{min})	0.2-0.5 (0.35)	0.5-0.8 (0.65)	1.0 (d_{max})
0.0 (S_{min})	**Box 35×35×3** 36.5 m^{-1},10 mm 0.0,0.0	**Box 35×35×3** 36.5 m^{-1},23 mm 0.0,0.25	**Box 35×35×3** 36.5 m-1,38 mm 0.0,0.55	
0.2-0.5 (0.35)	**HEB 360** 108.7 m^{-1},10 mm 0.25,0.0		**HEA 360** 138.2 m^{-1},43 mm 0.35,0.65	**HEA 300** 165.9 m^{-1},60 mm 0.44,1.0
0.5-0.8 (0.65)	**HEA 240** 192.3 m^{-1},10 mm 0.53,0.0	**HEA 200** 228.6 m^{-1},28 mm 0.66,0.35	**HEA 200** 228.6 m^{-1},43 mm 0.66,0.65	**IPE 240** 254.8 m^{-1},60 mm 0.75,1.0
1.0 (S_{max})		**IPE 160** 328.9 m^{-1},33 mm 1.0,0.45	**IPE 160** 328.9 m^{-1},48 mm 1.0,0.75	**IPE 160** 328.9 m^{-1},60 mm 1.0,1.0

جدول ۷: مشخصات ابعادی ستون‌های فولادی و تاریخ انجام پاشش و آزمون پوشش پاششی معدنی پایه سیمانی NAX CB

ردیف	ستون فولادی	h mm	b mm	s mm	t mm	h_p/A m^{-1}	ضخامت پوشش (mm)	تاریخ پاشش	تاریخ آزمون
۱	Box 35×35×3	۳۵۰	۳۵۰	۳۰	۳۰	۳۶/۵	۱۰	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۰۷/۰۸
۲							۲۳	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۰۷/۰۷
۳							۳۸	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۶
۴	HEB 360	۳۶۰	۳۰۰	۱۲/۵	۲۲/۵	۱۰۸/۷	۱۰	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۰۳
۵	HEA 360	۳۵۰	۳۰۰	۱۰	۱۷/۵	۱۳۸/۲	۴۳	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۰۴
۶	HEA 300	۲۹۰	۳۰۰	۸/۵	۱۴	۱۶۵/۹	۶۰	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۱
۷	HEA 240	۲۳۰	۲۴۰	۷/۵	۱۲	۱۹۲/۳	۱۰	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۰۳
۸	HEA 200	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۲۲۸/۶	۲۸	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۵
۹	HEA 200	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۲۲۸/۶	۴۳	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۰۴
۱۰	IPE 240	۲۴۰	۱۲۰	۶/۲	۹/۸	۲۵۴/۸	۶۰	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۱
۱۱	IPE 160	۱۶۰	۸۲	۵	۷/۴	۳۲۸/۹	۳۳	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۵
۱۲							۴۸	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۴
۱۳							۶۰	۹۸/۴/۱۶	۱۳۹۸/۱۲/۲۴

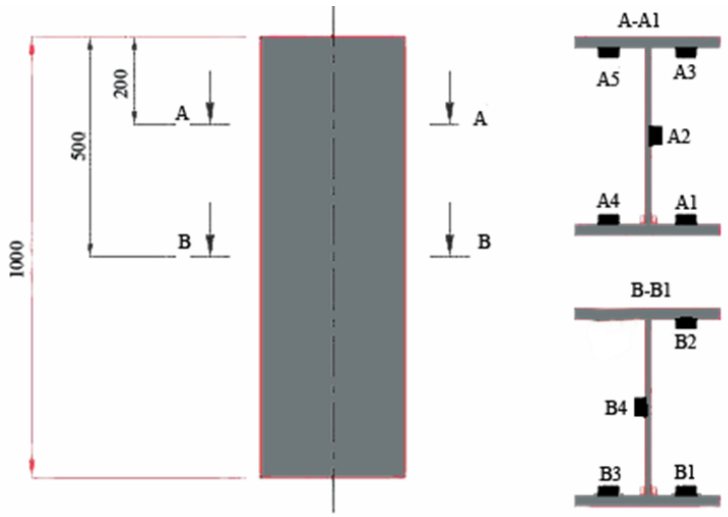


شکل ۱۲: مقطع ستون فولادی

شکل ۱۳: نحوه آماده‌سازی آزمونه‌ها

۵- نصب ترموکوپل‌ها و اندازه‌گیری‌ها

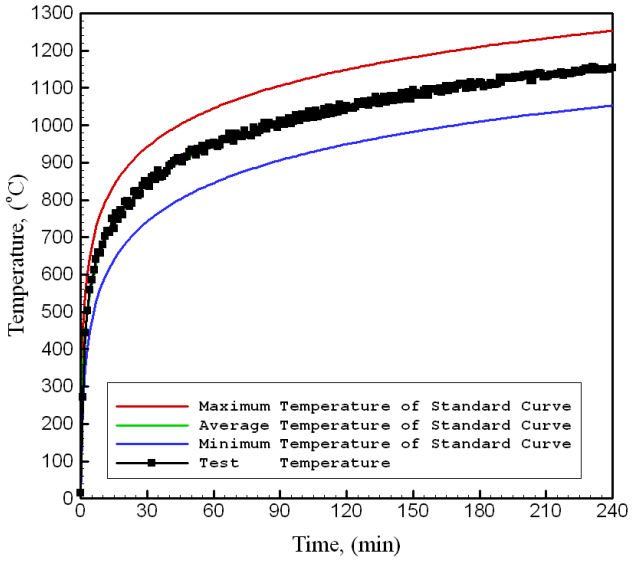
نه عدد ترموکوپل مطابق استاندارد BS EN 13381-4:2013 بر روی هر ستون فولادی نصب شد. محل نصب ترموکوپل‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: محل قرارگیری ترموکوپل‌ها

