

Analytical Study on the Distribution of Temperature and Bearing Strength of Slim-Floor Beams under Fire

Shayan Fakhrian*

M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Maziar University, Royan, Iran

fakhrian.architect@yahoo.com

Hamid Behbahani

aProfessor, Department of Road and Transportation, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Shayan Mashhadi

M.Sc. Graduate, Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, a detailed analytic solution of the 1-D heat equation is presented to determine the distribution of temperature within a section integrated into a concrete slab, known as composite slim-floor beams (CoSFB)¹. At first, the previous studies about the thermo-mechanical behavior of the slim-floor beams in the scale of experimental campaigns and numerical modeling have been investigated. Then, an analytical method, function of space and time, is suggested to determine the temperature distribution within the SFB section. Therefore, a steel section integrated into a concrete slab which is subjected to a time-dependent heat flux according to the standard fire curve will be examined. The proposed method is an analytical solution of the general form of the heat equation for transient conduction that simplified in order to calculate the load bearing resistance of SFB. This non-homogeneous differential equation is solved by applying the method of variation of parameters, setting up a homogenous problem and applying the separation of variables to get the homogeneous system. Hence, according to the results of FE modeling, the method has been based on assumptions to retain the accuracy of the calculations as well as to reduce the complications in the analytical method. At last, the results of the simplified analytical solution are compared with the numerical simulation, which confirms the logical process. Contrary to numerical methods, the proposed method can pragmatically solve the heat equation with the moving boundary.

Keywords: Steel-Concrete Composite, Slim-Floor Beams, Fire Resistance, Heat Equation, Analytical Method.

¹ Ground granulated Best-Furnace slag

بررسی تحلیلی توزیع دما و مقاومت باربری تیرهای سقف مرکب کم عمق تحت آتش

دریافت مقاله: ۱۳۹۸-۱۲-۰۲

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹-۰۱-۱۸

شایان فخریان*

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازیار، رویان، ایران
fakhrian.architect@yahoo.com

حمید بهبهانی

استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

شایان مشهدی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

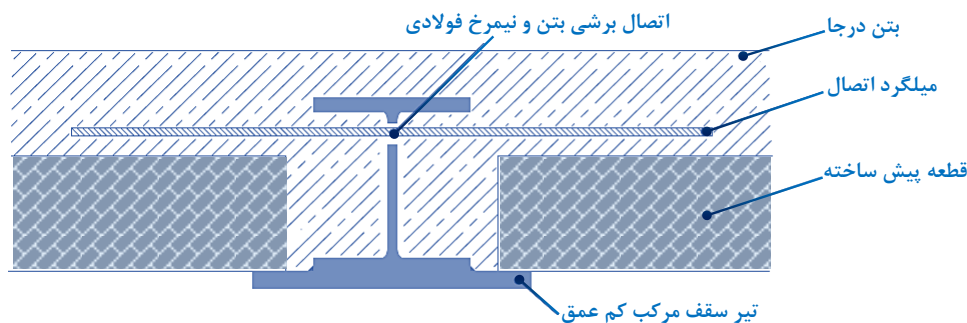
چکیده

در این نوشتار، یک روش تحلیلی نسبتاً دقیق با استفاده از حل معادله یک بعدی حرارت برای تعیین توزیع دما در یک مقطع فولادی مدفون در دال بتنی با عنوان تیرهای سقف مرکب کم عمق (CoSFB) ارائه می شود. ابتدا مطالعات انجام شده در زمینه بررسی رفتار حرارتی-مکانیکی سقف های مرکب کم عمق در محدوده آزمایشگاهی و مدل سازی نرم افزاری مورد بررسی قرار می گیرد. سپس برای تعیین توزیع دما در مقطع SFB یک روش تحلیلی تابع زمان-مکان ارائه می شود. در این بررسی، بخش فولادی مدفون در دال بتنی، تحت یک شار حرارتی وابسته به زمان منطبق بر منحنی آتش استاندارد قرار داده می شود. روش ارائه شده، یک حل تحلیلی ساده شده از شکل عمومی معادله گرما برای انتقال حرارت رسانشی نامانا به منظور محاسبه مقاومت باربری SFB می باشد. بدین منظور، با توجه به نتایج حاصل از مطالعات عددی مختلف، روش ارائه شده را بر فرضیاتی استوار کردیم تا ضمن حفظ دقت عمل در محاسبات، از پیچیدگی های مطبوع در روش تحلیلی بکاهیم. این حل تحلیلی ساده شده از طریق مقایسه با نتایج حاصل از شبیه سازی عددی، اعتبارسنجی شده است. در پایان با ارائه مثال کاربردی نحوه طراحی سقف مرکب کم عمق تحت آتش مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: تیرهای مرکب فولادی-بتنی، مقاومت برابر آتش، سقف کم عمق، معادله گرما، روش تحلیلی.

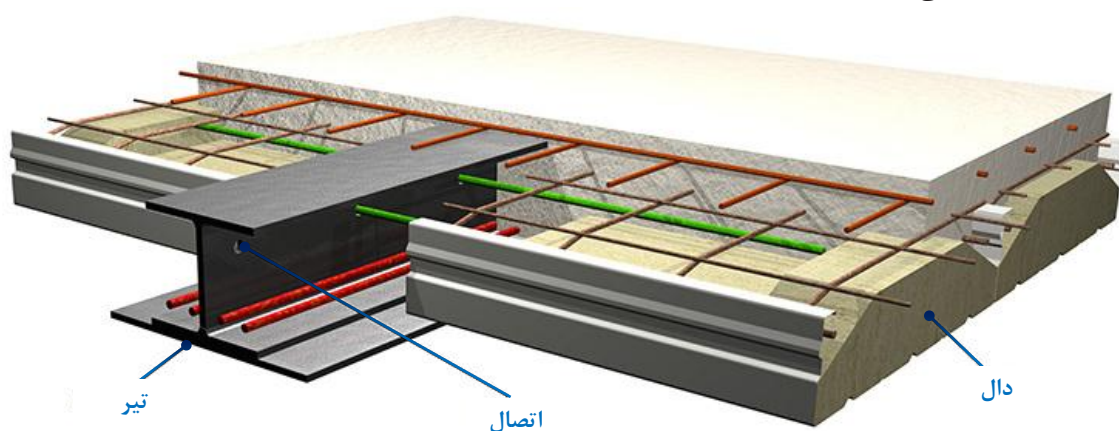
۱- مقدمه و پیشینه پژوهش

تیرهای سقف مرکب کم عمق^۲، یکی از پرکاربردترین تیرهای مرکب فولادی-بتنی در صنعت ساختمان سازی با دهانه های زیاد است که بخش فولادی آن در دال بتنی مدفون می باشد [۱]. تیر این سقف متشکل از یک نیمرخ فولادی گرم نورد شده و یک ورق فولادی می باشد که به بال تحتانی نیمرخ جوش شده است. عرض ورق فولادی از بال نیمرخ بیشتر است تا امکان نصب آسان قطعات پیش ساخته سقف فراهم شود [۲]. این سقف را می توان هم به صورت دال با قطعات یا بلوک های پیش ساخته و هم دال مرکب با عرشه فولادی اجرا کرد [۳]. شکل (۱) و (۲) نمایی از این سیستم سقف را نشان می دهد.



شکل ۱- نمایی از تیر سقف مرکب کم عمق (CoSFB) [۲]

طی سال های اخیر در اروپا، استفاده از SFB در ساختمان های مسکونی و غیرمسکونی مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی اصلی این سیستم سقف این است که کل ارتفاع تیر در عمق سقف تعبیه می شود. با بهره گیری از این ویژگی، SFB چند عملکرد مناسب مانند کاهش کل ضخامت سقف و ارائه فضای خالی برای نصب آسان تجهیزات ساختمانی فراهم می کند [۴]. در حال حاضر دو نوع مقطع عرضی سقف کم عمق در دسترس می باشد؛ نوع اول، تیر مدفون در سقف^۳ (IFB) که از یک نیمرخ I شکل مقطع و یک ورق فولادی جوش شده آن، به جای بال فوقانی یا تحتانی و نوع دوم، تیر سقف کم عمق^۴ (SFB) که از یک نیمرخ I شکل (بدون برش) و یک ورق فولادی جوش شده به بال تحتانی تشکیل شده اند (شکل ۳). تفاوت اصلی بین این دو نوع تیر در بال تحتانی تقویت شده با ورق فولادی SFB در مقایسه با IFB می باشد [۵].



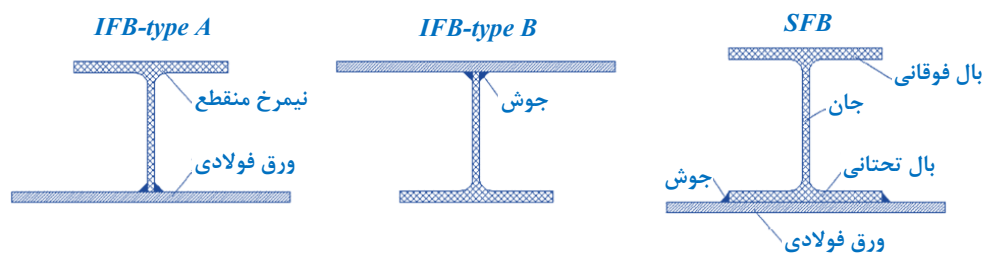
شکل ۲- جزئیات سیستم سقف مرکب کم عمق (CoSFB) [۴]

^۲ Composite Slim-Floor Beam

^۳ Integrated Floor Beam

^۴ Shallow Floor Beam

در صورت آتش‌سوزی، لبه پایینی دال و بال تحتانی نیمرخ (ورق فولادی) در معرض گازهای داغ ناشی از آتش می‌باشند، در صورتی که بخش‌های دیگر تیر فولادی که در دال قرار گرفته‌اند تنها از طریق انتقال حرارت گرم می‌شوند. از این رو توزیع دما در ارتفاع نیمرخ فولادی غیریکنواخت است (شکل ۸). در این نوع تیر، عملکردی مناسب در حین آتش‌سوزی مورد انتظار می‌باشد زیرا این نوع تیرها در مقایسه با سایر تیرهای مرکب که کاملاً در بتن مدفون نیستند، فقط از بال پایین خود در معرض آتش‌سوزی قرار خواهد گرفت. مبحث چهارم آیین‌نامه اروپا، طراحی سازه‌های مرکب فولادی-بتنی، مدل‌های ساده‌ای برای ارزیابی درجه حرارت تحت آتش استاندارد ISO-834 در تیرهای مرکب بدون پوشش بتنی و با پوشش جزئی ارائه می‌دهد [۶-۹]. با این وجود، یک مدل ساده برای ارزیابی توزیع دما در سقف‌های کم‌عمق در استانداردها موجود نیست. از آنجایی که روش ساده‌ای برای تعیین توزیع دما در نیمرخ فولادی و یا تعیین مقاومت باربری این نوع تیر ارائه نشده است، توسعه یک روش ساده به منظور طراحی سریع و آسان SFB تحت آتش، لازم می‌باشد. در چند سال اخیر، طی مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی-های عددی، این موضوع مورد بررسی قرار گرفت [۱۰-۱۳].



