

مقاومت قطعات فولاد گالوانیزه در مقابل آتش‌سوزی

فولاد گالوانیزه به دلیل ویژگی‌های حفاظتی‌اش در برابر خوردگی شناخته می‌شود، هر چند تحقیقات جدید نشان داده است که گستره این مزایا به ایجاد مقاومت قطعات فولادی در مقابل آتش‌سوزی رسیده است.



پارکینگ ساختمان فرماندهی اسکای - عکاس: فیلیپ دورانت

گالوانیزه معمولاً برای ایجاد حفاظت در برابر خوردگی در دامنه وسیعی از قطعات فولادی، از اندازه پیچ و مهره گرفته تا قطعات بزرگ سازه‌ای استفاده می‌شود.

علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده است که لایه محافظ روی، موجب کاهش قدرت تابندگی سطح قطعه فولادی نیز می‌شود، که در نتیجه بر میزان افزایش دمای قطعه فولادی هنگام قرار گرفتن در معرض منبع گرما تأثیر می‌گذارد.

تست‌های کامل آزمایشگاهی نشان داده است که تا دمای تقریبی زیر ۵۰۰ درجه سانتیگراد، لایه روی در قطعه فولاد گالوانیزه با استاندارد EN ISO 1461 پایدار مانده و قدرت تابندگی سطح قطعه تقریباً

نصف حالتی است که از فولاد غیرگالوانیزه استفاده می‌شود. بنابراین قطعه‌ای فولاد گالوانیزه، با سرعتی کمتر از همان قطعه از فولاد غیرگالوانیزه، گرم می‌شود.

چگونه می‌توان مقاومت در برابر آتش را محاسبه کرد؟

فرایند طراحی یک قطعه فولادی در آتش‌سوزی، به دلیل نیاز به دانستن درجه حرارت قطعه در زمان مورد نظر، پیچیده است. این فرایند اساساً تکرارشونده است و نیاز به حل مکرر یک معادله دارد.

انجمن گالوانیزه با کمک مؤسسه سازه‌های فولادی Steel Construction Institute (SCI) اخیراً یک جزوه راهنمای طراحی منتشر کرده که طراحی قطعات فولاد گالوانیزه در آتش‌سوزی را بسیار ساده کرده و از هرگونه محاسبه پیچیده جلوگیری می‌کند.

مزیت استفاده از فولاد گالوانیزه مقاوم در برابر آتش‌سوزی

مزیت استفاده از قطعات فولاد گالوانیزه که در برابر آتش‌سوزی مقاومند، در سازه‌هایی مشهود است که نیاز به مقاومت در مقابل آتش‌سوزی، در بازه‌های زمانی کوتاه ۱۵ تا ۳۰ دقیقه‌ای در مجاورت آتش دارند، که در این حالت دمای قطعات فولاد گالوانیزه به حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد.

نمونه سازه‌هایی که به چنین مدت مقاومتی در برابر آتش نیاز دارند، شامل پارکینگ‌ها و ساختمان‌های مسکونی / اداری یک طبقه است. همچنین ممکن است استفاده از فولاد گالوانیزه برای سازه‌های دیگری چون ساختمان‌های صنعتی یک طبقه، یا برخی ساختمان‌های اداری چند طبقه که در آنها از سیستم اطفای حریق آب‌پاش استفاده می‌شود هم فایده داشته باشد، چرا که می‌تواند حداقل زمان آتش‌سوزی را به ۳۰ دقیقه کاهش دهد.

- رجوع کنید به: عملکرد فولاد گالوانیزه در آتش‌سوزی / تحقیقات حفاظت در برابر آتش‌سوزی

مختصری از راهنمای طراحی

این راهنمای طراحی، جدول‌هایی را برای محاسبه مقاومت در برابر آتش و حداکثر مدت قرار گرفتن در معرض آتش برای تیرهای فولادی گالوانیزه، تیرهای مرکب، ستون‌ها و صفحات تحت کشش، مطابق با

استانداردهای طراحی یورو-کد (EN 1993-1-2⁶, EN 1994-1-2) و پیوست‌های ملی انگلستان و ایرلند تهیه دیده است.

جدول‌های طراحی برای در معرض آتش بودن تا ۳۰ دقیقه قابل استفاده‌اند و به وضوح مواردی را نشان می‌دهند که استفاده از فولاد گالوانیزه منجر به افزایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی یا در معرض آتش قرار گرفتن، در مقایسه با فولاد غیرگالوانیزه می‌شود. جداول طراحی یورو-کد در پیوست A آورده شده است. علاوه بر این، جدول‌های طراحی مطابق با BS 5950 در ضمیمه B آمده است.

