مقدمه ای بر ارزیابی پوشش های ضد حریق

(مجموعه دستورالعمل های ارزیابی پوشش های ضد حریق)

یک هدف مهم آئین‌نامه‌ها و ضوابط ساختمانی، تأمین ایمنی ساختمان‌ها در برابر آتش می‌باشد. 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.

گرچه فولاد سازه‌ای دارای مزیت غیر قابل اشتعال بودن است، ولی مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته آن در دماهای بالا کاهش می‌یابد. مقاومت تسلیم فولاد سازه‌ای تا دمای نزدیک به ۴۳۰°C حدود ۹۴ درصد مقدار اولیه آن می‌باشد که با افزایش دما، این مقاومت کاهش یافته به گونه‌ای که در ۷۶۰°C به حدود ۱۶ درصد مقدار اولیه خود می‌رسد. مدول الاستیسیته فولاد سازه‌ای نیز در دماهای ۴۲۷°C و ۷۶۰°C به ترتیب ۶۷ درصد و ۱۱ درصد مقدار اولیه خود می‌باشد.

یک روش برای محافظت سازه فولادی در برابر آتش، ارتقاء ایمنی آن از طریق به تأخیر انداختن نرخ رشد دمای فولاد است تا زمان کافی فراهم شود تا ساختمان تخلیه شده و یا آتش خاموش شود و مواد قابل اشتعال بدون خرابی سازه، به اتمام برسند. این نوع روش‌ها که شامل عایق کردن فولاد در برابر گرما است، جزو روش‌های غیر فعال محافظت در برابر آتش می‌باشند. برای مثال، در شکل ۱-۱، یک تیر فولادی که با استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر آتش پاششی، محافظت شده، ملاحظه می‌شود.

شکل ۱-۱: یک تیر حفاظت شده در مقابل آتش به کمک **SFRM**

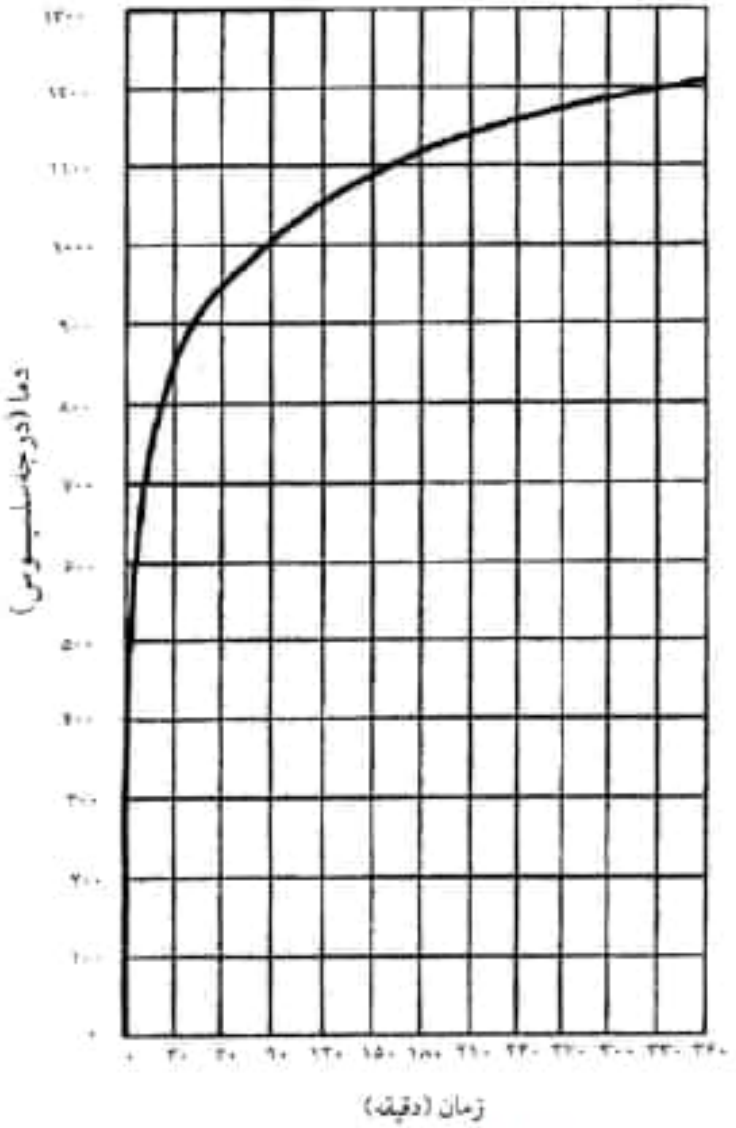
انواعی از پوشش‌های محافظت‌کننده در برابر آتش برای محافظت سازه در برابر آتش وجود دارد که به طور کلی می‌توان به پوشش‌های معدنی پاششی، رنگ‌های پف‌کننده، تخته‌های معدنی و غیره اشاره نمود. در این کتاب (که در آن مجموعه‌ای از

دستورالعمل‌های محافظت در برابر آتش ارائه شده است)، تمرکز اصلی بر روی پوشش‌های پاششی معدنی می‌باشد.

روش معمول در تأمین هدف سیستم محافظت غیرفعال، تجویزی است. ساختمان‌ها بسته به کاربردشان به وسیله آئین‌نامه ساختمانی مربوطه طبقه‌بندی می‌شوند. برای هر دسته، محدودیت‌های ارتفاع و مساحت وجود دارد که به تراز مقاومت در برابر آتش تأمین شده، وابسته است. برای مثال، یک ساختمان با کاربری تجاری با ارتفاع و مساحتی مشخص، ممکن است نیازمند آن باشد که اجزای ساختاری آن غیر قابل سوختن باشند و یک نرخ مقاومت در برابر آتش ۲ ساعت را برآورده سازند. الزامات کامل این موضوع در مقررات و آیین‌نامه‌های ساختمانی معتبر وجود دارد که از جمله مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ایران و نشریه شماره ض-۶۸۲ از انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی را می‌توان نام برد. نرخ مقاومت در برابر آتش اجزای ساختمانی، باید مطابق روش‌های آزمون استاندارد تعیین شود. بالطبع استفاده همزمان از دو سیستم پوشش محافظت‌کننده و سیستم‌های فعال، ایمنی در برابر آتش را به میزان قابل توجهی بهبود می‌دهد.