شکل ۳- مقاطع تیر مدفون در سقف (IFB) و تیر سقف کم‌عمق (SFB) [۱۴]

زهریا^۵ و همکاران [۱۵] و زهریا و فرانسس^۶ [۱۶] معادلات ساده‌ای را برای محاسبه دما در مقطع IFB تحت تاثیر منحنی آتش استاندارد ISO-834 توسعه دادند. این مدل ساده، معادلاتی برای به دست آوردن درجه حرارت در بال تحتانی، جان تیر و میلگردهای تقویتی در بتن، ارائه می‌دهد. دمای بال فوقانی بررسی نشده است، زیرا فرض شده است که پس از ۱۲۰ دقیقه از قرار گرفتن در معرض آتش استاندارد، دمای آن قسمت به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نمی‌رسد و بنابراین مقاومت کامل خود را حفظ می‌کند. پس از این پژوهش، کجت^۷ و همکاران [۱۷] و رومرو^۸ و همکاران [۱۸] مدل قبلی را به صورت دقیق‌تری مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و با نتایج آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌ها مقایسه کردند. یک مدل تحلیلی توسط هانوس^۹ و همکاران [۱۹] منتشر شده است که دمای میلگردهای تقویتی طولی در سقف‌های کم‌عمق را پیش‌بینی می‌کند. آلبرو^{۱۰} و همکاران [۱۳، ۱۴] یک مدل عددی به روش اجزاء محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS ارائه دادند که توزیع دما و مقاومت باربری SFB به همراه قطعات پیش‌ساخته بتنی با هسته توخالی^{۱۱} را تحت آتش بررسی می‌کند. این مدل توسط نتایج آزمایشگاهی منتشر شده در متون فنی [۴، ۵، ۲۲-۲۰] اعتبارسنجی شد. همچنین طی تلاشی آزمایشگاهی [۲۳]، مدل عددی معرفی شده را صحت‌سنجی کردند.

مطالعات انجام شده، کمتر به تاثیرات پارامترهایی از قبیل ضریب هدایت گرمایی سیستم، مدت زمان در معرض آتش بودن تیر و محدوده تغییرات مشخصات هندسی مقاطع SFB توجه شده است که در این پژوهش علاوه بر بررسی رفتار خمشی SFB

⁵ Zaharia

⁶ Franssen

⁷ Gajot

⁸ Romero

⁹ Hanus

¹⁰ Albero

¹¹ Hollow core slab element

تحت منحنی حرارتی استاندارد ISO-834 به صورت تحلیلی، تاثیر پارامترهای مذکور نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تعیین توزیع دما در مقطع SFB ، که در دال بتنی مدفون است و تحت آتش قرار دارد، روش تحلیلی تقریبی تابع دما-زمان معرفی می‌شود. روش ارائه شده، یک حل تحلیلی ساده‌شده از شکل عمومی معادله گرما برای انتقال حرارت رسانشی گذرا¹² به منظور محاسبه مقاومت باربری SFB می‌باشد. علاوه بر این، اعتبار این روش تحلیلی در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار $SAFIR$ ، سنجیده می‌شود.

۲- توزیع دما در مقطع سقف کم عمق

۲-۱- اثر آتش بر رفتار حرارتی-مکانیکی سیستم‌های مرکب فولادی-بتنی

در صورت آتش‌سوزی، سطوح در معرض آتش، تحت تاثیر کنش حرارتی قرار می‌گیرند. این کنش حرارتی می‌تواند به عنوان یک شار حرارتی خالص¹³ $(\dot{h}_{net})$ در سطح عضو اعمال شود. این شار حرارتی، شامل انتقال حرارت همرفتی¹⁴ و تابشی¹⁵ می‌باشد. هدایت حرارتی تماسی¹⁶ بین بتن و فولاد (ضریب مقاومت رابط¹⁷) به عنوان نامحدود (تماس کامل حرارتی) محسوب می‌شود. در اینجا فرض شده است که مقاومت رابط از طریق تبخیر آب به وجود می‌آید و حرارت ناشی از آتش به سطح زیرین سقف مرکب اعمال می‌شود.

مقدار شار حرارتی خالص $(\dot{h}_{net})$ به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{h}_{net} = \varepsilon_s \sigma \left[(T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4 \right] + \alpha_c (T_f - T_s) \quad (1)$$

که σ ثابت استفان-بلتزمن¹⁸ برابر $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ و ε_s ضریب انتشار حرارت تابشی¹⁹ می‌باشد. با توجه به مطالعات پیشین [۲۲] برای سطح زیرین سقف $\varepsilon_s = 0.7$ اتخاذ می‌شود. α_c ضریب انتقال حرارت همرفتی است که مقدار آن برای سطوح در معرض آتش $\alpha_c = 25 W/m^2 K$ می‌باشد [۲۴].

مشخصات حرارتی فولاد و بتن از قبیل انبساط طولی حرارتی^{۲۰}، ظرفیت گرمایی ویژه^{۲۱}، ضریب هدایت گرمایی^{۲۲} و ضریب انبساط حرارتی^{۲۳}، بر اساس آیین‌نامه اروپا بصورت شکل (۴) و (۶) می‌باشد و چگالی آنها به ترتیب ۷۸۵۰ و ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است [۷-۹].

ضریب هدایت حرارتی یک ماده، نشان‌دهنده میزان انتقال گرما درون آن ماده است. این ضریب بیانگر میزان هدایت انرژی در هر ثانیه (بر حسب وات) در هر متر مربع در یک نقطه به درجه گرادیان حرارتی (بر حسب درجه سانتی-گراد یا کلوین در متر) در هر نقطه است. در یک فاصله کوتاه، که در آن گرادیان حرارتی می‌تواند ثابت باشد، می‌توان برای یک ماده، آن را در محاسبه انرژی انتقال‌یافته (بر حسب ژول) در واحد سطح بر حسب مدت زمانی معقول و مختصر مورد استفاده قرار داد. مقادیر معمول هدایت گرمایی بتن و فولاد در دمای محیط در جدول (۱) آمده است [۲۵].

¹² Transient conduction

¹³ Net heat flux

¹⁴ Convection

¹⁵ Radiation

¹⁶ Interface conductivity

¹⁷ Interface resistance coefficient

¹⁸ Stephan-Boltzmann

¹⁹ Resultant emissivity coefficient

²⁰ Thermal elongation

²¹ Specific heat capacity

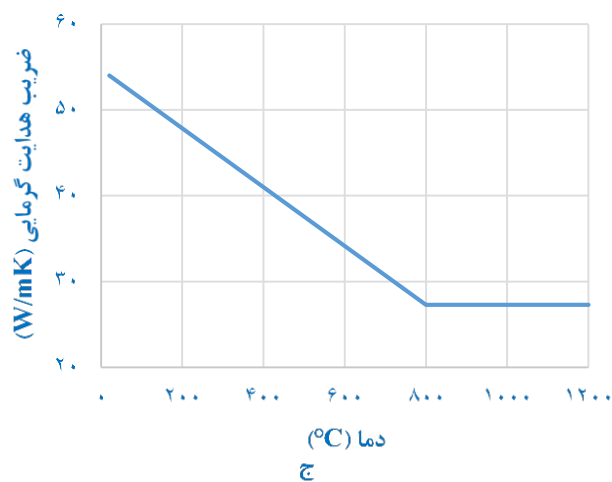
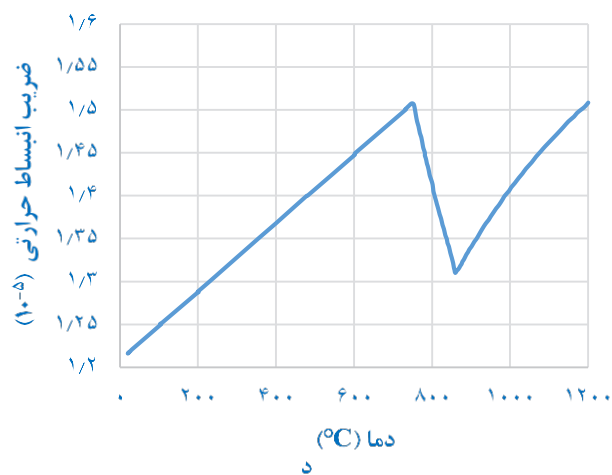
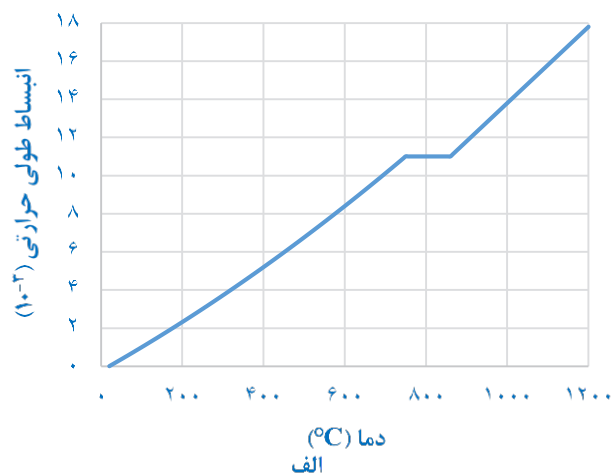
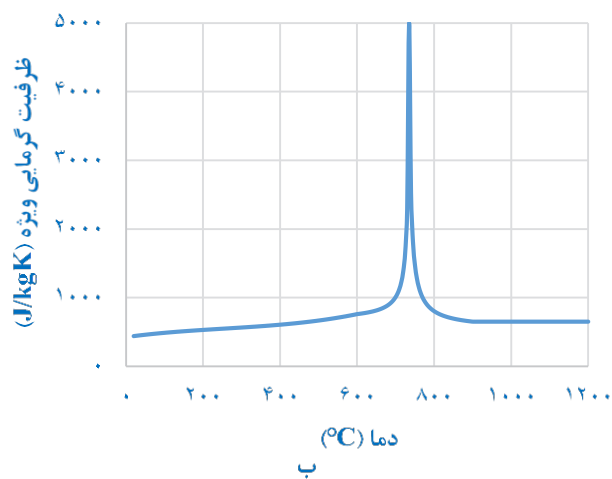
²² Thermal conductivity

²³ Thermal expansion coefficient

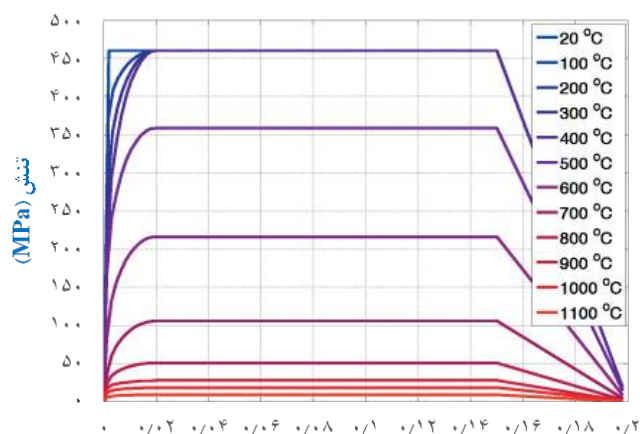
جدول ۱- ضریب هدایت گرمایی بتن و فولاد در دمای ۲۵°C [۲۵]

ضریب هدایت گرمایی (λ) (W/mK)	ماده	
۰/۴۲	سبک	بتن
۱/۷	معمولی	
۵۴	ساختمانی	فولاد
۱۶	ضد زنگ	

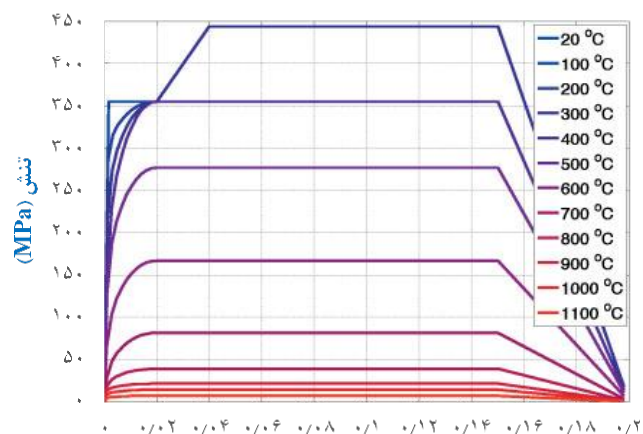
همچنین، تغییرات حرارتی منحنی تنش-کرنش فولاد و بتن در شکل (۵) و (۷) نشان داده شده است [۷-۹].