تست‌های کامل آزمایشگاهی نشان داده‌اند که در زیر دمای تقریبی ۵۰۰ درجه سانتیگراد، قطعه فولادی که با استاندارد EN ISO 1461 گالوانیزه شده، دارای قدرت تابش سطحی پایین‌تری از فولاد غیرگالوانیزه است. بنابراین قطعه فولاد گالوانیزه، نسبت به قطعه غیرگالوانیزه مشابهش با سرعت کمتری گرم می‌شود.

افزایش دما به مقدار کم، منجر به افزایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی، برای زمان‌هایی تا حدود ۳۰ دقیقه قرار گرفتن در معرض آتش خواهد شد.

این تأثیر برای قطعاتی با ضریب مقطع متوسط ($105 \text{ m}^{-1} < k_{sh} [Am / V] \text{ m} < 182$) و برای ۱۵ دقیقه مقاومت در برابر آتش، قابل توجه‌تر است. با این حال، برای قطعاتی با ضریب مقطع‌های پایین ($33 \text{ m}^{-1} < k_{sh} [Am / V] \text{ m} < 64$)، بیشترین بازدهی در ۳۰ دقیقه مقاومت در برابر آتش به دست می‌آید. قطعاتی با ضریب مقطعی که درون این محدوده‌ها قرار می‌گیرند، بخش بزرگی از قطعات توخالی UB/UC را پوشش می‌دهند.

نمونه‌های طراحی برای توضیح چگونگی استفاده از جدول‌ها و مزایای بالقوه فولاد گالوانیزه نسبت به فولاد غیرگالوانیزه در مقابل آتش (به‌عنوان مثال، افزایش مقاومت در مقابل بار یا قرار گرفتن در معرض آتش برای مدت طولانی‌تر، در قبال یک بار مفروض) ارائه شده است.

عملکرد فولاد گالوانیزه در آتش

به‌دلیل کاهش تابندگی سطح روکش روی که در قسمت قبل توضیح داده شد، قطعات فولاد گالوانیزه می‌توانند افزایش دمای کمتر در قطعات فولاد مشابه، ولی غیرگالوانیزه را تجربه کنند.

مزیت کاهش تابندگی برای سازه‌هایی که به زمان کمتری از مقاومت در برابر آتش نیاز دارند، مانند پارکینگ‌ها یا ساختمان‌های صنعتی یک‌طبقه، که در آنها دمای قطعات فولاد گالوانیزه به حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. دلایل آن از این قرار است:

۱- برای دماهایی پایین‌تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد، میزان افزایش دما در یک قطعه فولاد گالوانیزه، با تابندگی، سطح ۰/۳۵ داده می‌شود، درحالی‌که برای یک قطعه فولاد غیرگالوانیزه با تابندگی، سطح ۰/۷۰ ارائه می‌شود.

۲ - مقاومت فولاد در دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد در حساس‌ترین موقعیت خود قرار می‌گیرد، بنابراین در این محدوده از درجه حرارت، اختلاف ولو ناچیزی در دما تأثیر قابل توجهی در کاهش مقاومت دارد.

فولاد در دماهای کمتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد، هیچگونه کاهش استحکامی از خود بروز نمی‌دهد. بنابراین، برای دماهای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد، حتی اگر درجه حرارت در یک قطعه فولاد گالوانیزه کمتر از قطعه فلزی مشابه ولی غیرگالوانیزه باشد، لزوماً دلیل تفاوت زیاد در استحکام آن نیست.

از طرف دیگر، برای دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد، میزان تابندگی سطح فولاد گالوانیزه به همان میزان در فولاد غیرگالوانیزه (۰/۷۰) است و بنابراین با افزایش دما، درجه حرارت‌های فولاد گالوانیزه و غیرگالوانیزه به هم می‌رسند.

عامل مهم دیگری که بر اثر آن دما در قطعه فولاد افزایش می‌یابد، مقطع است.