۶- منحنی دما-زمان کوره

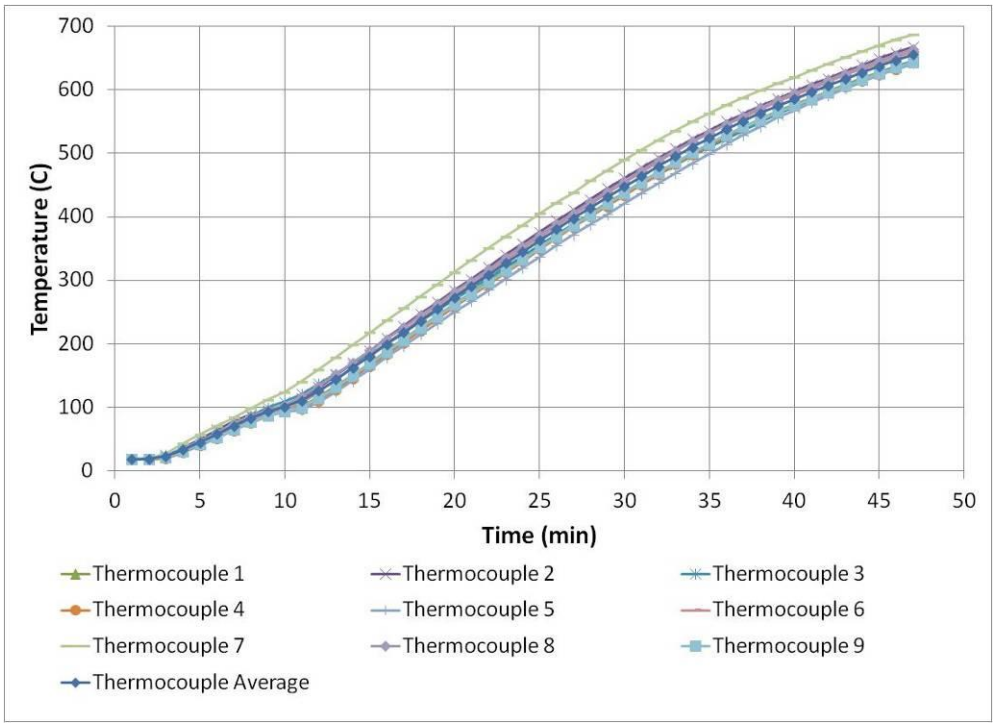
دمای متوسط کوره به وسیله ترموکوپل‌های نصب شده در داخل کوره اندازه‌گیری شد. مقادیر دمای بدست آمده از ترموکوپل‌ها و محدوده رواداری‌های یکی از آزمونه‌ها در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. برای تمام آزمون‌ها، منحنی دما – زمان کوره مطابق با منحنی استاندارد ISIRI 12055-1 بوده است.



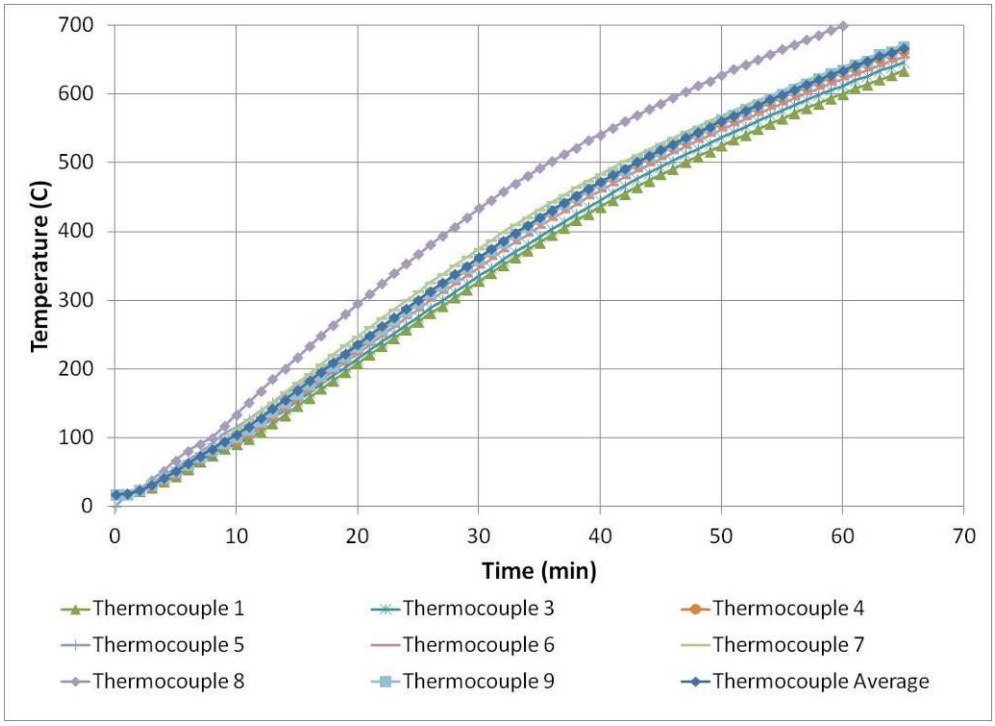
شکل ۱۵: منحنی دما-زمان کوره و مقایسه آن با منحنی استاندارد