شکل ۴- تغییرات مشخصات حرارتی فولاد (الف) انبساط طولی حرارتی، (ب) ظرفیت گرمایی ویژه، (ج) ضریب هدایت گرمایی و (د) ضریب انبساط حرارتی

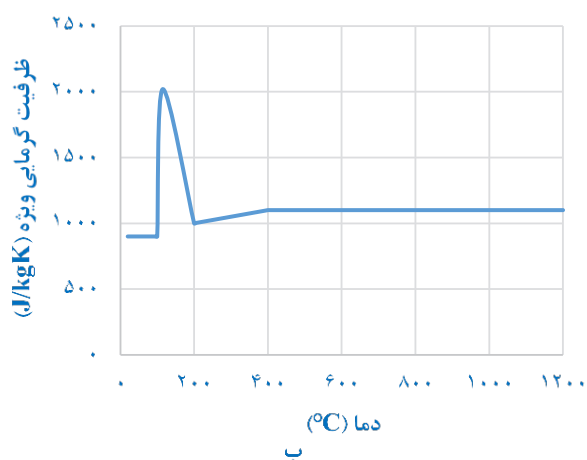


ب کرنش

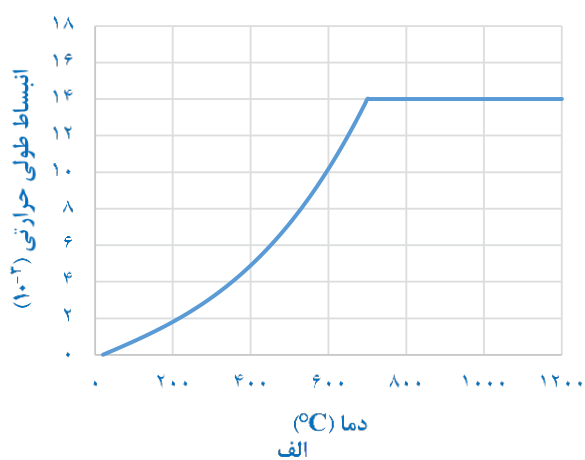


الف کرنش

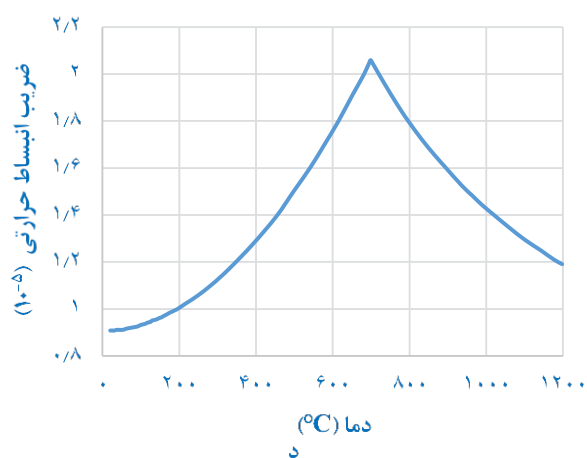
شکل ۵- تغییرات حرارتی منحنی تنش-کرنش (الف) نیمرخ فولادی و (ب) میلگرد تقویتی



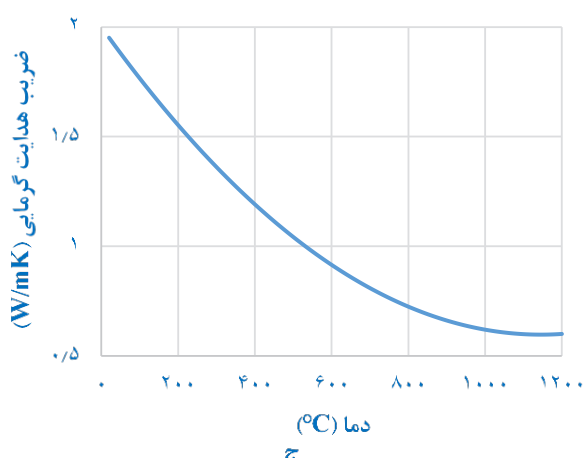
ب دما (°C)



الف دما (°C)

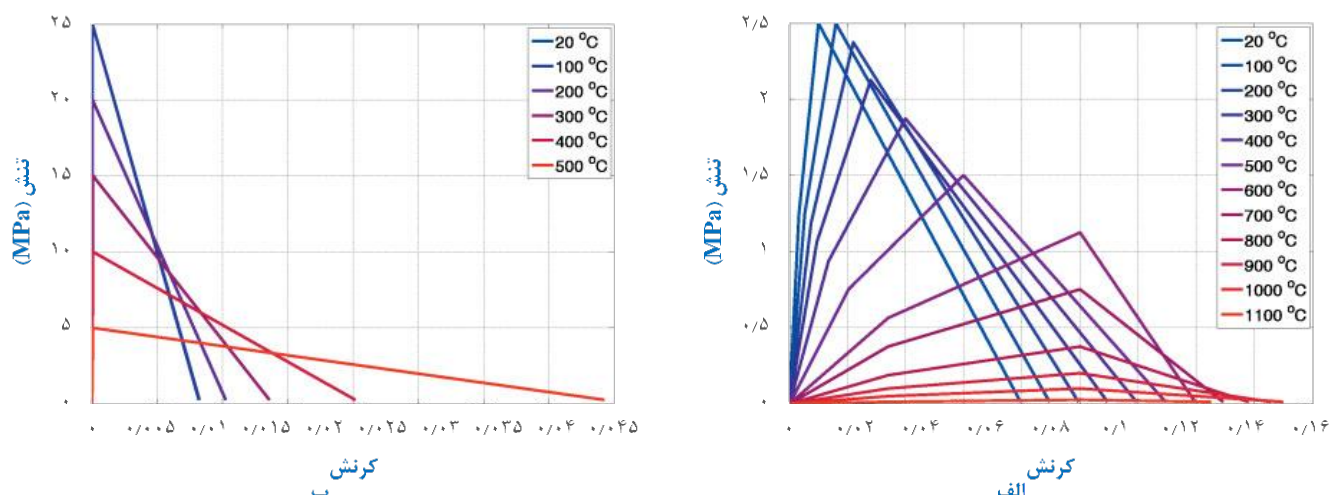


د دما (°C)



ج دما (°C)

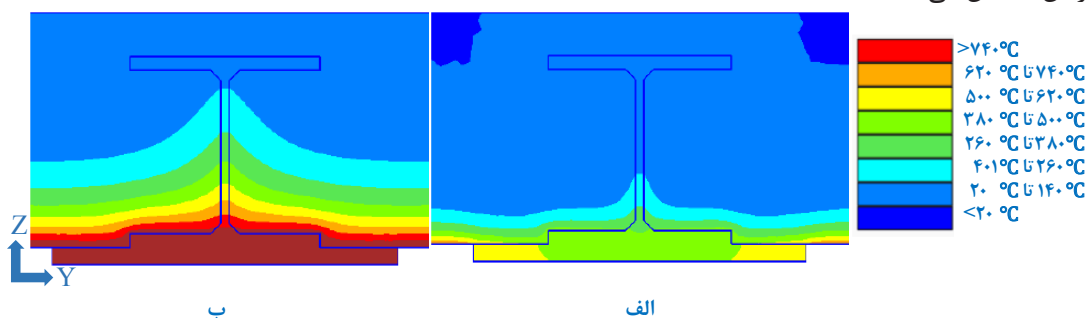
شکل ۶- تغییرات مشخصات حرارتی فولاد (الف) انبساط طولی حرارتی، (ب) ظرفیت گرمایی ویژه، (ج) ضریب هدایت گرمایی و (د) ضریب انبساط حرارتی



شکل ۷- تغییرات حرارتی منحنی تنش- کرنش بتن در الف) فشار و ب) کشش

۲-۲- توزیع دما در بخش فولادی مدفون در دال بتنی

توزیع دما، حاصل از شبیه‌سازی عددی مقطع SFB توسط براون²⁴ و همکاران، در شکل (۸) ارائه شده است [۳] و در زمان‌های ۳۰ (R_{30}) و ۱۲۰ دقیقه مدل‌سازی شده‌اند. در هر دو مورد درجه حرارت در ارتفاع مقطع (جهت Z) رو به کاهش است. در زمان ۳۰ دقیقه، یک گرادیان حرارتی²⁵ در عرض مقطع (جهت Y) وجود دارد که با افزایش زمان، کاهش می‌یابد.



شکل ۸- توزیع دما در مقطع SFB حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط SAFIR در زمان‌های الف) ۳۰ و ب) ۱۲۰ دقیقه [۲۷، ۲۶]

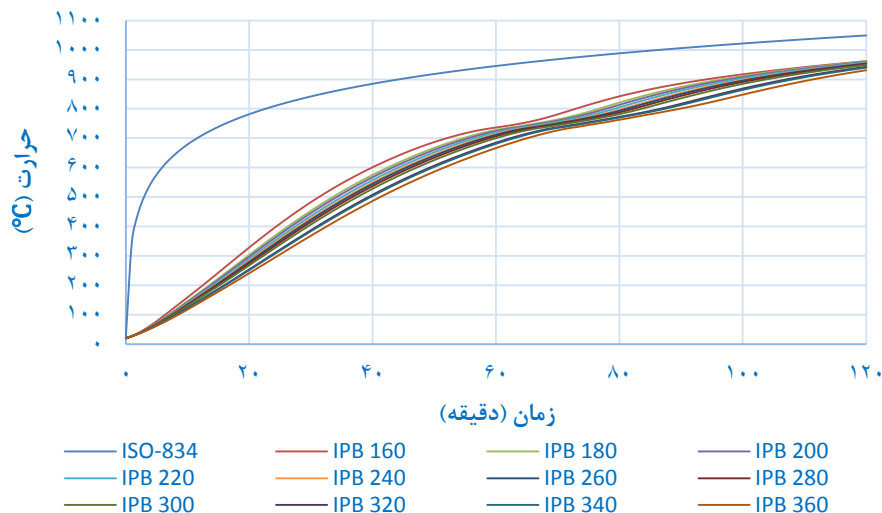
از آنجایی که، فولاد، در مقایسه با بتن، ضریب هدایت گرمایی (λ) بالاتری دارد و بخش فولادی در سقف کم‌عمق، نسبت به دال بتنی، جرم کم‌تری دارد، منجر به ضریب نفوذ حرارتی²⁶ (α) بالاتری برای مقطع فولادی می‌شود. زمانی که هر دو ماده تحت شار حرارتی²⁷ یکسان قرار بگیرند، دما در قسمت فولادی با سرعت بیشتری نسبت به دال بتنی افزایش می‌یابد. با توجه به نقش محصور کنندگی بتن در این سیستم، علاوه بر مزایای مکانیکی، افزایش سریع دمای فولاد را کنترل می‌کند. این ویژگی منجر به گرادیان حرارتی بین قسمت فولادی و دال بتنی و انتقال حرارت میان فولاد و بتن می‌شود. لبه پایینی دال و ورق فولادی در معرض گازهای پرحرارت ناشی از منحنی آتش استاندارد "ISO-834" به عنوان بار حرارتی قرار داده شد و برای هر مقاطع تحت مطالعه، یک تحلیل انتقال حرارت غیرخطی مطابق شکل (۹) به روش اجزاء محدود توسط نرم افزار SAFIR انجام شد [۲۷، ۲۶].