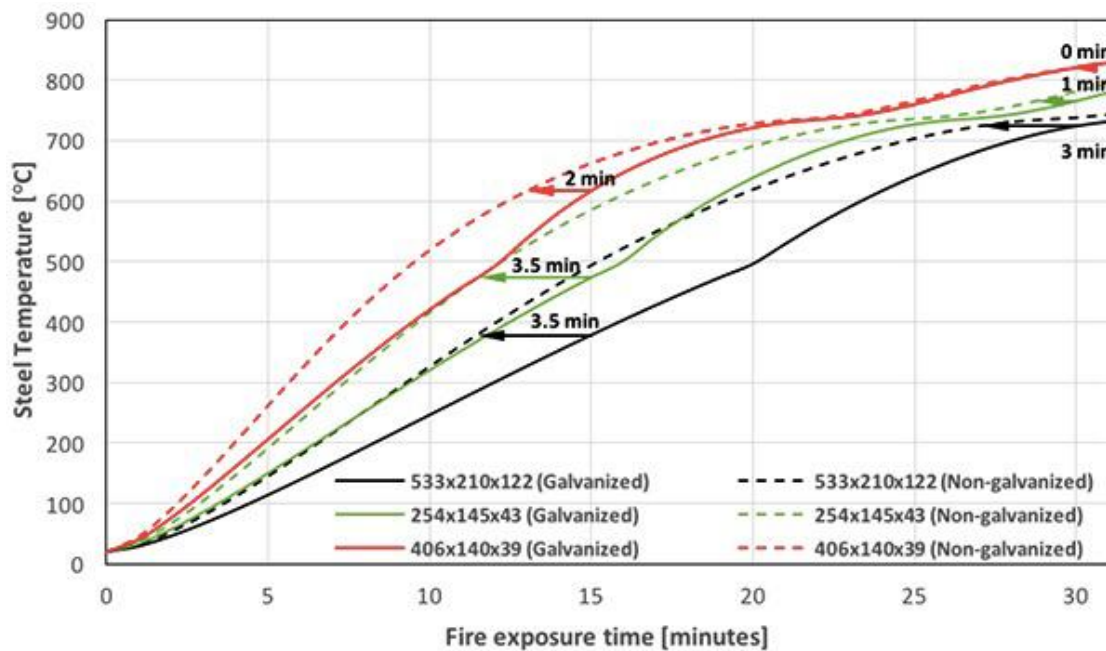
در سیستم EN 1993-1-2، ضریب مقطع به‌عنوان سطح قطعه در معرض آتش در واحد طول، A_m ، تقسیم بر حجم در واحد طول، V تعریف شده است. بنابراین یک تیر مفروض در معرض آتش‌سوزی از جانب هر چهار ضلع آن، دارای ضریب مقطع بیشتری نسبت به یک تیر مشابه ولی از سه ضلع در معرض آتش است.

این ضریب، فارغ از گالوانیزه یا غیرگالوانیزه بودن مقطع، تأثیر یکسانی دارد، چرا که تنها به نسبت‌های هندسی سطح مقطع بستگی دارد. یعنی هر چه ضریب مقطع بیشتر باشد، دمای قطعه با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. در نتیجه، مهم‌ترین مزیت استفاده از فولاد گالوانیزه نسبت به فولاد غیرگالوانیزه، بسته به ضریب مقطع سطح مقطع، می‌تواند در سطح مقطع‌های مختلف و در زمان‌های معرض آتش متفاوت رخ دهد.

شکل ۱- افزایش درجه حرارت تیرهای فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه را برای تیرهای استاندارد جهانی با سه مقطع مختلف مقایسه می‌کند:

- 533 x 210 x 22
- 254 x 146 x 43
- 406 x 140 x 39

این تیرها از سه طرف با ضریب مقطع‌های $ksh [AmV]/m$ به ترتیب ۷۵ متر، ۱۰۹ متر و ۱۷۰ متر در معرض آتش قرار می‌گیرند. این شکل نشان می‌دهد که برای ۱۵ دقیقه در معرض آتش بودن، مقاطع فولاد گالوانیزه می‌توانند نسبت به همین مقاطع، ولی از جنس فولاد غیرگالوانیزه، به ترتیب ۳/۵ دقیقه، ۳/۵ دقیقه و ۲ دقیقه طولانی‌تر در برابر آتش تاب بیاورند. برای مدت ۳۰ دقیقه زمان مقاومت در برابر آتش، مقطع فولاد گالوانیزه با ضریب مقطع ۱۷۰ متر (UB 254 x 146 x 43) عملکردی بسیار مشابه مقطع فولادی غیرگالوانیزه معادل آن دارد. دلیلش این است که قرار گرفتن ۳۰ دقیقه‌ای در معرض آتش - درجه حرارت مقطع گالوانیزه - ۸۲۰ درجه سانتیگراد است که به میزان قابل توجهی بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد است. هرچند برای مقطعی با ضریب مقطع ۷۵ متر (UB 533 x 210 x 122) در ۳۰ دقیقه معرض آتش، هنوز افزایش قابل توجه ۳ دقیقه‌ای در زمان معرض آتش وجود دارد.