۷- منحنی دما-زمان ترموکوپل‌های نصب شده بر سطح آزمونه‌ها و مشاهدات

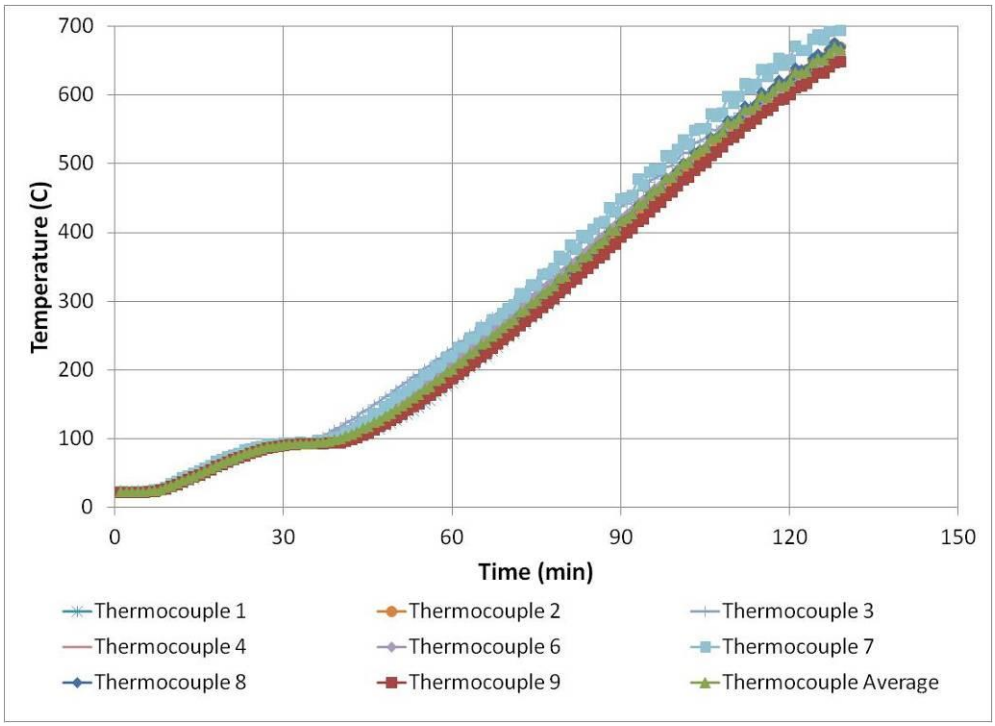
منحنی دما-زمان آزمونه‌های محافظت شده با پوشش محافظت کننده در مقابل حریق پایه سیمانی NAX CB در شکل‌های ۱۶ تا ۲۸ نمایش داده شده است.



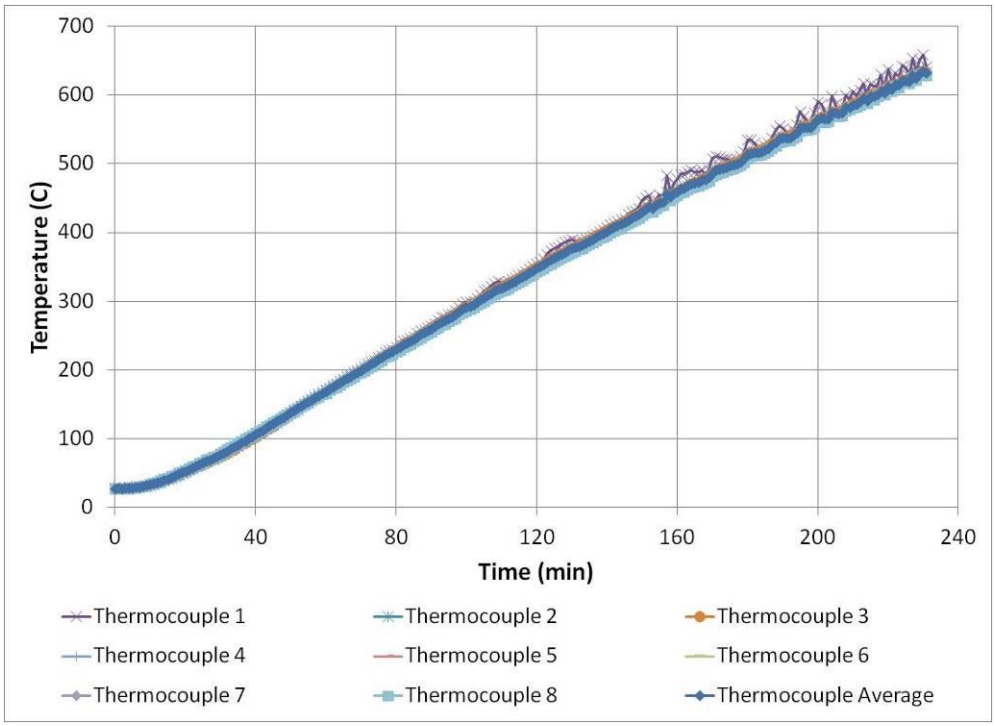
شکل ۱۶: ستون فولادی HEA 240 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۱۰ میلی‌متر