²⁴ Braun

²⁵ Thermal gradient

²⁶ Thermal diffusivity

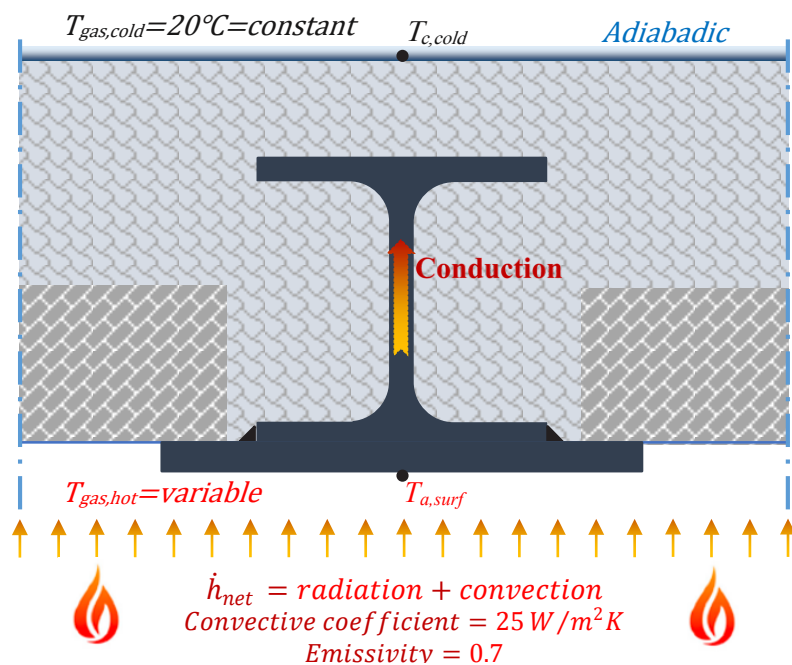
²⁷ Heat flux



شکل ۹- منحنی آتش استاندارد ISO-834 [۶] و دمای سطح ورق فولادی مقاطع جدول (۲) حاصل از SAFIR [۲۶، ۲۷]

۳-۲- رویکرد روش تحلیلی ساده شده

تعیین حل دقیق توزیع دما (معادله عمومی گرما وابسته به زمان و مکان) در تیرهای مدفون منجر به راه‌حلی پیچیده می‌شود که در طراحی، کمتر کاربرد دارد. بنابراین، فرضیاتی منطقی، به منظور رسیدن به یک راه‌حل تحلیلی ساده‌تر برای تیرهای مدفون مرکب و غیرمرکب تحت آتش، اتخاذ شد. فرمول‌بندی^{۲۸} توزیع دما (وابسته به زمان) در جامدات، با یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرهمگن که فرآیند انتقال حرارت رسانشی گذرا را توصیف می‌کند، قابل توصیف است. پارامتر کلیدی میزان انتقال حرارت همرفتی و تابشی در یک سطح، مطابق شکل (۱۰)، تفاوت بین دمای سطح زیرین سقف ($T_{a,surf}$) و دمای گاز ناشی از اشتعال ($T_{gas,hot}$) می‌باشد [۶].



شکل ۱۰- شار حرارتی و شرایط مرزی در مقطع SFB

²⁸ Formulation

دمای لبه بالایی دال بتنی ($T_{c,cold}$)، تا ۱۲۰ دقیقه، تقریباً در دمای اولیه ($T_i = 20^\circ\text{C}$) باقی می‌ماند. دال بتنی تقریباً تحت تأثیر انتقال گرمای ناشی از رسانش قرار نمی‌گیرد، که این فرآیند بی‌دررو²⁹، یک شرط از شرایط مرزی در لبه بالایی را توجیه می‌کند. فرضیات اتخاذ شده برای روش تحلیلی ارائه شده به صورت زیر است:

- گرادیان حرارتی در عرض مقطع در نظر گرفته نمی‌شود (به این معنی که دمای ورق و بال تحتانی یکنواخت فرض می‌شود)،
- تبادل حرارت بین بخش فولادی و بتنی در نظر گرفته نمی‌شود،
- این روش فقط برای دال بتنی قابل استفاده است،
- مشخصات حرارتی فولاد، نظیر ظرفیت گرمایی ویژه (c_p) و ضریب هدایت گرمایی (λ_a) علی‌رغم وابستگی آن‌ها به دما به صورت ساده‌شده مورد استفاده قرار گرفته شد.

۲-۴- محدوده کاربرد

به منظور اجرای سقف‌های مرکب کم‌عمق، برای جایگذاری قطعات پیش‌ساخته بتنی یا بلوک‌های پرکننده، لازم است که عرض ورق تحتانی نسبت به بال نیم‌رخ فولادی، بیشتر باشد. ضمناً آیین‌نامه اروپا پیشنهاد می‌کند که ضریب مقطع³⁰ برای هر عضو نسبت مساحت واحد طول سطوح در معرض آتش (A_m) به حجم واحد طول آن عضو (V) مطابق رابطه (۲) باشد [۸]. این روش تحلیلی، برای طراحی تیرهای مدفون مرکب و غیرمرکب در محدوده جدول (۲) پیشنهاد می‌شود.

$$A_m/V = (b + 2t)/(bt) \quad t \ll b: A_m/V \approx 1/t \quad (2)$$

جدول ۲- مشخصات مقاطع SFB

عرض (mm)	ضخامت (mm)	ورق نیم‌رخ
۳۰۰	۲۰	IPB 160
۳۵۰	۲۰	IPB 180
۳۵۰	۲۰	IPB 200
۴۰۰	۲۰	IPB 220
۴۰۰	۲۰	IPB 240
۴۰۰	۲۰	IPB 260
۴۵۰	۲۰	IPB 280
۵۰۰	۲۰	IPB 300
۵۰۰	۲۵	IPB 320
۵۰۰	۲۵	IPB 340
۵۰۰	۳۰	IPB 360

فولاد ساختمانی مورد استفاده برای نیم‌رخ و ورق مورد بررسی در این تحقیق، از نوع فولادهای پرمقاومت ($ST52$) می‌باشند. ضریب مقطع در این پژوهش در محدوده $A_m/V \cong 40 \sim 60 \text{ m}^{-1}$ بررسی شده است. ضخامت پوشش بتنی روی مقطع فولادی، برای تمامی مقاطع، ثابت و برابر ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، اگرچه این مقدار حداقلی

²⁹ Adiabatic

³⁰ Section factor

به حساب می‌آید. دال بتنی، متشکل از بتن معمولی با مقاومت مشخصه³¹، نمونه استوانه‌ای و مکعبی استاندارد، به ترتیب ۳۰ و ۳۷ مگاپاسکال می‌باشد.

۳- فرمول تحلیلی توزیع دما

۳-۱- معادله دیفرانسیل انتقال حرارت رسانشی گذرا

زمانی که یک تیر سقف کم عمق تحت اثر یک منبع حرارت مانند آتش استاندارد (ISO-834) قرار می‌گیرد، توزیع درجه حرارت در آن مقطع بسیار غیریکنواخت می‌باشد و از ناحیه با دمای بالاتر به ناحیه با دمای پایین مبادله انرژی حرارتی صورت می‌گیرد. مبادله حرارتی وابسته به مکان و زمان در مقطع عرضی توسط معادله شناخته شده انتقال گرما تعریف شده است. با فرض این که هیچ حرارتی داخل دال تولید نمی‌شود و تبادل گرما برای انتقال حرارت یک بعدی است، معادله گرما به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 < z < H \quad t > 0 \quad (3)$$

که در آن λ_a ضریب هدایت گرمایی، ρ چگالی و c_p ظرفیت گرمایی ویژه فولاد است. z محور مختصات مکان، با مبدا سطح زیرین سقف که مورد بارگذاری حرارتی قرار می‌گیرد؛ t محور مختصات زمان، H ضخامت دال و T درجه حرارت می‌باشند. برای حل این معادله، یک شرط اولیه³² (IC) و دو شرایط مرزی³³ (BC) باید تعریف شود. همان طور که در بخش ۲ نشان داده شد، می‌توان یک شرط مرزی بی‌دررو در طرف سرد (سطح فوقانی سقف) اتخاذ کرد. علاوه بر این، شار حرارتی ثابت³⁴ (q) به عنوان شرایط مرزی دوم در طرف در معرض آتش (سطح تحتانی سقف) تعریف می‌شود. به عنوان یک شرط اولیه، دمای ثابت $T_i = 20^\circ\text{C}$ انتخاب می‌شود. این شرایط به شرح زیر مطرح می‌گردد:

$$BC1: \lambda_a \frac{\partial T}{\partial z} = -q \quad z = 0 \quad (4)$$

$$BC2: \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad z = H \quad (5)$$

$$IC: T = T_i = 20^\circ\text{C} \quad 0 < z < H \quad t = 0 \quad (6)$$

زیاد بودن تعداد متغیرها منجر به پیچیده شدن مسئله و عدم کاربرد عملی این روش می‌شود. به منظور کاهش مقدار متغیرها، از روش استاندارد بی‌بعد سازی³⁵ یا به اصطلاح از اصول "آنالیز ابعادی"³⁶ در تعیین روابط حاکم بر این پدیده استفاده می‌کنیم. با دسته‌بندی ثابت‌های فیزیکی مسئله اولیه داریم:

$$\theta = \frac{\lambda \cdot (T - T_i)}{q \cdot (H - 0)} \quad (7)$$

ارتفاع نسبی $Z = \frac{z}{H}$ و عدد فوریه³⁷ $\tau = \frac{\alpha \cdot t}{H^2}$ به عنوان مکان و زمان بی‌بعد مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن ضریب نفوذ حرارتی برابر $\alpha = \frac{\lambda_a}{\rho \cdot c_p}$ می‌باشد.

با معرفی متغیرهای جدید، معادله گرما بی‌بعد شده به صورت زیر بدست می‌آید:

³¹ Specific strength

³² Initial condition

³³ Boundary conditions

³⁴ Constant heat flux

³⁵ Non-dimensionalization

³⁶ Dimensional analysis

³⁷ Fourier number

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \quad 0 < Z < 1 \quad \tau > 0 \quad (8)$$

$$BC1: \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -1 \quad Z = 0 \quad (9)$$

$$BC2: \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0 \quad Z = 1 \quad (10)$$

$$IC: \theta = 0 \quad 0 < Z < 1 \quad \tau = 0 \quad (11)$$

معادله حاصل، یک معادله غیرهمگن است. برای حل این معادله، ابتدا باید شرایط مرزی غیرهمگن آن را حذف کنیم و از روش تغییر متغیر³⁸ آن را به یک معادله همگن تبدیل کنیم.

$$\theta(Z, \tau) = V(Z, \tau) + W(Z, \tau) \quad (12)$$

با توجه به شرایط مرزی ناهمگن و داده های مسئله، $W(Z, \tau)$ به صورت زیر حاصل می شود.

$$W(X, \tau) = \frac{Z^2}{2} - Z + \tau \quad (13)$$

بنابراین برای $V(Z, \tau)$ به معادله همگن زیر می رسیم.

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \quad 0 < Z < 1 \quad \tau > 0 \quad (14)$$

$$BC1: \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad Z = 0 \quad (15)$$

$$BC2: \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad Z = 1 \quad (16)$$

$$IC: V(X, 0) = Z - \frac{Z^2}{2} \quad 0 < Z < 1 \quad \tau = 0 \quad (17)$$

با اعمال روش تفکیک متغیرها³⁹، مقادیر ویژه⁴⁰ و توابع ویژه⁴¹ را بدست می آوریم.

$$V(Z, \tau) = T(\tau) \times S(Z) \quad (18)$$

$$V(Z, \tau) = \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2}{n^2 \pi^2} \cos n\pi Z \cdot e^{-n^2 \pi^2 \tau} \quad (19)$$

سپس با استفاده از ویژگی تعامد⁴² توابع ویژه و استفاده از شکل کسینوسی سری فوریه⁴³، معادله غیرهمگن اولیه حل می شود. حل معادله بی بعد گرما بصورت زیر می باشد:

$$\theta(Z, \tau) = \tau + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi Z)}{n^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi Z)}{n^2} e^{-(n\pi)^2 \tau} \quad (20)$$

فرضیه های فوق از طریق نتایج به دست آمده از شبیه سازی های عددی برای مقاطع مختلف SFB اعتبارسنجی شده است. برای این منظور نرم افزار $SAFIR$ [27] (توسعه یافته در دانشگاه لیژ⁴⁴) مورد استفاده قرار گرفت [26].