شکل ۱- افزایش دمای مقاطع فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه در معرض منحنی استاندارد نامی آتش

اگر بخواهیم افزایش زمان در معرض آتش را با استفاده از فولاد گالوانیزه به زبان افزایش مقاومت بیان کنیم، این مزایا بیشتر بارز می‌شوند. شکل ۲، مقاومت را در برابر زمان برای تیرهای فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه که قبلاً بحث شد، مقایسه می‌کند.

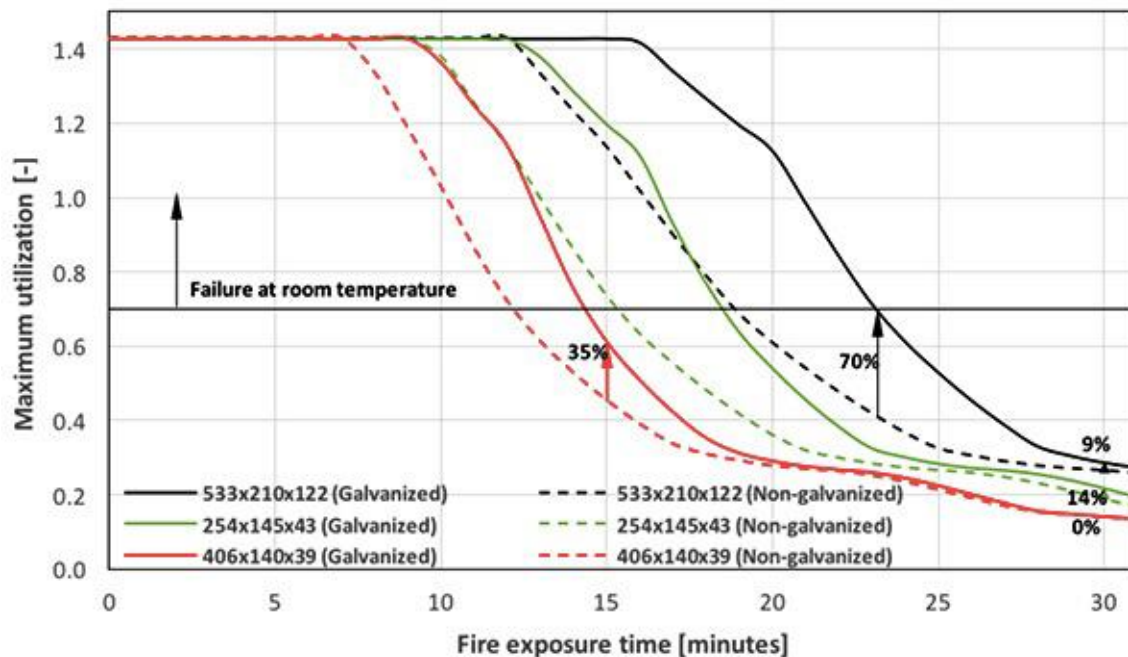
در این شکل، مقاومت با حداکثر به کارگیری که توسط قطعه می‌تواند به دست آید، نشان داده می‌شود. حداکثر به کارگیری، از حاصل تقسیم مقاومت مقطعی تیر در موقعیت آتش‌سوزی، به مقاومت سطح مقطعی در دمای اتاق، محاسبه می‌شود. درجه به کارگیری ۰/۷ با یک خط افقی نشان داده شده است و

با بزرگترین مقدار عملی مطابقت دارد که برای یک تیر مهار شده جانبی می‌تواند در شرایط آتش‌سوزی طراحی شود. علت این امر این است که تیرهای طراحی شده در آتش، احتمالاً به میزانی از به‌کارگیری بزرگتر از ۰/۷ در دمای محیط از کار گسیخته می‌شوند.

با در نظر گرفتن اینکه در ۱۵ دقیقه معرض آتش، با وجود اینکه مقاطع گالوانیزه UB 533 x 210 x 122 (با ضریب مقطع ۷۵ متر) و UB 254 x 146 x 43 (با ضریب مقطع ۱۰۹ متر) قادر خواهند بود به به‌کارگیری بزرگتری از هم‌تاهای غیرگالوانیزه‌شان برسند، هیچ مزیت خاصی در استفاده از فولاد گالوانیزه نسبت به فولاد غیرگالوانیزه برای این مقاطع وجود ندارد. از طرف دیگر، در مورد مقطع UB 406 x 140 x 39 که بزرگترین ضریب مقطع (۱۷۰ متر) را دارد، حداکثر مقدار به‌کارگیری مقاطع گالوانیزه و غیرگالوانیزه در ۱۵ دقیقه معرض آتش زیر ۰/۷۰ است. در این حالت، استفاده از فولاد گالوانیزه، منجر به افزایش ۳۵٪ ظرفیت تحمل بار در مقایسه با فولاد غیرگالوانیزه می‌شود.