۱-۱ نگاهی به روش‌های استاندارد آزمون مقاومت در برابر آتش برای ستون‌های فولادی

برای آزمون مقاومت در برابر آتش برای عناصر مختلف ساختمانی و از جمله سازه‌های فولادی، استانداردهای ملی ایران تهیه شده که از جمله می‌توان استانداردهای شماره ۱-۱۲۰۵۵ و ۲-۱۲۰۵۵ را نام برد. منحنی دما – زمان استاندارد ملی ایران در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲: منحنی استاندارد دما – زمان

به طور کلی برای آزمون آتش ستون‌های فولادی، دو روش مختلف امکان‌پذیر است: ۱- ستون تحت بار فشاری و ۲- ستون بدون بار. در ادامه توضیحات مربوط به طور اختصار ارائه می‌شود.

روش آزمون آتش ستون تحت بار

روش هایی که در اینجا توضیح داده می‌شود به صورت کلی مطرح شده و ممکن است از استانداردی به استاندارد دیگر تفاوت‌هایی در جزئیات روش آزمون وجود داشته باشد. طول ستون در معرض آتش بستگی به هدف آزمون و استاندارد مرجع دارد. به عنوان مثال در استاندارد ASTM E119، آزمون تحت بار روی ستون‌های با ارتفاع حداقل ۲/۷ متر صورت می‌گیرد. ستون در حین آزمایش باید به طور قائم قرار گیرد. در حین آزمایش، ستون تحت حداکثر بار فشاری مجاز خود قرار گرفته و تمام وجوه ستون باید در معرض آتش قرار گیرد. حداکثر بار فشاری مجاز ستون، حداکثر باری است که آئین‌نامه ساختمانی اجازه می‌دهد تا به ستون وارد شود. حداکثر زمانی که ستون در معرض آزمایش آتش، بار وارده به خود را تحمل می‌کند، به عنوان نتیجه آزمایش اندازه‌گیری می‌شود و بیانگر نرخ مقاومت در برابر آتش ستون آزمون شده است. مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۱-۱۲۰۵۵، شکست معیار ظرفیت باربری ستون زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار تغییر شکل محوری ستون از یک صدم ارتفاع آن تجاوز کند یا شدت تغییر شکل محوری ستون از سه هزارم ارتفاع آن تجاوز کند.

روش آزمون آتش ستون بدون بار

این روش بخصوص برای ارزیابی پوشش‌های محافظت‌کننده ستون‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن ستون، تحت بار نمی‌باشد. ستون محافظت شده باید در حین آزمایش قائم بوده و طول آن بستگی به روش استاندارد مرجع دارد. به عنوان مثال در استانداردهای اروپایی، ستون‌های با ارتفاع یک متر به طور گسترده برای آزمون استفاده می‌شود. در این روش، دمای فولاد به وسیله تعداد معین ترموکوپل در چند تراز

مختلف اندازه‌گیری می‌شود. در حین آزمایش، تمام وجوه ستون در کل طول آن باید در معرض آتش قرار بگیرد. حداکثر زمانی که انتقال حرارت از طریق پوشش محافظت‌کننده موجب شود تا دمای متوسط فولاد به دماهای مورد نظر برسد، ثبت می‌شود. این موضوع در فصل‌های بعدی که به دستورالعمل‌های مربوط اختصاص دارد، شرح داده شده است.

۱-۲ محافظت در مقابل آتش برای ستون‌های فولادی

معیار عملکردی برای یک ستون در معرض آتش آن است که قادر به تحمل بارهای وارده برای یک مدت زمان مشخص هنگامی که تحت افزایش دمای ناشی از آتش قرار می‌گیرد، باشد. از آن جایی که مشخصات مکانیکی فولاد در دماهای بالا کاهش می‌یابد، طول زمانی که ستون می‌تواند عملکرد مورد انتظار خود را حفظ کند، به وسیله کاهش نرخ انتقال حرارت به فولاد، قابل افزایش است. نرخ انتقال حرارت به فولاد از طریق جذب انرژی گرمایی به کمک یک عامل محافظتی، قابل کاهش است. برای مثال، این مکانیسم در ستون‌های فولادی لوله‌ای پر شده با آب استفاده شده است که در این حالت، زمان مقاومت در برابر آتش به وسیله ظرفیت جذب گرمای آب افزایش می‌یابد. بتن دارای ویژگی ظرفیت ذخیره حرارتی بالاتر و ضریب هدایت حرارتی پایین‌تری نسبت به فولاد است. بنابراین فولاد و بتن برای بهبود عملکرد ستون در دماهای بالا، می‌توانند با هم ترکیب شوند. مقاطع لوله‌ای فولادی پر شده با بتن و مقاطع فولادی مدفون شده در بتن، مثال‌هایی از چنین سیستم‌های ترکیبی هستند. اما روش معمول برای تأخیر در انتقال حرارت به فولاد، حفاظت از ستون فولادی به کمک یک ماده عایق حرارتی می‌باشد. با استفاده از این روش، مدت زمان مقاومت در مقابل آتش کافی

برای یک ستون فولادی به وسیله اجرای ضخامت مناسبی از پوشش محافظت‌کننده، قابل دسترسی است. ضخامت لایه محافظت‌کننده که زمان رسیدن به دمای بحرانی را افزایش می‌دهد به کمک روش‌های تحلیلی یا اطلاعات آزمایشگاهی قابل تعیین است.