³⁸ Variation of parameters

³⁹ Separation of variables

⁴⁰ Eigenvalues

⁴¹ Eigenfunctions

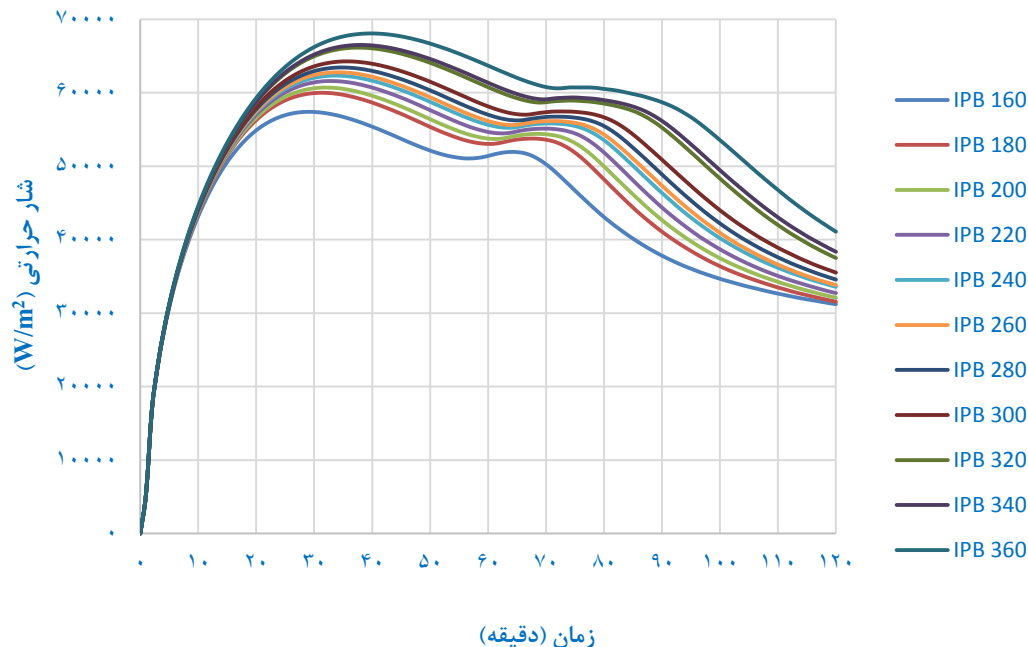
⁴² Orthogonality

⁴³ Fourier series

⁴⁴ University of Liège

۲-۳- تعیین شار حرارتی برای مقاطع SFB

برای استفاده از رابطه (۲۰) باید یک شار حرارتی ثابت (مستقل از زمان) تعریف کنیم. این شار حرارتی، انتقال حرارت توسط تابش و همرفت روی سطوح در معرض آتش سوزی (لبه پایینی دال و ورق فولادی) را شامل می‌شود. بر اساس دمای سطح ورق فولادی که توسط شبیه‌سازی‌های عددی به دست آمده [۲۶، ۲۷]، شار حرارتی خالص ($\dot{h}_{net}$) به عنوان تابعی از زمان برای مقاطع SFB مذکور در جدول (۲) محاسبه شده و در شکل (۱۱) ارائه شده است. پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه $\dot{h}_{net}$ مطابق آیین‌نامه اروپا [۶-۹] به کار رفته است.

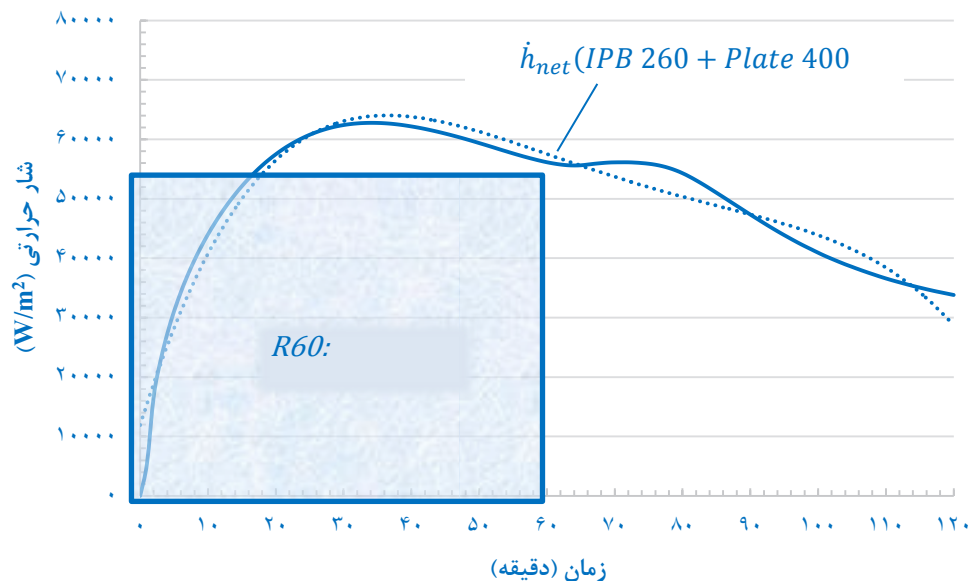


شکل ۱۱- منحنی شار حرارتی خالص برای مقاطع SFB مطابق جدول (۲)

از آنجائیکه درجه حرارت و مقاومت خمشی مقطع SFB فقط برای زمان‌های خاصی (R_{30} ، R_{60} ، R_{90} و R_{120}) مورد نیاز است، با انتگرال‌گیری از تابع شار حرارتی خالص (معادله ۱) در زمان‌های مذکور و سپس تقسیم مساحت زیر نمودار بر زمان متناظر آن، شار حرارتی ثابت بدست می‌آید.

$$q = \int_0^t \dot{h}_{net} dt / t \quad (21)$$

برای مثال، روش بدست آوردن شار حرارتی ثابت (q) برای مقطع SFB متشکل از نیمرخ IPB 260 و ورق فولادی متناظر با آن (Plate 400 × 20) طبق جدول (۲) برای زمان ۶۰ دقیقه (R_{60}) در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همچنین این پارامتر برای مقطع مذکور در زمان‌های مشخص ۳۰ (R_{30})، ۶۰ (R_{60})، ۹۰ (R_{90}) و ۱۲۰ (R_{120}) دقیقه محاسبه گردید (جدول ۳).



شکل ۱۲- شار حرارتی ثابت برای مقطع IPB 260 و ورق متناظر آن برای زمان ۶۰ دقیقه (R_{60})

جدول ۳- شار حرارتی IPB 260

شار حرارتی (q) (W/m^2)	رده آتش (min)
۴۶۰۰۰	R_{30}
۵۴۰۰۰	R_{60}
۵۳۰۰۰	R_{90}
۴۹۰۰۰	R_{120}

با توجه به تغییرات کوچک شار حرارتی در محدوده مقاطع SFB مذکور در جدول (۲)، می‌توان از رابطه (۲۲) برای بدست آوردن شار حرارتی مقاطع مختلف استفاده کرد. برای استفاده از رابطه زیر، مقادیر (q) محاسبه شده در جدول (۳) کاربردی می‌باشند.

$$q = q_{IPB260} \times \frac{H_{IPB260}}{H_{Section}} \quad (22)$$

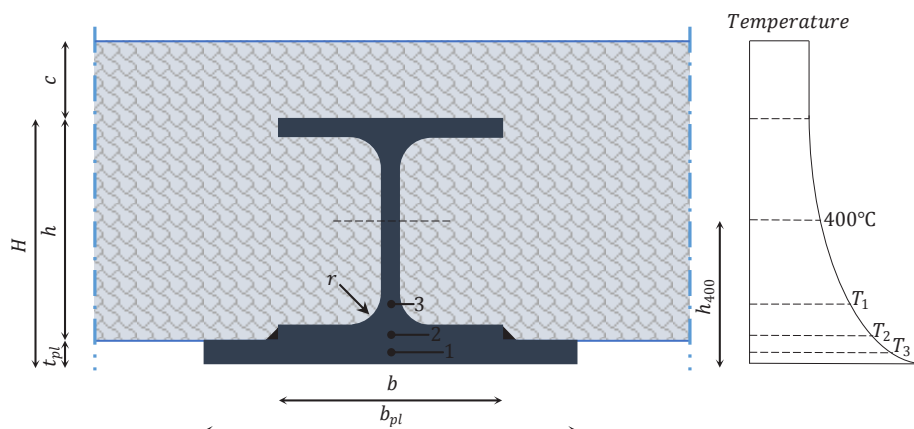
۳-۳- توسعه تحلیلی توزیع غیرخطی درجه حرارت

مقادیر ابعادی توزیع دما از طریق بازیابی رابطه (۷) بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$T(Z, \tau) = \theta(Z, \tau) \cdot q \cdot H / \lambda + T_i \quad (23)$$

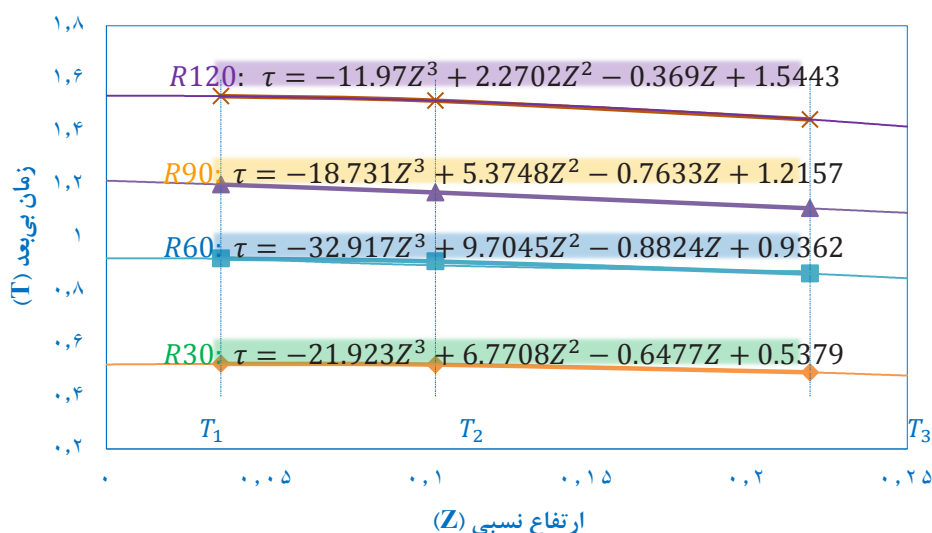
با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۳) درجه حرارت نقاط تعیین شده در مقطع SFB محاسبه می‌شود. این نقاط در دستگاه مختصات مکان-زمان بی‌بعد شده Z (محور عمودی با مبدا لبه تحتانی ورق فولادی به سمت بالا) و τ (محور افقی زمان بی‌بعد) مشخص می‌شوند. مقدار H همواره به عنوان ارتفاع کل نیمرخ و ورق فولادی تعریف می‌شود. درجه حرارت در سه نقطه مهم مطابق شکل (۱۳) محاسبه می‌شود: درجه حرارت T_1 در نقطه ۱ در مرکز ورق فولادی؛ دمای T_2 در نقطه ۲ در مرکز بال تحتانی نیمرخ فولادی و دمای T_3 در نقطه ۳ در لبه بالایی فیله ریشه^{۴۵} قرار دارد.

⁴⁵ Root fillet



شکل ۱۳- مقطع SFB با نقاط مربوط به محاسبه دما

از آنجا که τ تابع مکان و زمان است، به رده مقاومتی برابر آتش بستگی دارد و باید برای هر یک از ۳ نقطه شکل (۱۳) محاسبه شود (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- زمان بی بعد (τ) برحسب ارتفاع نسبی (Z) و رده مقاومتی آتش برای مقطع $IPB 260 + Plate 400 \times 20$

به منظور توسعه کاربرد رابطه (۲۰) برای تمامی مقاطع مذکور در جدول (۲)، τ_{IPB260} مستخرج از توابع چندجمله‌ای روند غیرخطی ترسیمی در شکل (۱۴)، در یک ضریب هندسی ضرب می‌شود. این ضریب، به ریشه ضخامت مقطع مورد نظر نسبت به ضخامت بال نیم‌رخ $IPB 260$ وابسته می‌باشد. مقادیر زمان بی‌بعد در نقاط مهم مقطع مورد بررسی در جدول (۴) مشخص شده است.