برای مقاطع UB 533 x 210 x 122 و UB 254 x 146 x 43 حداکثر مقدار به‌کارگیری که با مقاطع فولاد غیرگالوانیزه به‌دست می‌آید، در زمان به مراتب کوتاه‌تری معرض آتش نسبت به مقاطع گالوانیزه، به زیر ۰/۷ کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، برای مقطع فولادی با کمترین ضریب مقطع UB 533 x 210 (x 122)، در ۲۳ دقیقه معرض آتش، هنگامی که حداکثر مقدار به‌کارگیری مقطع گالوانیزه به ۰/۷ کاهش یابد، می‌تواند ۷۰٪ بیشتر از مقطع غیرگالوانیزه بار را تحمل کند. در ۳۰ دقیقه معرض آتش، حتی اگر افزایش مقاومت در برابر آتش برای مقاطع UB 533 x 210 x 122 و UB 254 x 146 x 43 کم باشد (شکل ۱ را ملاحظه نمایید)، آنها افزایش متوسط ۹٪ و ۱۴٪ را به ترتیب در ظرفیت حمل بار نشان می‌دهند (شکل ۲ را ببینید).

به‌طور کلی باید گفت، یک تیر مهارشده جانبی یا یک صفحه کششی از فولاد گالوانیزه و با ضریب مقطعی در محدوده $105 \text{ m}^{-1} < ksh [AmV]m < 182 \text{ m}$ در ۱۵ دقیقه معرض آتش می‌تواند بالای ۳۰٪ بار بیشتر از مقطع غیرگالوانیزه تحمل کند. برای تیرهای مهارشده جانبی، در قسمت‌های پایینی این محدوده ضریب مقطع، بستگی به این دارد که آیا تیر از سه یا چهار طرف در معرض آتش است، یا اینکه صرفاً به‌صورت مرکب با دال کار می‌کند. بنابراین، در زمانی که تیرها از چهار طرف در معرض آتش قرار دارند، حد پایین برای ضریب مقطع، ۱۰۵ متر، برای تیری که از سه طرف در معرض آتش است و همچنین برای یک تیر مرکب، این مقدار به‌ترتیب ۱۴۵ متر و ۱۱۵ متر است. در مورد ستون‌های فولادی گالوانیزه، اگر ضریب مقطع در محدوده $81 \text{ m}^{-1} < ksh [AmV]m < 190 \text{ m}$ باشد، افزایش مشابهی در مقاومت در برابر آتش، وقتی ۱۵ دقیقه در معرض آن باشد، به‌دست می‌آید. برای طراحی در ۳۰ دقیقه آتش‌سوزی، افزایش مقاومت در آتش می‌تواند تا بیش از ۳۰٪ حاصل شود، در صورتی که قطعه فولاد گالوانیزه دارای ضریب مقطعی در محدوده $33 \text{ m}^{-1} < ksh [AmV]m < 64 \text{ m}$ باشد.



شکل ۲ - حداکثر به کارگیری تیرهای فولادی گالوانیزه و غیرگالوانیزه که از سه طرف در معرض آتش هستند

تحقیقات آزمایشگاهی - آزمایش با مقیاس واقعی

تعدادی از محققان مشاهده کرده‌اند که قطعات فولاد گالوانیزه در هنگام آتش‌سوزی نسبت به قطعات مشابه، ولی فولاد غیرگالوانیزه به دماهایی پایین‌تر می‌رسند. فرض بر این بود که این اثر به دلیل تابندگی پایین سطح گالوانیزه است.

در مقایسه با میزان تابندگی ۰/۷ سطح فولاد غیرگالوانیزه که به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی دمای فولاد در هنگام آتش‌سوزی استفاده می‌شود، مقادیر تابندگی 0.29 - 0.40 در چندین بررسی ارائه شده است.

اگرچه اثر تابندگی برای چندین دهه به رسمیت شناخته شده، اما تنها چند سال است که شواهد کافی آنقدر قانع‌کننده بوده‌اند که اجازه دهند مقدار تابندگی استاندارد برای فولاد گالوانیزه تعیین شود.