معیار دما

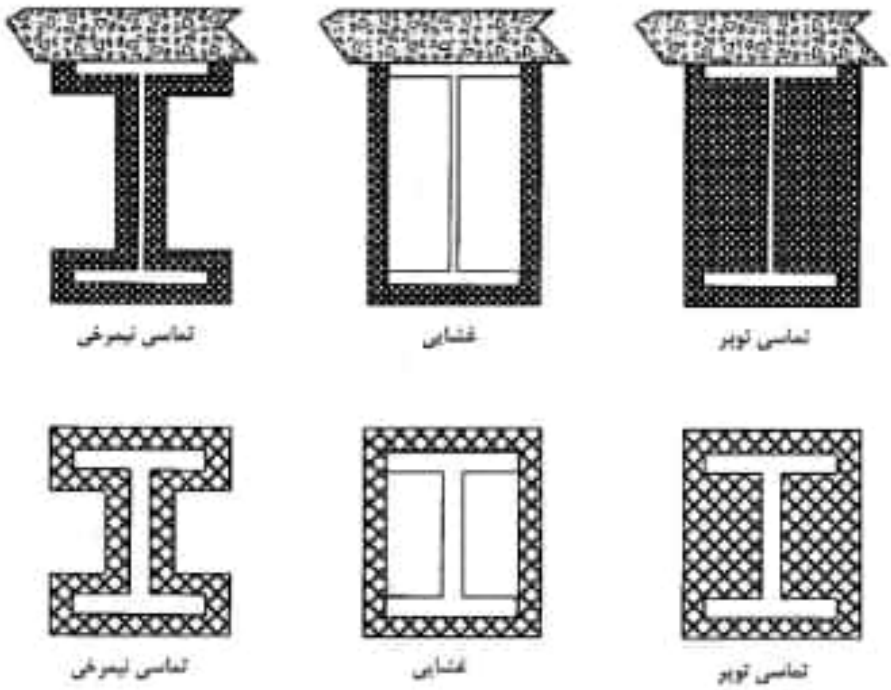
اطلاعات دمایی از آزمایش‌های ستون‌های تحت بار در معرض آتش، نشان می‌دهند که گسیختگی ستون به میزان منطقی بر اساس دمای فولاد مقطع قابل پیش‌بینی است. تأیید شده است که توانایی یک ستون در تحمل بارهای وارده، تا زمانی که آتش‌سوزی باعث افزایش دمای متوسط مقطع به حدود ۵۴۰°C نشود، ادامه می‌یابد. این دما اغلب به عنوان دمای بحرانی در نظر گرفته می‌شود و بیانگر دمایی است که در آن مقاومت ستون حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. این حدود دمایی به عنوان اساس تحلیل‌های انتقال حرارت می‌تواند استفاده شود و همچنین بیانگر معیارهای گسیختگی در آزمایش یک ستون محافظت شده است.

معیار ضریب مقطع

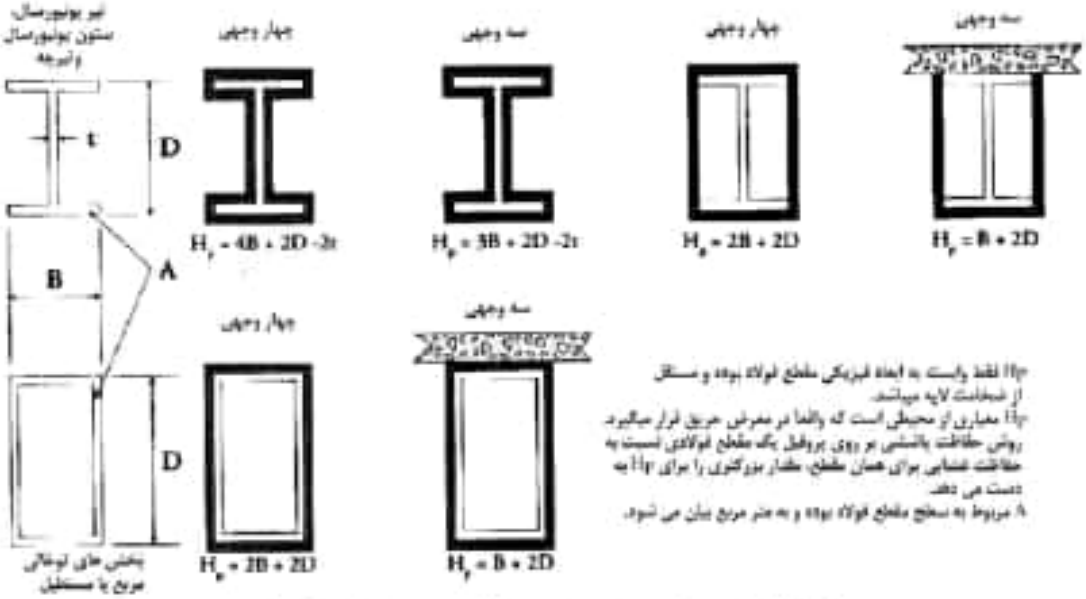
اگر یک مقطع فولادی در معرض حریق قرار گیرد، هرچه دارای محیط بزرگتری باشد تحت حرارت بیشتری قرار می‌گیرد. به همین ترتیب یک مقطع با مساحت سطح بیشتر، چاه حرارتی بزرگتری را تشکیل می‌دهد و به عبارتی حرارت بیشتری برای بالا بردن دمای آن لازم است. به این ترتیب دمای یک مقطع ضخیم و کوچک کندتر از یک مقطع بزرگ و نازک افزایش می‌یابد. لذا حاصل تقسیم محیط در معرض حرارت به مساحت سطح یک مقطع، می‌تواند شاخص مناسبی برای سرعت افزایش دمای آن مقطع باشد، به طوری که هر چه حاصل تقسیم این دو مقدار بزرگتر باشد، به محافظت بیشتری نیاز

داشته و ضخامت پوشش محافظ باید بیشتر باشد. بنابراین بسیار مهم است که جدول ضخامت پوشش محافظت‌کننده در برابر آتش برای ضرایب مقطع مختلف تهیه و ارائه شود.