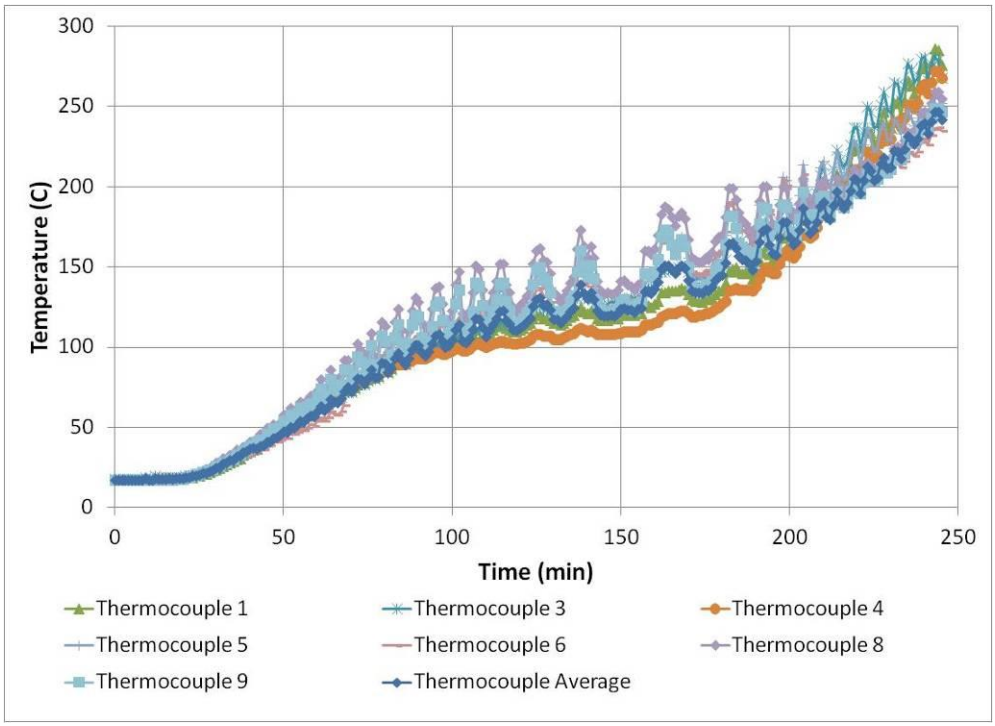
شکل ۱۷: ستون فولادی HEB 360 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۱۰ میلی‌متر



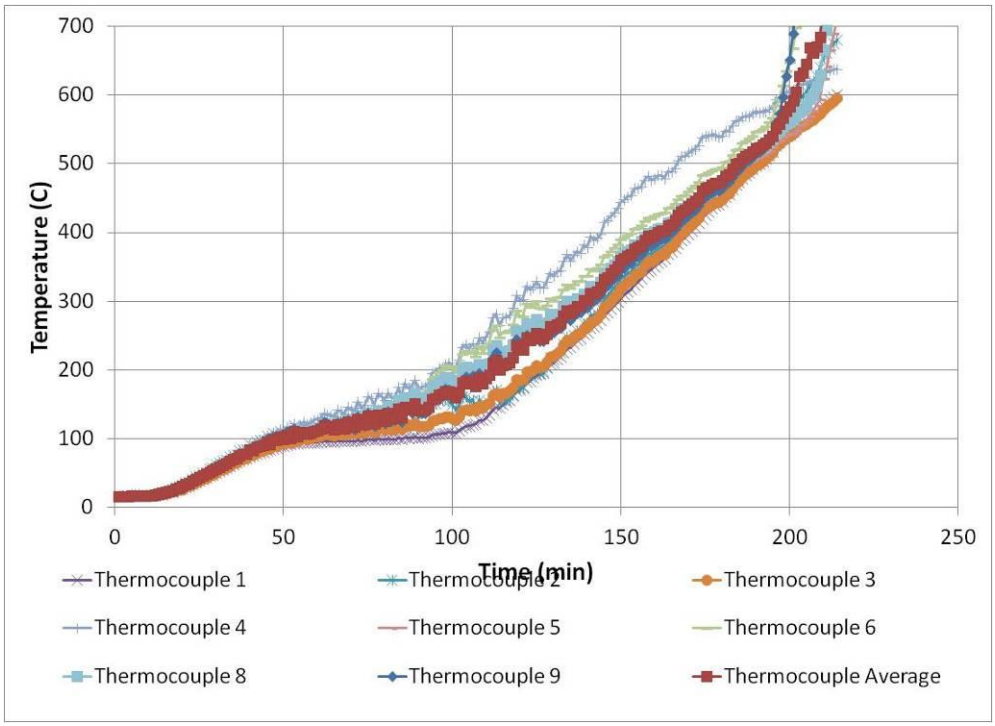
شکل ۱۸: ستون فولادی HEA 200 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۲۸ میلی‌متر