تابش سطوح فلزی بر اساس ارتعاشات اتمی و مولکولی است که به ترکیب شیمیایی لایه سطحی با تقریباً ۱۰-۱۰ متر ضخامت بستگی دارد. از آنجا که لایه بیرونی سطح گالوانیزه از جنس روی، دارای ضخامت 5 to 20×10⁻⁶ m است، همین لایه است که رفتار تابش فولاد گالوانیزه را تعیین می‌کند.

اولین آزمایش‌های مقاومت فولاد گالوانیزه در برابر آتش

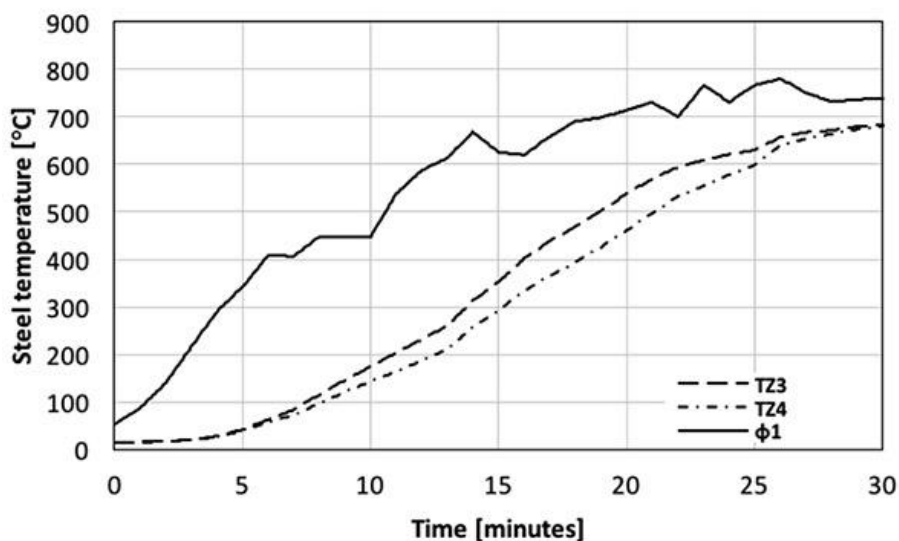
اولین آزمایش‌های گرماسنجی که تأثیر مطلوب روکش گالوانیزه بر دمای فولاد را هنگام آتش‌سوزی نشان داد، توسط Heinisuo انجام گرفت. نمونه‌ها، تحت جریان گرما از یک گرماسنج مخروطی قرار گرفتند. مقدار تابندگی به‌دست‌آمده از قطعات فولاد گالوانیزه زیر ۴۲۰ درجه سانتیگراد، ۰/۲ تعیین شد. دانشگاه فنی چکسلواکی واقع در پراگ، با انجام دو آزمایش واقعی کوره و همچنین آزمایش نمونه‌ها در اتاقکی واقع در یک ساختمان آزمایشی، میزان تابندگی سطحی فولاد گالوانیزه را در شرایط معمول آتش‌سوزی اثبات کرد (شکل ۳).



شکل ۳- نمونه‌های آزمایشی، معلق از سقف اتاقک

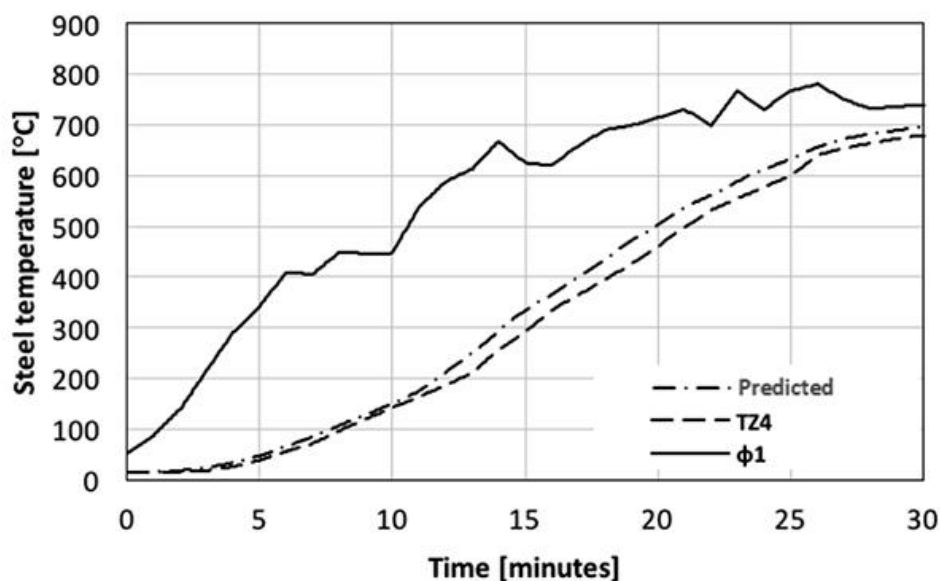
نمونه‌های فولادی باز و بسته‌ای به طول یک متر از سقف اتاقک، در جایی که بیشترین دمای گاز انتظار می‌رفت، آویزان شدند. ترتیب نمونه‌ها توزیع یکنواخت درجه حرارت را تضمین می‌کند. پروفیل‌ها به صورت جفتی (گالوانیزه و غیرگالوانیزه) چیده شده بودند. نمونه‌ها از هر دو سر، با الیاف پشم معدنی ایزوله شدند، طوری که نمونه، عنصری با طول نامحدود را شبیه‌سازی کرد و انتقال گرما فقط در سطح خارجی رخ داد.