نحوه محاسبه و نمایش نمادی ضریب مقطع در کشورهای مختلف تا حدودی متفاوت است. در بریتانیا برای این ضریب از نماد H_p/A استفاده می‌شود. H_p محیط قسمتی از مقطع است که در معرض آتش قرار دارد، در حالی که A مساحت سطح کل مقطع می‌باشد. بنابراین H_p تا حدود زیادی به شکل هندسی پوشش محافظ بستگی دارد. در محافظت غشایی، محیط H_p برابر با مجموع ابعاد داخلی تخته‌های دوربند می‌باشد، در حالی که در محافظت تماسی پروفیلی برابر با محیط خود مقطع فولادی می‌باشد. برای تیرهای سیستم کف که یک وجه تیر به وسیله سیستم کف محافظت می‌شود، H_p فقط مجموع محیط قسمتی است که در معرض آتش می‌تواند قرار گیرد و وجه مجاور کف حذف می‌شود. شکل‌های ۱-۳ و ۱-٤ روش‌های محافظت سه وجهی یا چهار وجهی مقاطع و نحوه محاسبه H_p/A را برای آنها نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: انواع محافظت تماسی و غشایی



شکل ۱-۴: روش محاسبه H_p/A برای پروفیل‌های مختلف

نماد مورد استفاده برای ضریب مقطع در آمریکا، W/D، در کانادا، M/D و در آلمان، U/A می‌باشد. در سیستم کانادایی، M جرم مقطع برای واحد طول بوده و واحد آن kg/m است و D مساحت سطح مقطعی می‌باشد که به ازای واحد طول در معرض حریق قرار می‌گیرد. لذا واحد M/D کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد. W در سیستم آمریکایی همان جرم مقطع به ازای طول است، اما از سیستم امپریال استفاده می‌شود و D مشابه با U آلمانی یا H_p بریتانیایی، برابر با محیط در معرض حریق (یا به بیان دقیق‌تر محیط مورد محافظت) است. بنابراین واحد آن lb/ft^2 می‌باشد. نماد U/A در سیستم آلمان عیناً مشابه همان H_p/A بریتانیا است که در فوق ذکر شد.

اگر دانسیته فولاد را $۷۸۵۰kg/m^3$ بگیریم، ضریب تبدیل دو سیستم بریتانیایی و آلمانی به کانادایی به صورت زیر خواهد بود:

$$H_p/A = U/A = ۷۸۵۰ \div M/D$$

نرخ تغییر دما در یک جسم تابعی از جرم و مساحت سطح در معرض اختلاف دما می‌باشد. بنابراین یک ضریب تعیین‌کننده مقاومت در برابر آتش ستون فولادی، ضریب مقطع W/D می‌باشد که در آن W، وزن واحد طول عضو فولادی و D، محیط داخل مصالح محافظت‌کننده در برابر آتش است. برای مقاطع لوله‌ای، پارامتر A/P نسبت مساحت مقطع فولادی به محیط معمولاً به جای W/D استفاده می‌شود.

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

۱-۳ دمای بحرانی ستون‌های فولادی

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

در این قسمت در خصوص حاشیه ایمنی ستون‌های فولادی تحت فشار که مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران با عنوان "طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی" ویرایش ۱۳۸۷ طراحی شده است، با استفاده از روش طراحی تنش مجاز بحث می‌شود. در عمل، یک ستون فولادی در ساختمان دارای ظرفیت باربری به مراتب بیشتر از بار فشاری وارد به خود می‌باشد. در هنگام آتش‌سوزی، در اثر حرارت بالای ایجاد شده، مشخصات مکانیکی فولاد شامل مقاومت تسلیم (F_y) و مدول الاستیسیته (E) متناسب با افزایش دما، کاهش یافته و به تبع آن، مقاومت فشاری ستون کم می‌شود. با توجه به اینکه بار وارده ثابت است، در دمایی که کاهش مقاومت ستون به حدی باشد که مقاومت ستون کمتر از بار وارده شود، گسیختگی ستون اتفاق خواهد افتاد و دمای متناظر با این حالت حدی، دمای بحرانی ستون خواهد بود.

مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، تنش فشاری مجاز ستون به لاغری (λ) وابسته می‌باشد که در رابطه زیر معرفی شده است:

$$\lambda = kL/r \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه، k ضریب طول مؤثر ستون، L طول ستون و r شعاع ژیراسیون مقطع ستون است. در این مبحث، پارامتر C_c که لاغری مرزی بین کمانش ارتجاعی و غیر ارتجاعی است در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه، پارامترهای E و F_y به ترتیب مدول الاستیسیته و مقاومت تسلیم فولاد ستون است. برای ستون با لاغری کمتر از C_c، تنش مجاز فشاری ستون از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$F_a = \frac{1}{F.S.}\left[1 - \frac{1}{2}(\lambda/C_c)^2\right]F_y \qquad (۳-۱)$$

$$F.S. = 1.67 + 0.375(\lambda/C_c) - 0.125(\lambda/C_c)^3 \qquad (۴-۱)$$

در این روابط، F.S. ضریب اطمینان طراحی است که مقدار آن وابسته به لاغری ستون است. برای لاغری از 0 تا C_c، مقدار ضریب اطمینان از ۱/۶۷ تا ۱/۹۲ تغییر می‌کند. برای ستون‌ها با لاغری بزرگتر از C_c، تنش مجاز فشاری مطابق آئین‌نامه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23\lambda^2} \qquad (۵-۱)$$

که در این حالت، مقدار ضریب اطمینان آئین‌نامه برابر ۱/۹۲ است. مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، در اعضای فشاری مانند ستون‌ها، لاغری نباید از ۲۰۰ تجاوز کند.