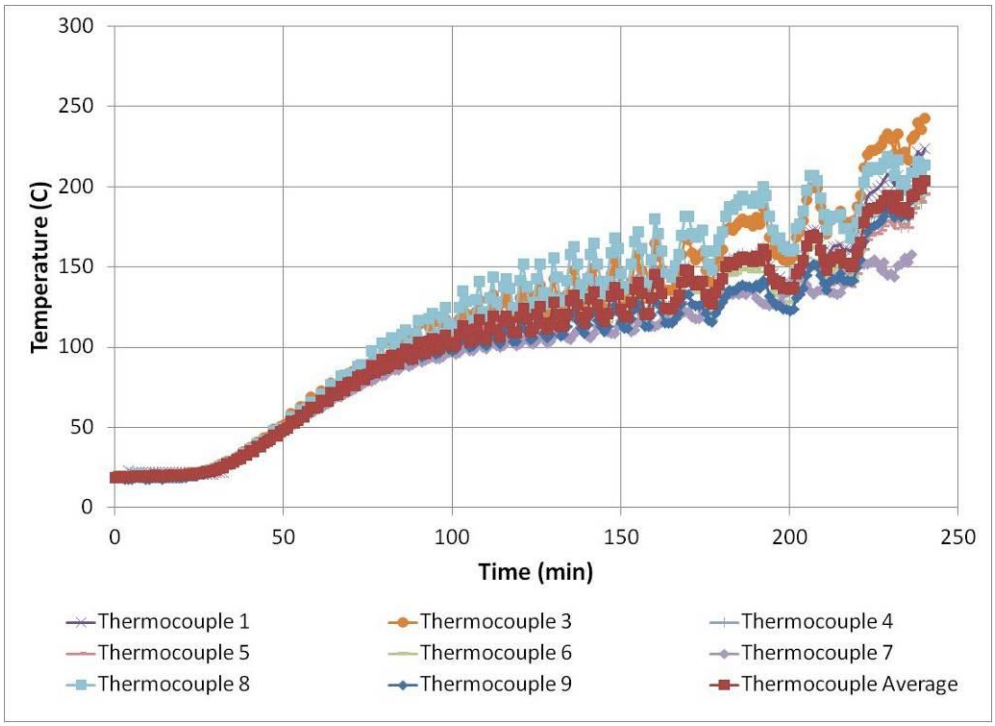
شکل ۱۹: ستون فولادی Box 35×35×3 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۲۳ میلی‌متر



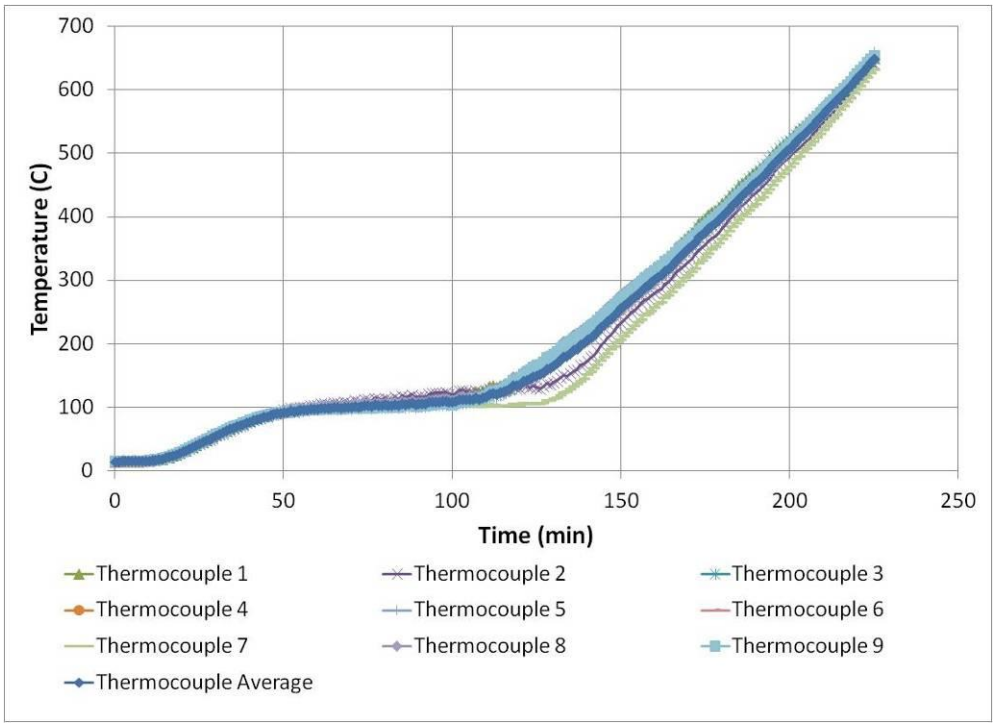
شکل ۲۰: ستون فولادی HEA 300 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۶۰ میلی‌متر