دمای هر نمونه توسط ترموکوپلی به قطر ۲ میلی‌متر که در نقطه میانی آن قرار گرفت، اندازه‌گیری می‌شد. دمای گاز اتاقک آتش، توسط بیست ترموکوپل ۳ میلی‌متری و هفت ترموکوپل صفحه‌ای اندازه‌گیری شد. شکل ۴، افزایش دمای نمونه‌ها در اتاقک را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - افزایش دمای اندازه‌گیری‌شده در حین آزمایشات آتش‌سوزی: دمای گاز ($\phi 1$) ، IPE (TZ4) گالوانیزه و IPE (TZ3) غیرگالوانیزه

افزایش دمای اندازه‌گیری‌شده در مقابل دمای افزایش پیش‌بینی‌شده با فرض تابندگی سطح ۰/۳۲ که قبلاً در آزمایش‌های آتش کوره افقی اندازه‌گیری شده بود، مقایسه شد. در شکل ۵ همبستگی خوب بین نتایج اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده، به‌ویژه در ۲۰ دقیقه اول آتش‌سوزی نشان داده می‌شود.



شکل ۵- افزایش دما در هنگام آزمایش‌های آتش‌سوزی: دمای گاز اندازه‌گیری‌شده ($\phi 1$) ، دمای اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده برای IPE (TZ4) با فرض تابندگی ۰/۳۲

اخيراً گایگل (Gaigl) برای اندازه‌گیری میزان تابندگی فولاد گالوانیزه، دو آزمایش با مقیاس واقعی و ۱۴۷ تست آزمایشگاهی انجام داده است. در تست‌های آزمایشگاهی با مقیاس کوچک، انواع مختلف نمونه‌های گالوانیزه گرم شدند و با اندازه‌گیری دمای نمونه‌ها به کمک ترموکوپل و حسگرهای فروسرخ، میزان تابندگی استنتاج شد.

این بررسی‌ها مقادیر تابندگی ثابتی را برای طیف وسیعی از فولادهای گالوانیزه با محتوای سیلیکون مختلف نشان می‌دهد. محتوای سیلیکون از آن جهت مهم است که وجودش می‌تواند بر ضخامت و ساختار روکش گالوانیزه تأثیر بگذارد. محدوده محتوای سیلیکون مرتبط با مقادیر تابندگی ثابت ۰/۳۵ از مواردی است که به‌طور معمول در سازه‌های مدرن فولادی مواجه می‌شود و با گروه‌بندی A و B از EN ISO 14713-2 مشخص می‌شوند.

گایگل همچنین در این آزمایش‌ها مشاهده کرد، همانطور که انتظار می‌رفت، میزان تابندگی ۰/۳۵ برای دمای تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد با اطمینان اندازه‌گیری شد. ولی در دماهای بالاتر، تغییرات ریختی روکش باعث افزایش پراکندگی تا حد فولاد غیرگالوانیزه (یعنی ۰/۷) می‌شدند.

اصلاحیه یورو-کد ۳، قسمت ۱-۲، طراحی آتش‌سوزی ساختاری (EN 1993-1-2) به میزان زیادی بر اساس کار گایگل است که در بازنگری بعدی استاندارد، که قرار است در سال ۲۰۲۳ منتشر شود، گنجانده خواهد شد. این تجدید نظر به‌صورت خلاصه در جدول ۱ آمده است.