اکنون برای تعیین دمای بحرانی ستون (T_{cr})، داریم:

(۶-۱) بارهای وارد به ستون × F.S. = مقاومت ستون در دمای متعارف

(۷-۱) مقاومت ستون در دمای متعارف × (1/F.S.) = بارهای وارد به ستون

(۸-۱) مقاومت ستون در دمای T ≥ بارهای وارد به ستون :گسیختگی ستون در دمای T

ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما×مقاومت ستون در دمای متعارف ≥ مقاومت ستون در دمای متعارف × (1/F.S.) (۹–۱)

(1/F.S.) ≤ ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما تا T (۱۰–۱)

F.S. ≤ 1 × ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما تا T (۱۱–۱)

(1/F.S.) = ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما تا T_{cr} (۱۲–۱)

T_{cr}: دمای بحرانی

بنابراین با توجه به محاسبات بالا و به کمک رابطه (۱–۱۲)، دمای بحرانی ستون فولادی قابل تعیین است. همان طور که قبلاً خاطر نشان شد مشخصات مکانیکی فولاد با افزایش دما تغییر کرده و در دماهای خیلی بالا، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. برای فولادهای ساختمانی با مقاومت تسلیم کوچکتر از ٤٤٨ مگاپاسکال، رابطه مشخصات مکانیکی فولاد با دما در آئین‌نامه‌های EN 1993-1-2 و AISC 360 ارائه شده است که در جداول ۱–۱ و ۱–۲ قابل مشاهده است. از بررسی این جداول مشخص می‌شود که برای ضرایب کاهش مشخصات مکانیکی فولاد با دما در هر دو آئین‌نامه مقادیر یکسانی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه فولادهای ساختمانی متداول در کشور، فولادهای ST37 و ST52 هستند که به ترتیب دارای مقاومت تسلیم حدود ۲٤۰ و ۳٦۰ مگاپاسکال می‌باشند، می‌توان از جداول ۱–۱ و ۱–۲ برای بررسی رفتار این فولادها در دماهای بالا استفاده نمود. مدول الاستیسیته فولادهای ساختمانی نیز حدود ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۱-۱: ضرایب کاهش مشخصات مکانیکی فولاد در دماهای بالا مطابق با آئین‌نامه **EN 1993-1-2**

دمای فولاد (θ_a)	ضرایب کاهش مشخصات مکانیکی فولاد در دمای θ_a نسبت به ۲۰°C		
	ضریب کاهش برای مقاومت تسلیم موثر	ضریب کاهش برای مقاومت حد تناسب	ضریب کاهش برای شیب محدوده الاستیک خطی
۲۰°C	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۱۰۰°C	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۲۰۰°C	۱/۰۰۰	۰/۸۰۷	۰/۹۰۰
۳۰۰°C	۱/۰۰۰	۰/۶۱۳	۰/۸۰۰
٤۰۰°C	۱/۰۰۰	۰/٤۲۰	۰/۷۰۰
۵۰۰°C	۰/۷۸۰	۰/۳۶۰	۰/۶۰۰
۶۰۰°C	۰/٤۷۰	۰/۱۸۰	۰/۳۱۰
۷۰۰°C	۰/۲۳۰	۰/۰۷۵	۰/۱۳۰
۸۰۰°C	۰/۱۱۰	۰/۰۵۰	۰/۰۹۰
۹۰۰°C	۰/۰۶۰	۰/۰۳۷۵	۰/۰۶۷۵
۱۰۰۰°C	۰/۰٤۰	۰/۰۲۵۰	۰/۰٤۵۰
۱۱۰۰°C	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۲۵
۱۲۰۰°C	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
نکته: برای مقادیر میانی دمای فولاد، درون‌یابی خطی می‌تواند استفاده شود.			

جدول ۱-۲: ضرایب کاهش مشخصات مکانیکی فولاد در دماهای بالا مطابق با آئین‌نامه **AISC 360**

مشخصات مکانیکی فولاد در دماهای بالا				
دمای فولاد (°C)°F	k_y			
(۲۰)۶۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
(۹۳)۲۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
(۲۰٤)٤۰۰	۰/۹۰	۰/۸۰	۱/۰۰	۱/۰۰
(۳۱٦)٦۰۰	۰/۷۸	۰/۵۸	۱/۰۰	۱/۰۰
(۳۹۹)۷۵۰	۰/۷۰	۰/٤۲	۱/۰۰	۱/۰۰
(٤۲۷)۸۰۰	۰/٦۷	۰/٤۰	۰/۹٤	۰/۹٤
(۵۳۸)۱۰۰۰	۰/٤۹	۰/۲۹	۰/٦۱	۰/٦۱
(٦٤۹)۱۲۰۰	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۳۵	۰/۳۵
(۷٦۰)۱٤۰۰	۰/۱۱	۰/۰٦	۰/۱٦	۰/۱٦
(۸۷۱)۱٦۰۰	۰/۰۷	۰/۰٤	۰/۰۷	۰/۰۷
(۹۸۲)۱۸۰۰	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰٤	۰/۰٤
(۱۰۹۳)۲۰۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲
(۱۲۰٤)۲۲۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

مطابق آئین‌نامه EN 1993-1-2، مقاومت فشاری ستون در دمای θ به کمک روابط زیر قابل تعیین است:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \qquad (۱-۱۳)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \qquad (۱-۱٤)$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2}\left[1 + \alpha\bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2\right] \qquad (۱-۱۵)$$

$$\alpha = 0.65\sqrt{235/f_y} \qquad (۱-۱٦)$$

$$\overline{\lambda}_\theta = \overline{\lambda}\left[k_{y,\theta}/k_{E,\theta}\right]^{0.5} \qquad (۱۷-۱)$$

$$\overline{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \qquad (۱۸-۱)$$

$$\overline{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\lambda_1} \qquad (۱۹-۱)$$

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{E/f_y} \qquad (۲۰-۱)$$

در این روابط A، L_{cr} و i مربوط به مشخصات هندسی ستون بوده و به ترتیب بیانگر مساحت سطح مقطع ستون، طول کمانشی ستون و شعاع ژیراسیون مقطع ستون است. پارامتر $\gamma_{M,fi}$ یک ضریب وابسته به مصالح در هنگام آتش‌سوزی است که مطابق آئین‌نامه EN 1993-1-2، برای فولاد واحد اختیار می‌شود. سایر پارامترها نیز در جدول ۱-۱ معرفی شده است. پارامتر $\overline{\lambda}$ بیانگر لاغری بدون بعد ستون است که با تعریف ارائه شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و آئین‌نامه AISC 360 متفاوت است. از مقایسه روابط (۱-۱) و (۱-۱۹) مشاهده می‌شود که لاغری تعریف شده در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان یا آئین‌نامه AISC 360 (λ)، λ_1 ضربدر لاغری تعریف شده در آئین‌نامه EN 1993-1-2 ($\overline{\lambda}$) می‌باشد یعنی:

$$\lambda = \lambda_1 \times \overline{\lambda} \qquad (۲۱-۱)$$

با توجه به اینکه تغییرات λ بین ۰ تا ۲۰۰ می‌باشد، تغییرات $\overline{\lambda}$ نیز به طور متناظر برای فولاد ST37 بین ۰ تا ۲/۱۵ و برای فولاد ST52 بین ۰ تا ۲/٦٤ خواهد بود. اکنون به کمک روابط (۱-۱۳) تا (۱-۲۱) و نیز جدول ۱-۲، مقدار کاهش مقاومت فشاری ستون در اثر افزایش دما محاسبه می‌شود. برای مثال، این محاسبات برای دماهای ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ درجه فارنهایت (به ترتیب معادل ٤۲۷، ٥۳۸ و ٦٤۹ درجه سلسیوس) برای دو

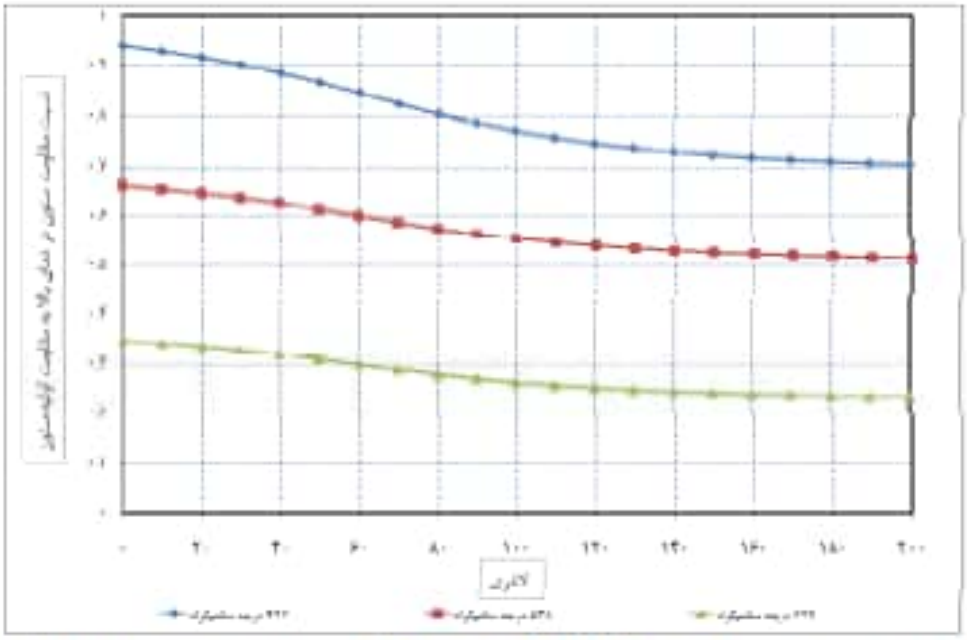
حالت فولاد ST37 و ST52 در جداول ۱-۳ و ۱-٤ ارائه شده است. همچنین مقادیر این جداول در شکل‌های ۱-۵ و ۱-٦ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST37** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق آیین‌نامه **EN 1993-1-2**

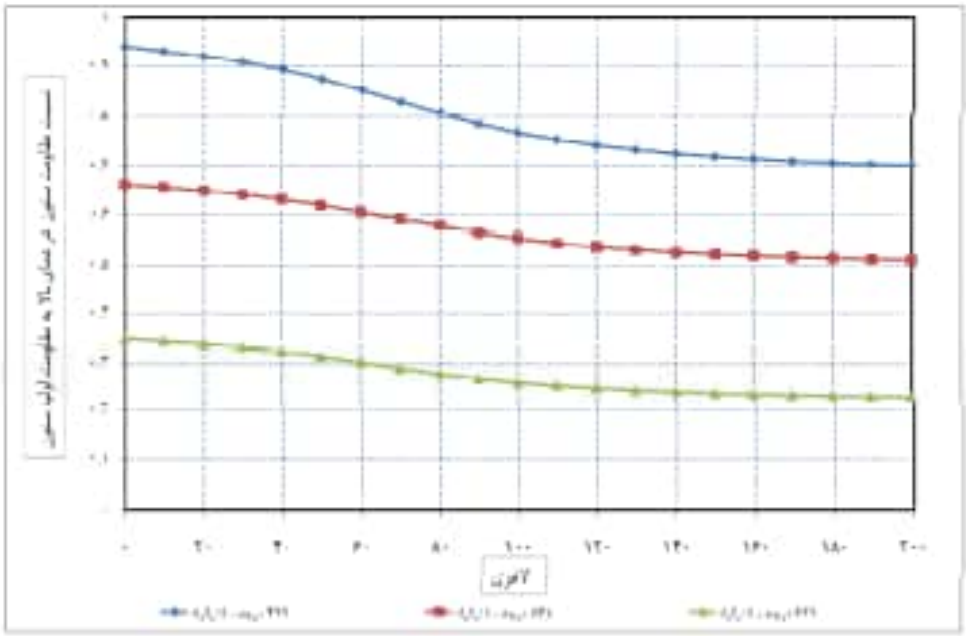
لاغری ستون ($\bar{\lambda}$)	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ٤٢٧°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ٥٣٨°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ٦٤٩°C
۰	۰/۹٤۰	۰/٦٦۰	۰/۳۵۰
۱۰	۰/۹۲۸	۰/٦۵۳	۰/۳٤٤
۲۰	۰/۹۱٦	۰/٦٤٦	۰/۳۳۸
۳۰	۰/۹۰۲	۰/٦۳۷	۰/۳۳۰
٤۰	۰/۸۸٦	۰/٦۲۷	۰/۳۲۱
۵۰	۰/۸۶٦	۰/٦۱۵	۰/۳۱۱
٦۰	۰/۸٤۵	۰/٦۰۲	۰/۳۰۰
۷۰	۰/۸۲٤	۰/۵۸۹	۰/۲۹۰
۸۰	۰/۸۰٤	۰/۵۷٦	۰/۲۸۰
۹۰	۰/۷۸٦	۰/۵٦۵	۰/۲۷۱
۱۰۰	۰/۷۷۰	۰/۵۵۵	۰/۲٦٤
۱۱۰	۰/۷۵۷	۰/۵٤٦	۰/۲۵۸
۱۲۰	۰/۷٤٦	۰/۵٤۰	۰/۲۵٤
۱۳۰	۰/۷۳۸	۰/۵۳٤	۰/۲۵۰
۱٤۰	۰/۷۳۱	۰/۵۲۹	۰/۲٤٦
۱۵۰	۰/۷۲۵	۰/۵۲۵	۰/۲٤٤
۱٦۰	۰/۷۲۰	۰/۵۲۲	۰/۲٤۲
۱۷۰	۰/۷۱۵	۰/۵۱۹	۰/۲٤۰
۱۸۰	۰/۷۱۲	۰/۵۱۷	۰/۲۳۸
۱۹۰	۰/۷۰۹	۰/۵۱۵	۰/۲۳۷
۲۰۰	۰/۷۰٦	۰/۵۱۳	۰/۲۳٦