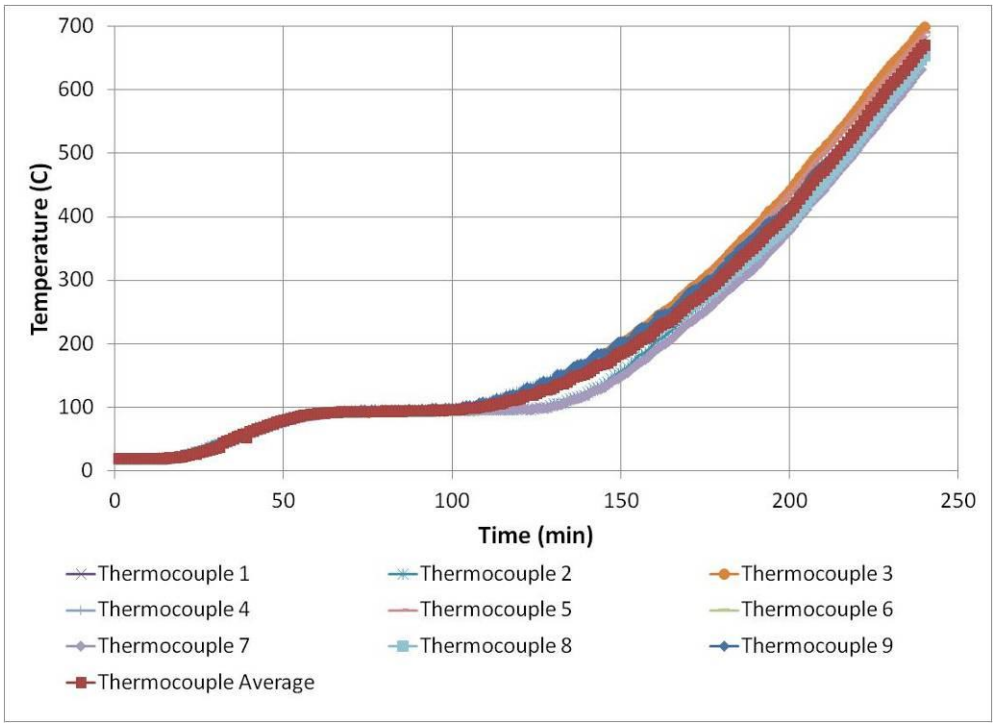
شکل ۲۱: ستون فولادی HEA 360 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۴۳ میلی‌متر



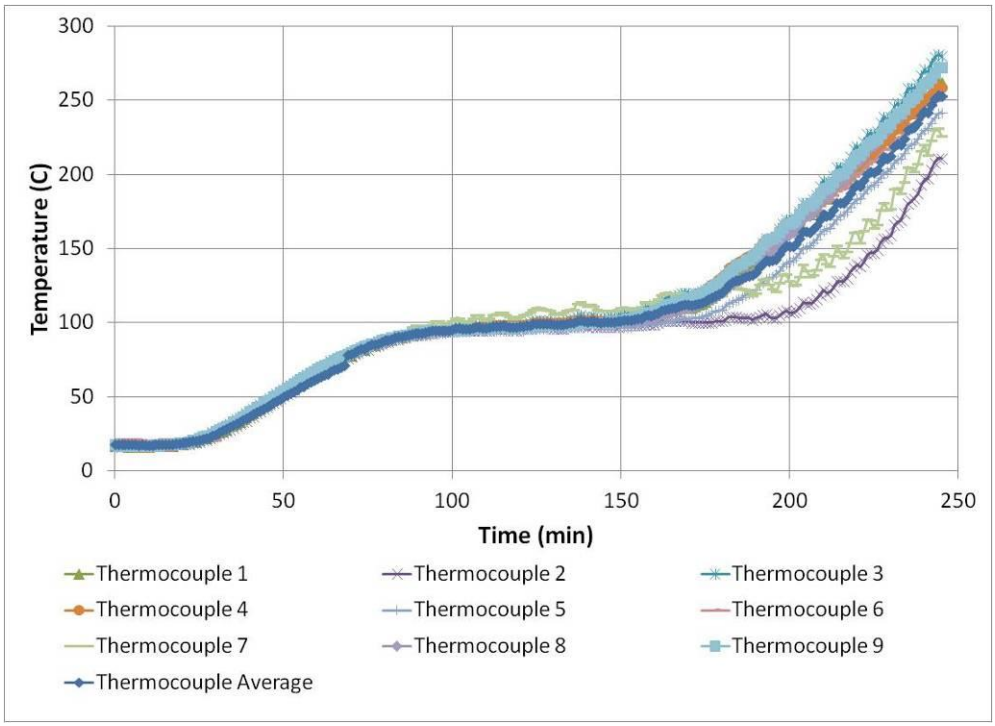
شکل ۲۲: ستون فولادی IPE 160 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۴۸ میلی‌متر



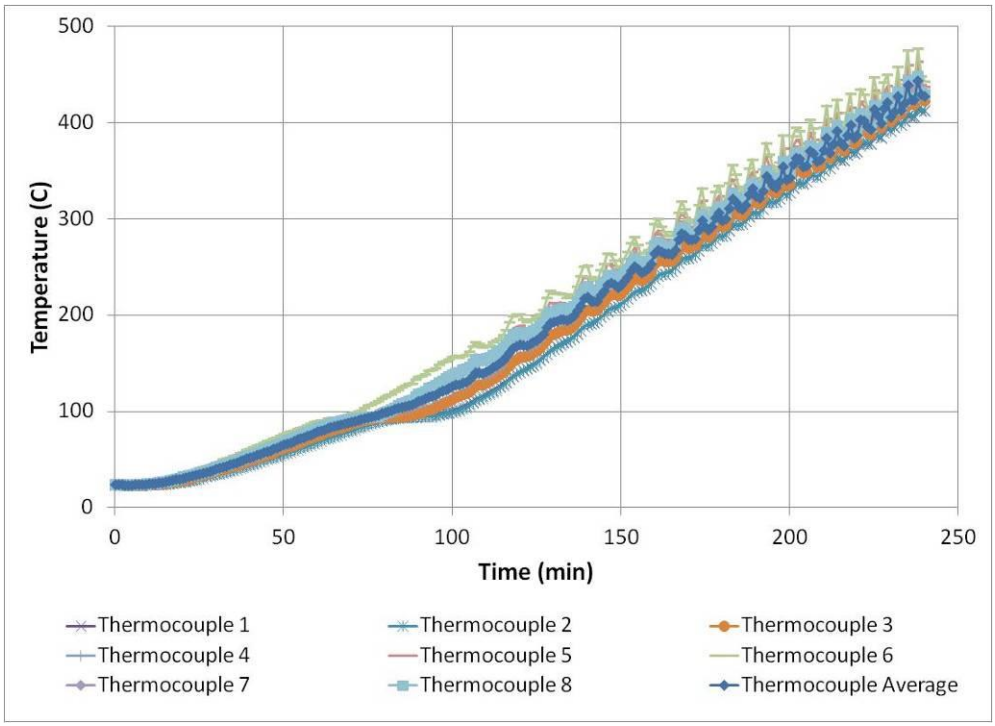
شکل ۲۳: ستون فولادی HEA 200 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۴۳ میلی‌متر