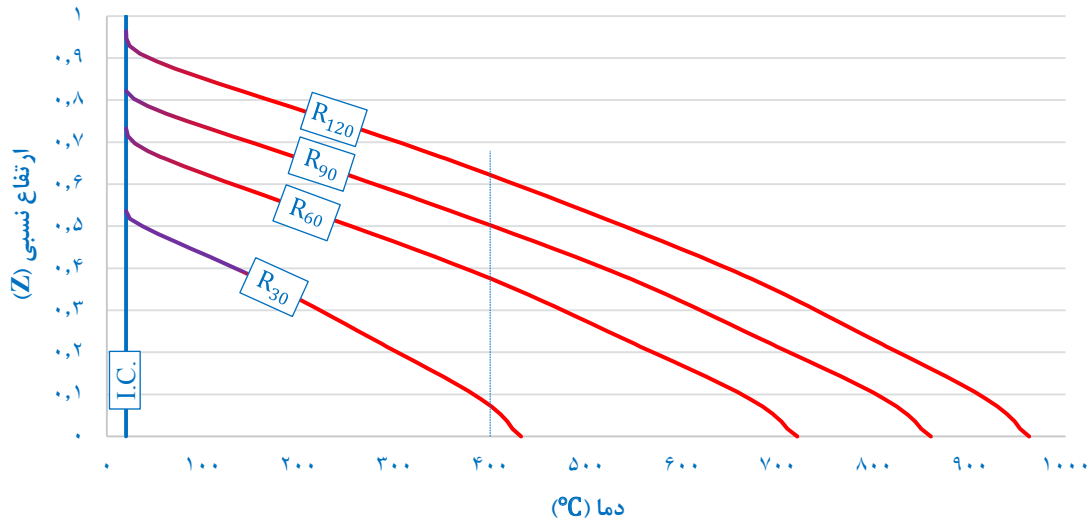
جدول ۴- زمان بی‌بعد (τ) در نقاط مهم برای مقطع $IPB 260 + Plate 400 \times 20$

رده آتش	ارتفاع نسبی (Z)		
	T_1	T_2	T_3
R_{30}	۰/۵۴۲	۰/۵۱۵	۰/۴۹۶
R_{60}	۰/۹۳۱	۰/۹۰۱	۰/۸۵۹
R_{90}	۱/۲۰۹	۱/۱۶۶	۱/۰۸۶
R_{120}	۱/۵۴۹	۱/۵۱۹	۱/۴۳۶

برای رده‌های مقاومتی مختلف، زمان بی‌بعد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \tau_{(T_n)} &= \tau_{IPB260} / \left(\sqrt{\frac{6+n}{5+n}} \sqrt{t_{f,Section} / t_{f,IPB260}} \right) & R_{30} \\
 \tau_{(T_n)} &= \tau_{IPB260} / \left(\sqrt{5-n} \sqrt{t_{f,Section} / t_{f,IPB260}} \right) & R_{60} \\
 \tau_{(T_n)} &= \tau_{IPB260} / \left(\sqrt{\frac{3n+4}{2n}} \sqrt{t_{f,Section} / t_{f,IPB260}} \right) & R_{90} \\
 \tau_{(T_n)} &= \tau_{IPB260} \cdot \left(1 + \left(1 - \frac{5}{n} \sqrt{t_{f,Section} / t_{f,IPB260}} \right) / 2 \right) & R_{120}
 \end{aligned} \tag{24}$$

با استفاده از ده جمله نخست سری فوریه رابطه (۲۰) مقدار $\theta(Z, \tau)$ بدست می‌آید. بنابراین مقدار نهایی دمای نقاط تعیین شده در مقطع فولادی توسط رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود. ضریب هدایت گرمایی بصورت ثابت و برابر 27.3 W/mK مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. شکل (۱۵) منحنی هم‌زمان^{۴۶} توزیع دما در طول ارتفاع مقطع برای تمامی رده‌های مقاومت برابر آتش ترسیم شده است.



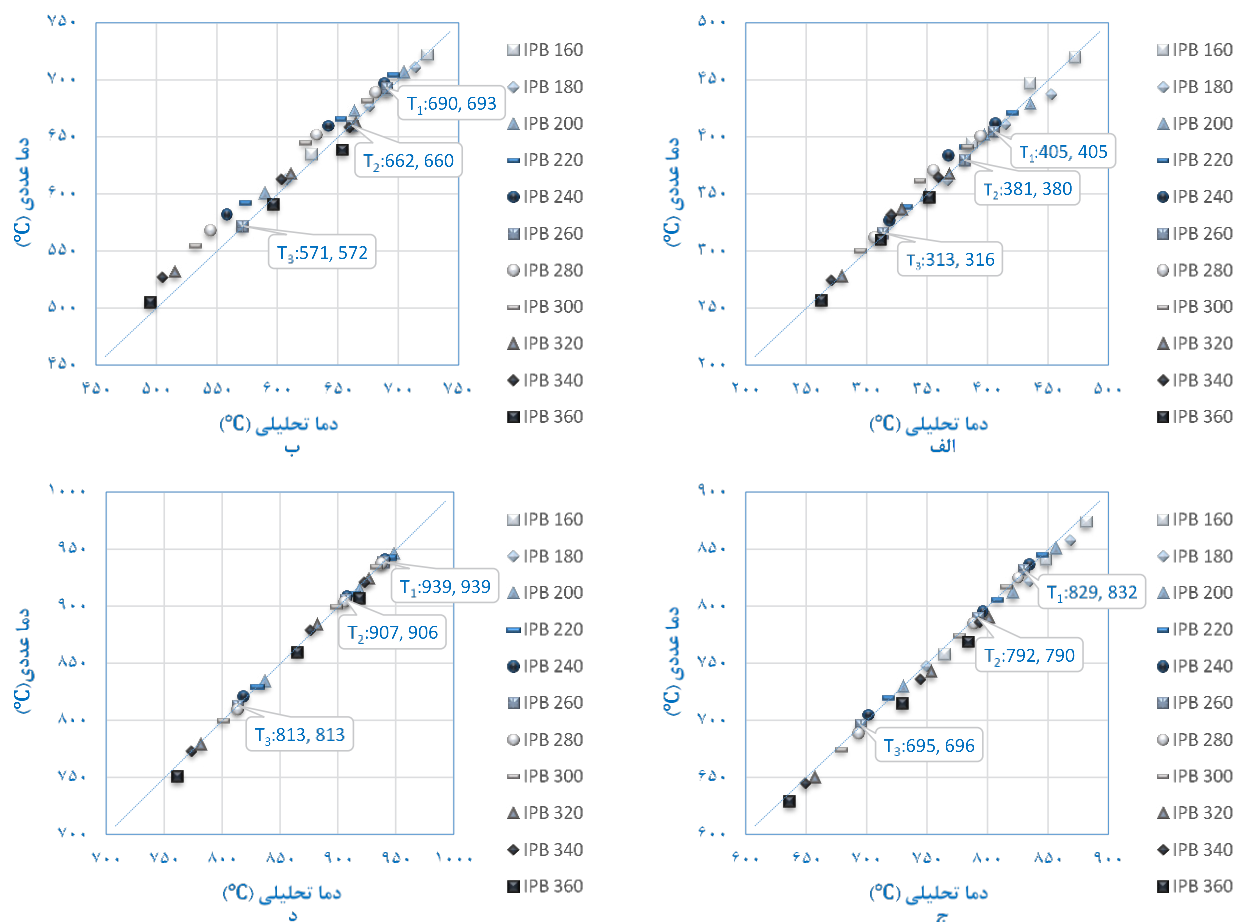
شکل ۱۵- منحنی هم‌زمان توزیع دما در ارتفاع نسبی و رده‌های مقاومتی آتش IPB 260 + Plate 400 × 20

⁴⁶ Isochronous curve

۴- صحت سنجی

۴-۱- درجه حرارت

اکنون معادله (۲۳) قادر به محاسبه درجه حرارت در سه نقطه انتخاب شده است. در نمودارهای زیر، رابطه بین نتایج تحلیلی و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط SAFIR [۲۷] برای مقاطع مندرج در جدول (۲) ارائه شده است (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- مقایسه درجه حرارت فولاد محاسبه شده با معادله (۲۱) و نتایج شبیه‌سازی عددی برای زمان‌های الف) ۳۰ (R₃₀)، ب) ۶۰ (R₆₀)، ج) ۹۰ (R₉₀) و د) ۱۲۰ (R₁₂₀) دقیقه

شکل (۱۶) همبستگی بسیار خوبی از درجه حرارت تحلیلی و عددی را در تمامی زمان‌ها نشان می‌دهد. همچنین میانگین دمای ورق (نقطه ۱، T₁) و دمای متوسط بال تحتانی (نقطه ۲، T₂) مطلوب می‌باشد. بیشترین اختلاف در نتایج برای دمای متوسط در فیله ریشه (نقطه ۳، T₃) بدست آمده است. با این حال، از آنجائیکه تاثیر فیله ریشه در مقاومت خمشی نسبتاً کوچک است، اختلاف دما در این نقطه قابل قبول است (شکل ۱۷).

موقعیت محدوده ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای محاسبه مقاومت خمشی بسیار قابل توجه است، زیرا کاهش مقاومت مقطع فولادی تا زمانی که به این درجه حرارت نرسیده باشد، مطرح نمی‌شود [۸]. با استفاده از عبارات زیر می‌توان موقعیت نقطه ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در جان مقطع را محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} h_{400,R30} &= -0.3H^2 + 0.23H \\ h_{400,R60} &= -0.68H^2 + 0.50H \\ h_{400,R90} &= -0.89H^2 + 0.63H \\ h_{400,R120} &= -1.05H^2 + 0.74H \end{aligned} \quad \begin{matrix} R_{30} \\ R_{60} \\ R_{90} \\ R_{120} \end{matrix} \quad (25)$$

با توجه به شکل (۱۳)، H در واحد متر (m) محاسبه می‌شود.