جدول ۱-٤: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST52** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق آئین‌نامه **EN 1993-1-2**

لاغری ستون ($\bar{\lambda}$)	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ٤٢٧°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ٥٣٨°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ٦٤٩°C
۰	۰/۹٤۰	۰/٦٦۰	۰/۳٥۰
۱۰	۰/۹۳۰	۰/٦٥٤	۰/۳٤٥
۲۰	۰/۹۲۰	۰/٦٤۸	۰/۳۳۹
۳۰	۰/۹۰۸	۰/٦٤۰	۰/۳۳۳
٤۰	۰/۸۹۲	۰/٦۳۱	۰/۳۲٤
٥۰	۰/۸۷۳	۰/٦۱۹	۰/۳۱٤
٦۰	۰/۸٥۱	۰/٦۰٥	۰/۳۰۳
۷۰	۰/۸۲۷	۰/٥۹۱	۰/۲۹۱
۸۰	۰/۸۰٥	۰/٥۷۷	۰/۲۸۰
۹۰	۰/۷۸٥	۰/٥٦٤	۰/۲۷۱
۱۰۰	۰/۷٦۷	۰/٥٥۳	۰/۲٦۳
۱۱۰	۰/۷٥۳	۰/٥٤٤	۰/۲٥٦
۱۲۰	۰/۷٤۲	۰/٥۳۷	۰/۲٥۱
۱۳۰	۰/۷۳۳	۰/٥۳۱	۰/۲٤۷
۱٤۰	۰/۷۲٥	۰/٥۲٦	۰/۲٤٤
۱٥۰	۰/۷۱۹	۰/٥۲۲	۰/۲٤۱
۱٦۰	۰/۷۱٤	۰/٥۱۹	۰/۲۳۹
۱۷۰	۰/۷۱۰	۰/٥۱٦	۰/۲۳۷
۱۸۰	۰/۷۰۷	۰/٥۱٤	۰/۲۳٦
۱۹۰	۰/۷۰٤	۰/٥۱۲	۰/۲۳٥
۲۰۰	۰/۷۰۱	۰/٥۱۰	۰/۲۳٤



شکل ۱-۵: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST37** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق با آئین‌نامه **EN 1993-1-2**



شکل ۱-۶: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST52** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق با آئین نامه **EN 1993-1-2**

اکنون این محاسبات را این بار مطابق آئین‌نامه AISC 360 تکرار می‌کنیم. مطابق این آئین‌نامه، تنش فشاری بحرانی ستون در دمای T از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$F_{cr}(T)=\left[0.42^{\sqrt{F_y(T)/F_e(T)}}\right]F_y(T) \qquad (۲۲-۱)$$

$$F_e(T)=\frac{\pi^2 E(T)}{\lambda^2} \qquad (۲۳-۱)$$

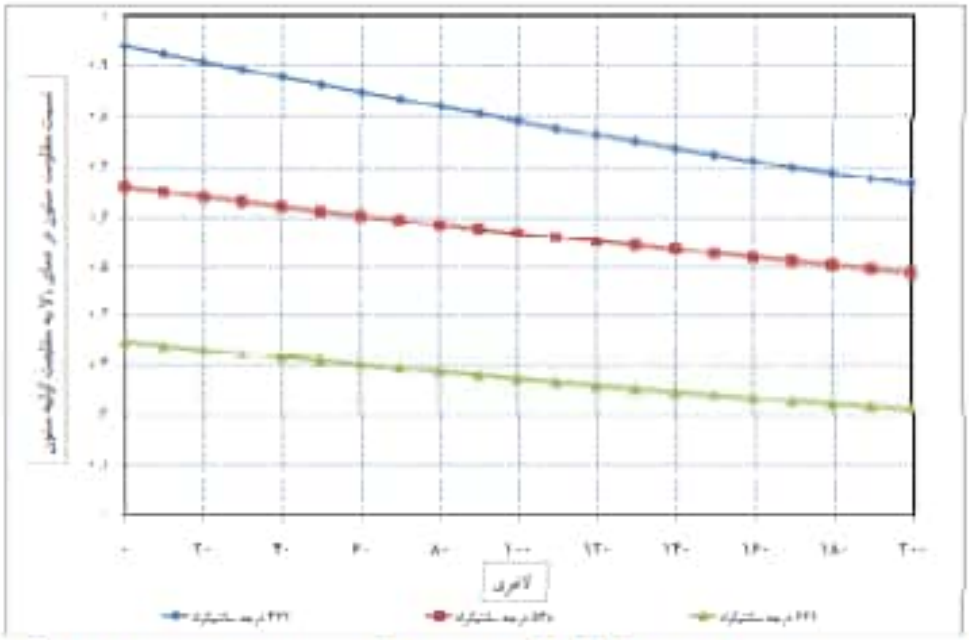
به کمک این روابط و جدول ۱-۲، می‌توان میزان کاهش در مقاومت ستون در اثر افزایش دما را محاسبه کرد. مقاومت مرجع ستون، مقاومت در دمای متعارف (۲۰°C) می‌باشد. برای مثال، این محاسبات برای دماهای ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ درجه فارنهایت (به ترتیب معادل ٤٢٧، ٥٣٨ و ٦٤٩ درجه سلیسیوس) برای دو حالت فولاد ST37 و ST52 انجام شده و در جداول ۱-۵ و ۱-٦ نشان داده شده است. همچنین مقادیر این جداول در شکل‌های ۱-۷ و ۱-۸ نشان داده شده است.