EN 1993-1-2 clause 2.2(2)		
In addition to EN 1991-1-2, the following values of the surface emissivity related to different types of steel may be taken:		
Type of steel	$\epsilon_m (\leq 500 \text{ }^\circ\text{C})$	$\epsilon_m (> 500 \text{ }^\circ\text{C})$
Carbon steel	0.70	
HDG steel ¹	0.35	0.70

¹ Steel that has been hot dip galvanized according to EN ISO 1461 and with steel composition according to Category A or B of EN ISO 14713-2, Table 1

جدول ۱ - بازنگری پیشنهادی EN 1993-1-2 (مطابق ژوئن ۲۰۲۰)

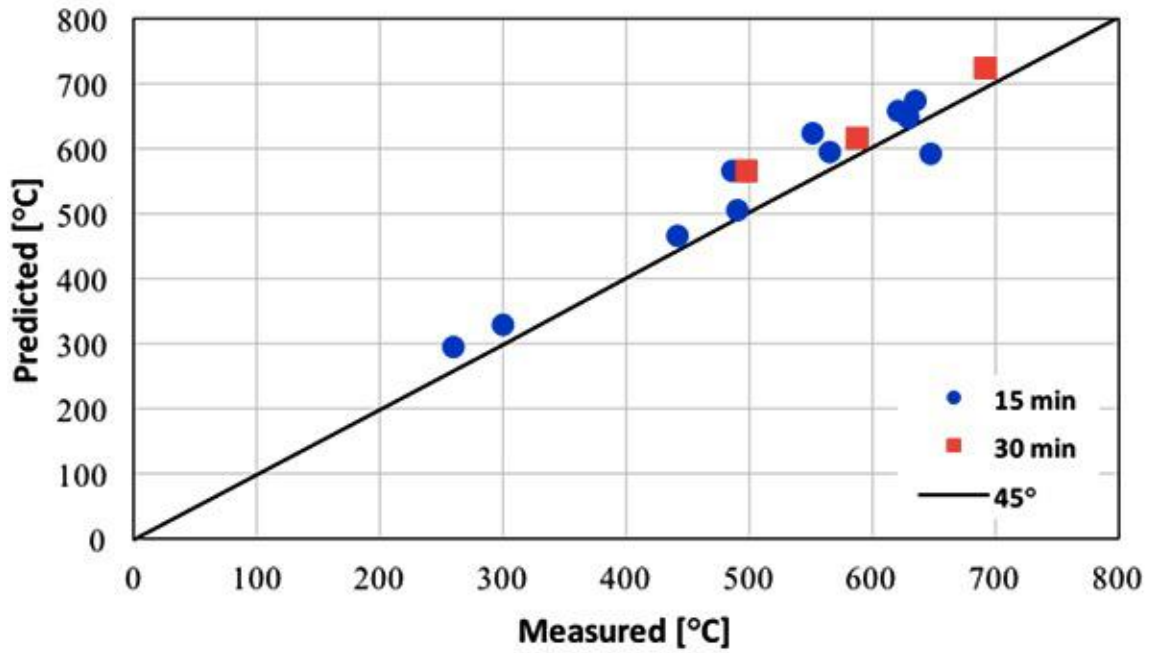
آزمایش‌های بیشتر آتش‌سوزی بر فولاد گالوانیزه

بررسی‌های حمایتی بیشتری در فرانسه انجام گرفته است. سه مجموعه استاندارد آزمایش‌های آتش‌سوزی در پروژه مشترکی در گروه تخصصی Effectis در فرانسه، توسط CTICM - Galvazinc و EGGA انجام شد. در سال ۲۰۱۶ آزمایش‌های آتش‌سوزی از چهار طرف بر ستون‌های فولادی پروفیل I و H انجام شد. در سال ۲۰۱۷ آزمایش‌های بیشتری بر تیرهای پروفیل I و H از سه طرف آتش و ستون‌های توخالی و پروفیل I از چهار طرف آتش انجام گرفت (شکل ۶).



شکل ۶- نمونه‌های مورد آزمایش *CTICM- Galvazinc-EGGA*، تست‌های تیر (سمت چپ) و تست‌های ستون (سمت راست) در سال ۲۰۱۷

تابندگی پیشنهادی برای ۶۰ دقیقه مقاومت در آتش به کمک مدل‌های پیش‌بینی تحلیلی، در CTICM و در پراگ مورد تأیید قرار گرفت. شکل ۷ مقایسه نتایج پیش‌بینی شده و اثبات شده را برای تابندگی سطح $\varepsilon_m = 0.35$ (surface emissivity) در ۱۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه معرض آتش نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها موافقت خوبی را بین دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با فرض تابندگی سطح ۰/۳۵ نشان می‌دهند.



شکل ۷- مقایسه تابندگی سطح ۰/۳۵ پیش‌بینی شده و نتایج اندازه‌گیری شده برای ۱۵ و ۳۰ دقیقه معرض آتش