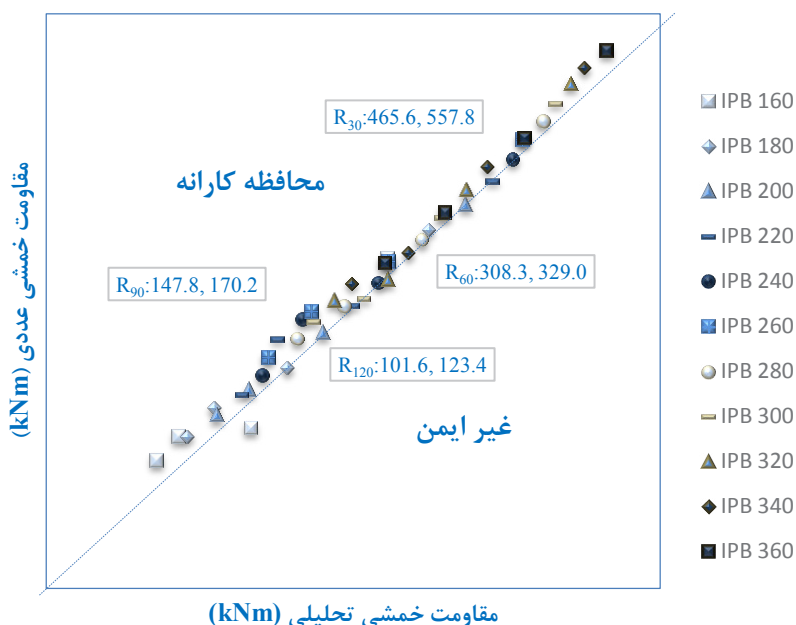
۴-۲- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی با اعمال تعادل نیروها با توجه به محور خنثی در عمق مقطع و در نظر گرفتن لنگر کامل پلاستیک در زمان تسلیم کامل مقطع SFB ، محاسبه شده است. مقاومت تسلیم فولاد در کشش برابر مقاومت تسلیم در فشار برای کل مقطع در نظر گرفته می‌شود. با توجه به خصوصیات مکانیکی بتن، تنها مقاومت فشاری آن در نظر گرفته می‌شود. برای جان نیمرخ فولادی، مختصات نقطه ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تعریف درون‌گرایی خطی درجه حرارت بین این نقطه و تراز فیله ریشه در قسمت پایین جان استفاده می‌شود. همانطور که در بخش‌های قبل نشان داده شده است، تنها گرادیان حرارتی در ارتفاع مقطع در نظر گرفته شده است. مطالعات گسترده عددی نشان داده است که فرض توزیع یکنواخت حرارت در ورق و بال تحتانی (همانطور که از طریق روش تحلیلی ساده شده نیز به دست می‌آید) در موارد خاص منجر به دست بالا گرفتن مقاومت خمشی می‌شود (شکل ۸). بنابراین یک ضریب تقلیل β برای مقاومت خمشی محاسباتی طبق روابط زیر معرفی می‌شود.

$$M_{analytic} = M_{compt} / \beta \quad (26)$$

$$\beta = -166 \cdot H^3 + 142.7 \cdot H^2 - 39.6 \cdot H + 4.8 \quad (27)$$

با توجه به شکل (۱۳)، h در واحد متر (m) محاسبه می‌شود. در بعضی موارد، ضریب β انتخابی منجر به نتایج بسیار ایمن می‌شود، برای مثال در شکل (۱۷)، مقطع $IPB 360$ در R_{60} و R_{30} نشانگر گزاره مذکور می‌باشد. البته برای استفاده آسان این روش، از پیچیدگی در محاسبه ضریب تقلیل، اجتناب شده است. در R_{90} و R_{60} همبستگی مثبت معناداری در ارتفاع مقطع مشاهده شد که می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد. مقایسه ظرفیت لنگر خمشی تحلیلی مقطع مرکب SFB در آتش با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی [۲۷] در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۷- مقایسه تحلیلی و عددی مقاومت خمشی تیر سقف مرکب کم‌عمق $CoSFB$ با $b_{eff} = 1m$

مقایسه لنگر خمشی تحلیلی با مقاومت خمشی عددی برای مقاطع تحت آتش نشان می‌دهد که تمام مقادیر محاسبه شده با روش تحلیلی ارائه شده، محافظه کارانه (ایمن) است و این روش منجر به نتایج بسیار دقیق برای مقاطع غیر مرکب و مرکب می‌شود.

ظرفیت لنگر پلاستیک تیر سقف کم عمق در دمای بالا، بر اساس روش ظرفیت لنگر نهایی⁴⁷ تحلیل شد. در این روش، اتصال برشی بین فولاد و بتن کامل فرض می شود. المان ها همانند تجزیه و تحلیل دما تقسیم بندی می شوند. خواص مکانیکی فولاد و بتن در دمای بالا با توجه به آیین نامه اروپا مبحث ۳ و ۴ محاسبه می شود [۸، ۹]. ظرفیت لنگر کاهش یافته⁴⁸ مقطع مرکب تحت آتش، با استفاده از مفهوم نسبت مقاومت باربری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$R = \frac{\text{ظرفیت خمشی در آتش}}{\text{ظرفیت لنگر نهایی مقطع}} \quad (28)$$

آتش در فلسفه طراحی آیین نامه اروپا به عنوان یک حالت تصادفی و یا یک رخداد تصادفی در نظر گرفته شده است. بنابراین، مقادیر مشخصه⁴⁹ مشخصات مصالح مربوطه در طراحی آتش مورد استفاده قرار می گیرند، و در این صورت زمانی که ظرفیت لحظه ای در شرایط آتش محاسبه می شود، ضرایب اطمینان جزئی به صورت واحد (۱،۰) در نظر گرفته می شوند. ظرفیت لنگر خمشی نهایی در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد با استفاده از ضرایب اطمینان جزئی ارائه شده در مبحث چهارم آیین نامه اروپا محاسبه می شود [۲۸].

۵- مثال کاربردی

کاربرد روش توسعه یافته در قالب یک مثال نشان داده می شود. به منظور بررسی جامع مقاطع مذکور در جدول (۲)، سه مورد از محدوده بالا، پایین و میانی انتخاب شدند. توزیع دما و مقاومت خمشی برای مقاطع IPB 160، IPB 260 و IPB 360 به همراه ورق فولادی متناظرشان، از فولاد ST52، تحت آتش استاندارد "ISO-834" در زمان های R_{30} ، R_{60} ، R_{90} و R_{120} دقیقه نشان داده شد و در آخر ظرفیت لنگر کاهش یافته آن ها محاسبه گردید. قسمت زیرین سقف از قبیل، ورق فولادی و لبه پایینی دال بتنی، تحت آتش قرار گرفت. نیمرخ فولادی از بالا در بتن با مقاومت مشخصه نمونه استوانه ای ۳۰ مگاپاسکال محصور می باشد و پوشش بتنی لبه بالایی دال، ۵۰ میلی متر لحاظ شده است. عملکرد مرکب بین بخش فولادی و بتنی از طریق میلگرد طولی در قسمت بالایی جان نیمرخ فولادی، تامین شد. عرض موثر برای دال بتنی، ۲ متر در نظر گرفته شد. جدول (۵) دمای تحلیلی در مقایسه با دمای عددی را برای مقاطع مورد بحث در ۳ نقطه مرجع ارائه می دهد.

جدول ۵- مثال کاربردی؛ الف) محاسبه دما برای مقطع $IPB 160 + Plate 300 \times 20$ در رده های آتش R_{30} ، R_{60} ، R_{90} و R_{120}

H (m)	Fire class	Point	z (mm)	$Z = \frac{z}{H}$	q (W/m ²)	τ	θ	T _{analytic} (°C)	T _{numeric} (°C)	ΔT (%)
0.18	R ₃₀	T ₁	10	0.06	71556	0.67	0.96	472	470	0.4
		T ₂	26.5	0.15		0.68	0.88	435	447	2.8
		T ₃	48	0.27		0.68	0.78	387	395	2.1
	R ₆₀	T ₁	10	0.06	84000	0.99	1.27	724	722	0.2
		T ₂	26.5	0.15		1.01	1.21	690	691	0.2
		T ₃	48	0.27		1	1.1	628	635	1.2
	R ₉₀	T ₁	10	0.06	82444	1.3	1.58	881	874	0.8
		T ₂	26.5	0.15		1.32	1.52	848	841	0.9
		T ₃	48	0.27		1.27	1.37	764	758	0.8
	R ₁₂₀	T ₁	10	0.06	76222	1.58	1.86	956	951	0.5
		T ₂	26.5	0.15		1.60	1.8	927	919	0.8
		T ₃	48	0.27		1.56	1.66	855	858	0.4

⁴⁷ Ultimate moment capacity method

⁴⁸ Reduced moment capacity

⁴⁹ Characteristic values

جدول ۵- مثال کاربردی؛ ب) محاسبه دما برای مقطع $IPB\ 260 + Plate\ 400 \times 20$ در رده‌های آتش R_{30} ، R_{60} ، R_{90} و R_{120}

H (m)	Fire class	Point	z (mm)	$Z = \frac{z}{H}$	q (W/m^2)	τ	θ	$T_{analytic}$ (°C)	$T_{numeric}$ (°C)	ΔT (%)
0.28	R_{30}	T_1	10	0.04	46000	0.52	0.82	405	405	0
		T_2	28.75	0.1		0.52	0.76	381	380	0.2
		T_3	61.5	0.22		0.49	0.62	313	316	0.9
	R_{60}	T_1	10	0.04	54000	0.92	1.21	690	693	0.4
		T_2	28.75	0.1		0.91	1.16	662	660	0.3
		T_3	61.5	0.22		0.86	0.99	571	572	0.2
	R_{90}	T_1	10	0.04	53000	1.19	1.49	829	832	0.3
		T_2	28.75	0.1		1.17	1.42	792	790	0.3
		T_3	61.5	0.22		1.11	1.24	695	696	0.2
	R_{120}	T_1	10	0.04	49000	1.53	1.83	939	939	0
		T_2	28.75	0.1		1.52	1.76	907	906	0.1
		T_3	61.5	0.22		1.45	1.58	813	813	0

جدول ۵- مثال کاربردی؛ ج) محاسبه دما برای مقطع $IPB\ 360 + Plate\ 500 \times 30$ در رده‌های آتش R_{30} ، R_{60} ، R_{90} و R_{120}

H (m)	Fire class	Point	z (mm)	$Z = \frac{z}{H}$	q (W/m^2)	τ	θ	$T_{analytic}$ (°C)	$T_{numeric}$ (°C)	ΔT (%)
0.39	R_{30}	T_1	15	0.04	33026	0.42	0.7	531	347	1.3
		T_2	41.25	0.11		0.42	0.62	312	310	0.5
		T_3	79.5	0.2		0.42	0.51	262	257	1.9
	R_{60}	T_1	15	0.04	38769	0.86	1.14	654	639	2.2
		T_2	41.25	0.11		0.84	1.04	596	591	0.9
		T_3	79.5	0.2		0.76	0.86	495	505	2.1
	R_{90}	T_1	15	0.04	38051	1.11	1.41	784	769	1.9
		T_2	41.25	0.11		1.06	1.31	729	715	2
		T_3	79.5	0.2		0.99	1.13	636	629	1.1
	R_{120}	T_1	15	0.04	35179	1.49	1.79	918	907	1.2
		T_2	41.25	0.11		1.44	1.68	865	860	0.5
		T_3	79.5	0.2		1.33	1.47	761	751	1.3

موقعیت نقطه ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقطع فولادی با استفاده از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود. موقعیت این نقاط برای مثال مورد بررسی در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- موقعیت h_{400} برای مقاطع مورد بررسی

SFB Section	H (mm)	h_{400} (mm)	
IPB 160	180	R_{30}	31.7
		R_{60}	68
		R_{90}	84.6
		R_{120}	99.2
IPB 260	280	R_{30}	40.9
		R_{60}	86.7
		R_{90}	106.6
		R_{120}	124.9
IPB 360	390	R_{30}	44.1
		R_{60}	91.6
		R_{90}	110.3
		R_{120}	128.9

بر اساس دمای محاسبه شده، مقاومت خمشی مقطع تیر SFB در تمامی رده‌های آتش محاسبه می‌شود. مقاومت تسلیم فولاد در دمای بالا $f_{y,\theta}$ از حاصل ضرب مقاومت تسلیم فولاد در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد f_y در یک ضریب کاهش $k_{y,\theta}$ ، مطابق مبحث سوم آیین‌نامه اروپا، طراحی سازه‌های فولادی، حاصل می‌شود [۸].