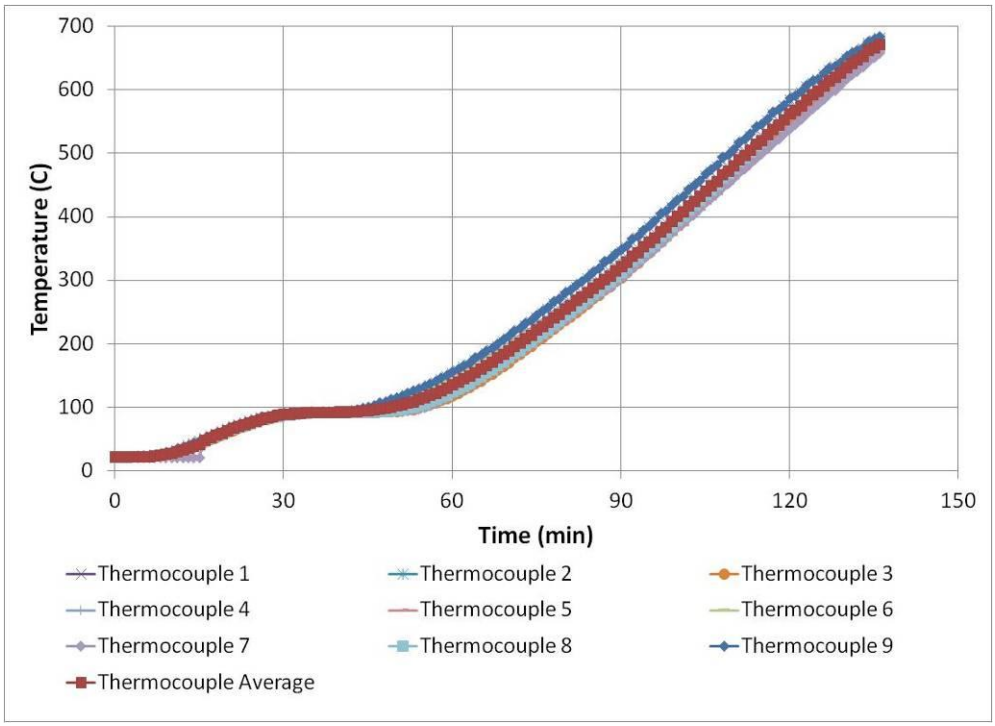
شکل ۲۴: ستون فولادی IPE 160 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۶۰ میلی‌متر



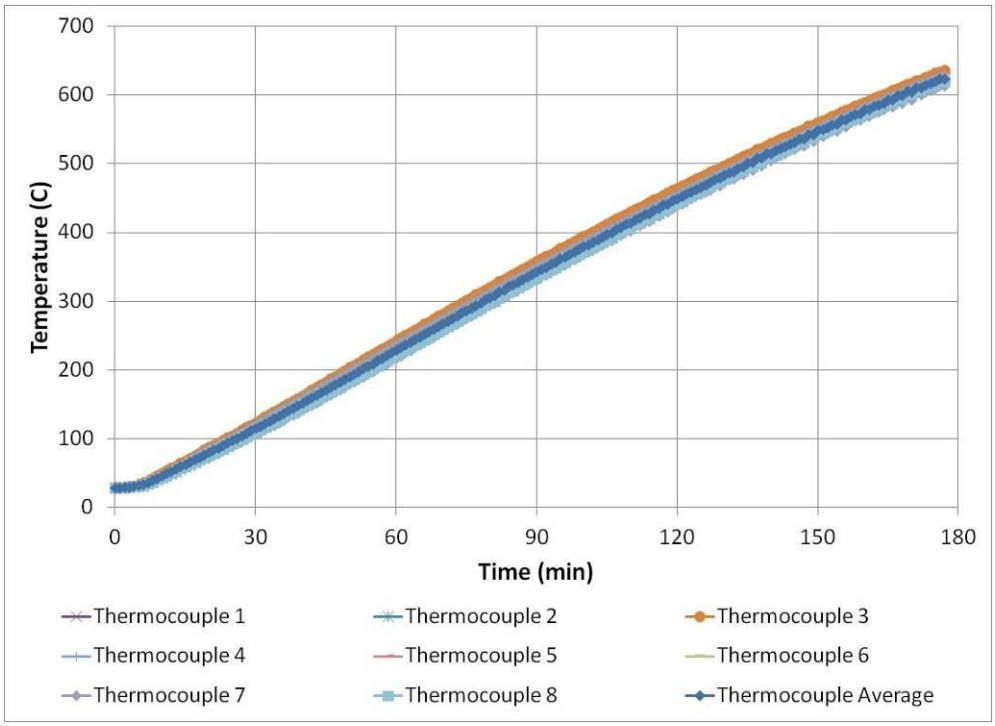
شکل ۲۵: ستون فولادی IPE 240 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۶۰ میلی‌متر