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} \cdot f_y \quad (29)$$

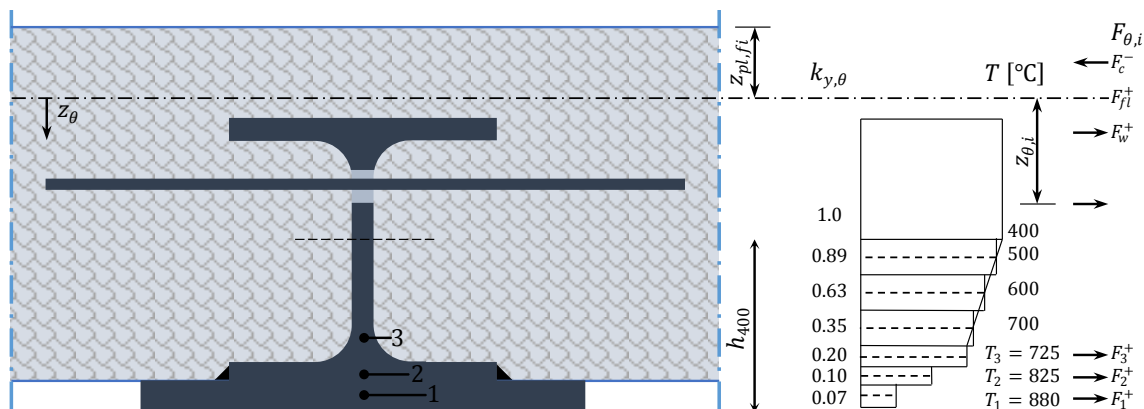
برای محاسبه مقاومت بتن F_c ، مطابق پیوست F مبحث چهارم آیین‌نامه اروپا عمل می‌شود [۹]. متعاقباً برای محاسبه نیروهای داخلی $F_{\theta,i}$ هم می‌توانیم به همین صورت عمل می‌کنیم. بدلیل عدم وجود نیروی نرمال خارجی، تار خنثی پلاستیک $z_{pl,fi}$ از قرار دادن برآیند نیروها برابر صفر $\sum F_{\theta,i} = 0$ بدست می‌آید. نهایتاً، مقاومت خمشی بوسیله تعادل زیر مطابق شکل (۱۸) بدست می‌آید.

$$M_{compt} = \sum (F_{\theta,i} \cdot z_{pl,fi}) \quad (30)$$

محل تار خنثی برای مقاطع مورد بررسی در رده‌های مختلف آتش به صورت جدول (۷) محاسبه شده است:

جدول ۷- موقعیت تار خنثی پلاستیک مقاطع مورد بررسی

SFB Section	IPB 160	IPB 260	IPB 360
	(mm)		
R_0	59.39	74.85	126.33
R_{30}	56.90	74.40	97.95
R_{60}	34.04	55.06	67.10
R_{90}	25.38	51.38	59.20
R_{120}	23.42	50.06	56.63



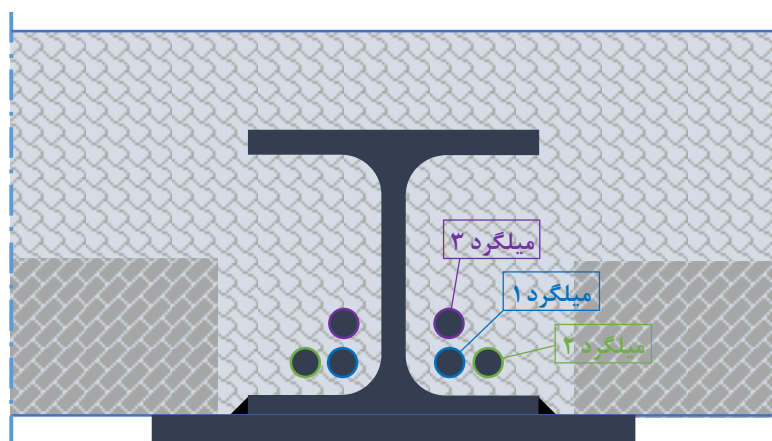
شکل ۱۸: مثال کاربردی؛ محاسبه مقاومت خمشی یک مقطع تیر سقف مرکب کم عمق (CoSFB)

حال می‌توان با بکارگیری معادلات بالا، مقاومت خمشی را محاسبه کرد. جدول (۸) مقاومت خمشی تحلیلی و مقادیر متناظر عددی آنها (محاسبه شده در نرم‌افزار SAFIR به روش اجزاء محدود) را نشان داده و با استفاده از رابطه (۲۸) ظرفیت لنگر کاهش یافته برای هر مورد را برای مقایسه ارائه داده است.

جدول ۸- مقاومت خمشی تحلیلی و عددی مقاطع مورد بررسی

Fire class	IPB 160			IPB 260			IPB 360		
	$M_{analytic}$	$M_{numeric}$	R	$M_{analytic}$	$M_{numeric}$	R	$M_{analytic}$	$M_{numeric}$	R
R_{30}	390.6	428.3	0.88	1087.3	1118.4	0.99	2113.3	2363.7	0.80
R_{60}	143.4	110.6	0.32	403.4	427.1	0.37	1181.7	1214.7	0.44
R_{90}	83.2	105.6	0.19	229.7	292.6	0.21	618.7	635.9	0.23
R_{120}	70.3	86.6	0.16	168.9	207.0	0.15	397.9	426.9	0.15

برای افزایش مقاومت خمشی مقطع می‌توان از عایق حرارتی یا میلگردهای تقویتی در جهت طول تیر به صورت شکل (۱۹) استفاده کرد [۲۹، ۱۹].



شکل ۱۹: میلگردهای تقویتی در مقطع SFB

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک روش ساده برای محاسبه درجه حرارت فولاد و مقاومت خمشی در مقاطع SFB ارائه شده است. این روش مبتنی بر حل معادله انتقال حرارت رسانشی نامانا می‌باشد که تغییرات حرارتی در مقطعی که از یک طرف در معرض منحنی دما-زمان استاندارد و از طرف دیگر تحت دمای ثابت هستند را بررسی می‌کند. همان‌طور که نشان داده شد، روش مذکور می‌تواند دمای متوسط ورق و بال تحتانی نیمرخ فولادی را با دقت بالایی با ضریب همبستگی ۰٫۹۶ پیش‌بینی کند. علاوه بر این می‌توان مقاومت خمشی مقاطع فولادی و مقاطع مرکب فولادی-بتنی را بر اساس توزیع درجه حرارت تعیین شده، برای رده‌های مقاومتی R_{30} ، R_{60} ، R_{90} و R_{120} با دقت بالای ۰٫۹ محاسبه نمود. در نهایت کاربرد این روش در قالب یک مثال نشان داده شد.

برای افزایش حوزه کاربرد این روش، می‌توان مطالعات پارامتری بیشتری انجام داد. مطالعاتی از قبیل، تنوع درجه مقاومتی فولاد، رده مقاومتی بتن و یا تغییرات پوشش بتنی بالای مقطع فولادی می‌توانند منجر به حصول این مقصود شوند. همچنین می‌توان ضریب β را با دقت بالاتری بررسی کرد. علاوه بر این امکان استفاده از انواع دیگر سیستم سقف نظیر دال با هسته توخالی^{۵۰} یا دال مرکب عرشه فولادی^{۵۱} و یا انواع مقاطع دیگر هنوز تحت بررسی است.

مراجع

- [1] Braun M, Hechler O, Birarda V 140 m2 Column Free Space due to Innovative Composite Slim Floor Design. In: 9th International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures, Leeds, UK, 2009. pp 978-981.
- [2] Braun M, Obiala R, Odenbreit C, Hechler O CoSFB-Design and application of a new generation of slim-floor construction. In: 7th European Conference on Steel and Composite Structures, Naples, Italy, 2014. Eurosteel.
- [3] Braun M, Zaganelli D, Hanus F, Obiala R, Cajot LG, Peirce A (2017). Simplified analytical determination of the temperature distribution and the load bearing resistance of slim-floor beams. *ce/papers 1* (2-3):2780-2789.

^{۵۰} Hollow core slab

^{۵۱} Composite steel deck floor slab

- [4] Ellobody E (2011). Nonlinear behaviour of unprotected composite slim floor steel beams exposed to different fire conditions. *Thin-Walled Structures* 49 (6):762-771.
- [5] Ma Z, Mäkeläinen P (2000). Behavior of composite slim floor structures in fire. *Journal of Structural Engineering* 126 (7):830-837.
- [6] CEN European Committee for Standardization (2002) EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. BSI British Standards, Brussels.
- [7] CEN European Committee for Standardization (2004) EN 1992-1-2, Eurocode 1: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules - Structural fire. BSI British Standards, Brussels.
- [8] CEN European Committee for Standardization (2005) EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules – Structural fire Design. BSI British Standards, Brussels.
- [9] CEN European Committee for Standardization (2005) EN 1994-1-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural fire Design. BSI British Standards, Brussels.
- [10] Kim HJ, Kim HY, Park SY (2011). An experimental study on fire resistance of Slim Floor beam. *Applied Mechanics and Materials* 82:752-757.
- [11] Kang H, Lee DH, Hwang J-H, Oh J-Y, Kim KS, Kim H-Y (2016). Structural performance of prestressed composite members with corrugated webs exposed to fire. *Fire Technology* 52 (6):1957-1981.
- [12] Baldassino N, Roverso G, Ranzi G, Zandonini R Service and Ultimate Behaviour of Slim Floor Beams: An Experimental Study. In: *Structures*, 2019. Elsevier, pp 74-86.
- [13] Albero V, Espinós A, Serra E, Romero M, Hospitaler A (2019). Numerical study on the flexural behaviour of slim-floor beams with hollow core slabs at elevated temperature. *Engineering Structures* 180:561-573.
- [14] Albero V, Serra E, Espinós A, Romero M, Hospitaler A (2020). Innovative solutions for enhancing the fire resistance of slim-floor beams: Thermal experiments. *Journal of Constructional Steel Research* 165:105897.
- [15] Zaharia R, Duma DM, Vassart O, Gernay T, Franssen J-M Simplified method for the temperature distribution in slim floor beams. In: *International Conference Applications of Structural Fire Engineering*, 2011. Print Prazska technika, pp 11-22.
- [16] Zaharia R, Franssen J-M (2012). Simple equations for the calculation of the temperature within the cross-section of slim floor beams under ISO Fire. *Steel and Composite Structures* 13 (2):171-185.
- [17] Cajot L-G, Gallois L, Debruyckere R, Franssen J-M Simplified design method for slim floor beams exposed to fire. In: *Nordic Steel Construction Conference*, Oslo, Norway, 2012.
- [18] Espinos A, Romero ML, Hospitaler A, Pascual AM, Albero V (2015). Advanced materials for concrete-filled tubular columns and connections. *Structures* 4:105-113.
- [19] Hanus F, Zaganelli D, Cajot LG, Braun M (2017). Analytical methods for the prediction of fire resistance of “reinforced” slim floor beams. *ce/papers* 1 (2-3):2508-2517.

- [20] Fellingner JH, Twilt L *Fire resistance of slim floor beams*. In: *Composite Construction in Steel and Concrete III*, Irsee, Germany, 1996. ASCE.
- [21] Newman G (1995). *Fire resistance of slim floor beams*. *Journal of Constructional Steel Research* 33 (1-2):87-100.
- [22] Lawson RM, Mullett DL, Rackham J (1997) *Design of asymmetric slimflor beams using deep composite decking*. Steel Construction Institute, Berkshire, U.K.
- [23] Alam N, Nadjai A, Vassart O, Hanus F (2019). *A detailed investigation on thermal behaviour of slim floor beams with web openings at elevated temperatures*. *Journal of Structural Fire Engineering*.
- [24] Both K, Fellingner J, Twilt L (1997). *Shallow floor construction with deep composite deck: from fire tests to simple calculation rules*. *Heron* 42 (3):145-158.
- [25] Wang Y, Burgess I, Wald F, Gillie M (2012) *Performance-based fire engineering of structures*. CRC press.
- [26] Franssen J-M, Gernay T (2017). *Modeling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities*. *Journal of Structural Fire Engineering* 8 (3):300-323.
- [27] Franssen J-M (2005). *SAFIR: A thermal/structural program for modeling structures under fire*. *Engineering Journal* 42 (3):143-158.
- [28] CEN European Committee for Standardization (2004) *EN 1994-1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and Rules for Buildings*. BSI British Standards, Brussels.
- [29] Alam N, Nadjai A, Ali F, Nadjai W (2018). *Structural response of unprotected and protected slim floors in fire*. *Journal of Constructional Steel Research* 142:44-54.