شکل ۲۶: ستون فولادی Box 35×35×30 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۳۸ میلی‌متر



شکل ۲۷: ستون فولادی IPE 160 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۳۳ میلی‌متر



شکل ۲۸: ستون فولادی Box 35×35×3 با ضخامت پوشش محافظ حریق NAX CB برابر ۱۰ میلی‌متر

۸- آزمایش چگالی

مطابق استاندارد ASTM E605 چگالی مواد پاششی اندازه گیری شد. نتایج مربوط به چگالی در محدوده ۴۵۵±۱۵٪ کیلوگرم بر متر مکعب قرار دارد.

۹- خلاصه گزارش آزمون‌های مقاومت در برابر آتش

تعداد ۱۳ آزمونه ستون فولادی با مقاطع ذکر شده در گزارش به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر با پوشش معدنی پایه سیمانی محافظ در برابر حریق تولیدی شرکت نانو عایق آکسون با مشخصات بیان شده در این گزارش، در کوره مقاومت در برابر آتش مقیاس متوسط آزمون شد. نمونه‌برداری از محل تولید شرکت نانو عایق آکسون توسط کارشناسان مرکز صورت گرفت. پوشش توسط متقاضی، با نظارت کارشناسان مرکز و در محل آزمایشگاه مرکز بر روی ستون‌های فولادی مورد آزمون اجرا شد. تحت شرایط مشخص آزمون، که در این گزارش به تفصیل بیان شده است، زمان مقاومت در برابر آتش برای دماهای بحرانی مختلف در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است.

جدول ۸: زمان مقاومت در برابر آتش برای ستون‌های یک متری با پوشش معدنی پایه سیمانی NAX CB بر اساس رسیدن دمای متوسط T_{ave} به ۵۵۰ °C

ردیف	ستون فولادی	h (mm)	b (mm)	s (mm)	t (mm)	h_p/A (m^{-1})	ضخامت پوشش (mm)	زمان (min)
۱	Box 35×35×3	۳۵۰	۳۵۰	۳۰	۳۰	۳۷	۱۰	**۱۵۱**
۲							۲۳	**۱۹۵**
۳							۳۸	—
۴	HEB 360	۳۶۰	۳۰۰	۱۲/۵	۲۲/۵	۱۰۸/۷	۱۰	**۴۹**
۵	HEA 360	۳۵۰	۳۰۰	۱۰	۱۷/۵	۱۳۸/۲	۴۳	**۱۹۵**
۶	HEA 300	۲۹۰	۳۰۰	۸/۵	۱۴	۱۶۵/۹	۶۰	—
۷	HEA 240	۲۳۰	۲۴۰	۷/۵	۱۲	۱۹۲/۳	۱۰	**۳۶**
۸	HEA 200	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۲۲۸/۶	۲۸	**۱۰۷**
۹	HEA 200	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۲۲۸/۶	۴۳	**۲۰۸**
۱۰	IPE 240	۲۴۰	۱۲۰	۶/۲	۹/۸	۲۵۴/۸	۶۰	—
۱۱	IPE 160	۱۶۰	۸۲	۵	۷/۴	۳۲۸/۹	۳۳	**۱۱۹**
۱۲							۴۸	**۲۲۱**
۱۳							۶۰	—

جدول ۹: زمان مقاومت در برابر آتش برای ستون‌های یک متری با پوشش معدنی پایه سیمانی NAX CB بر اساس رسیدن دمای متوسط T_{ave} به ۶۵۰ ^{o}C

ردیف	ستون فولادی	h (mm)	b (mm)	s (mm)	t (mm)	h_p/A (m^{-1})	ضخامت پوشش (mm)	زمان (min)
۱	Box 35×35×3	۳۵۰	۳۵۰	۳۰	۳۰	۳۷	۱۰	**۱۷۷**
۲							۲۳	**۲۴۵**
۳							۳۸	—
۴	HEB 360	۳۶۰	۳۰۰	۱۲/۵	۲۲/۵	۱۰۸/۷	۱۰	**۶۲**
۵	HEA 360	۳۵۰	۳۰۰	۱۰	۱۷/۵	۱۳۸/۲	۴۳	**۲۰۴**
۶	HEA 300	۲۹۰	۳۰۰	۸/۵	۱۴	۱۶۵/۹	۶۰	—
۷	HEA 240	۲۳۰	۲۴۰	۷/۵	۱۲	۱۹۲/۳	۱۰	**۴۵**
۸	HEA 200	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۲۲۸/۶	۲۸	**۱۲۳**
۹	HEA 200	۱۹۰	۲۰۰	۶/۵	۱۰	۲۲۸/۶	۴۳	**۲۲۵**
۱۰	IPE 240	۲۴۰	۱۲۰	۶/۲	۹/۸	۲۵۴/۸	۶۰	—
۱۱	IPE 160	۱۶۰	۸۲	۵	۷/۴	۳۲۸/۹	۳۳	**۱۳۲**
۱۲							۴۸	**۲۳۶**
۱۳							۶۰	—