جدول ۱-۵: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST37** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق آئین‌نامه **AISC 360**

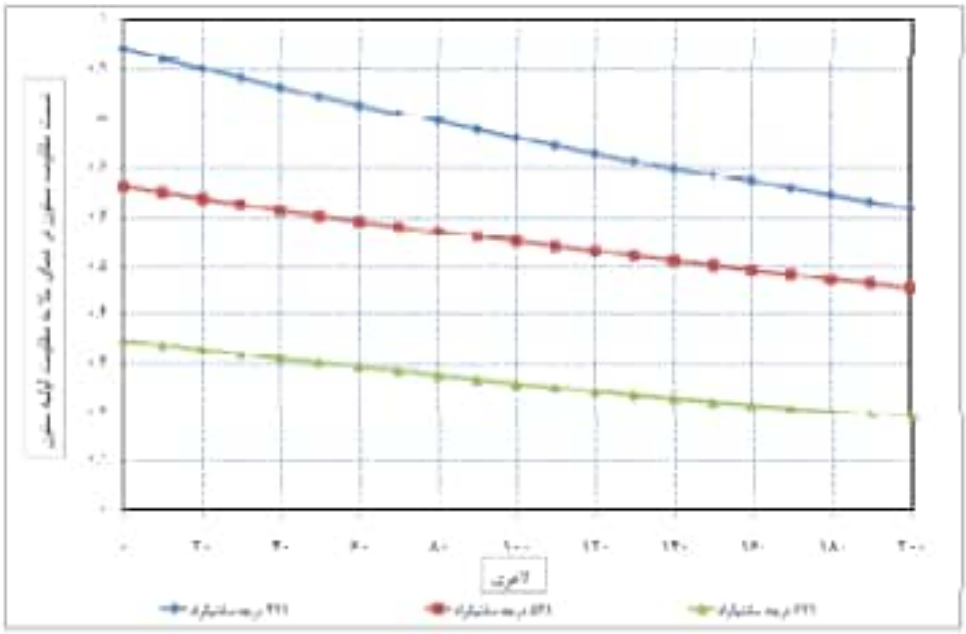
لاغری ستون (λ)	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۴۲۷°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۶۴۹°C
۰	۰/۹۴۰	۰/۶۶۰	۰/۳۵۰
۱۰	۰/۹۲۴	۰/۶۵۰	۰/۳۴۲
۲۰	۰/۹۰۸	۰/۶۴۱	۰/۳۳۳
۳۰	۰/۸۹۳	۰/۶۳۱	۰/۳۲۵
۴۰	۰/۸۷۷	۰/۶۲۲	۰/۳۱۷
۵۰	۰/۸۶۲	۰/۶۱۲	۰/۳۱۰
۶۰	۰/۸۴۸	۰/۶۰۳	۰/۳۰۲
۷۰	۰/۸۳۳	۰/۵۹۴	۰/۲۹۵
۸۰	۰/۸۱۹	۰/۵۸۵	۰/۲۸۸
۹۰	۰/۸۰۵	۰/۵۷۷	۰/۲۸۱
۱۰۰	۰/۷۹۱	۰/۵۶۸	۰/۲۷۴
۱۱۰	۰/۷۷۸	۰/۵۶۰	۰/۲۶۸
۱۲۰	۰/۷۶۵	۰/۵۵۱	۰/۲۶۱
۱۳۰	۰/۷۵۱	۰/۵۴۳	۰/۲۵۵
۱۴۰	۰/۷۳۹	۰/۵۳۵	۰/۲۴۹
۱۵۰	۰/۷۲۶	۰/۵۲۷	۰/۲۴۳
۱۶۰	۰/۷۱۴	۰/۵۱۹	۰/۲۳۷
۱۷۰	۰/۷۰۱	۰/۵۱۲	۰/۲۳۱
۱۸۰	۰/۶۸۹	۰/۵۰۴	۰/۲۲۶
۱۹۰	۰/۶۷۸	۰/۴۹۶	۰/۲۲۰
۲۰۰	۰/۶۶۶	۰/۴۸۹	۰/۲۱۵

جدول ۱-۶: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST52** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق آیین‌نامه **AISC 360**

لاغری ستون (λ)	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۴۲۷°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۶۴۹°C
۰	۰/۹۴۰	۰/۶۶۰	۰/۳۵۰
۱۰	۰/۹۲۰	۰/۶۴۸	۰/۳۴۰
۲۰	۰/۹۰۱	۰/۶۳۶	۰/۳۳۰
۳۰	۰/۸۸۲	۰/۶۲۵	۰/۳۲۰
۴۰	۰/۸۶۴	۰/۶۱۳	۰/۳۱۱
۵۰	۰/۸۴۶	۰/۶۰۲	۰/۳۰۱
۶۰	۰/۸۲۸	۰/۵۹۱	۰/۲۹۳
۷۰	۰/۸۱۱	۰/۵۸۰	۰/۲۸۴
۸۰	۰/۷۹۴	۰/۵۷۰	۰/۲۷۶
۹۰	۰/۷۷۷	۰/۵۵۹	۰/۲۶۷
۱۰۰	۰/۷۶۱	۰/۵۴۹	۰/۲۶۰
۱۱۰	۰/۷۴۵	۰/۵۳۹	۰/۲۵۲
۱۲۰	۰/۷۳۰	۰/۵۳۰	۰/۲۴۵
۱۳۰	۰/۷۱۵	۰/۵۲۰	۰/۲۳۷
۱۴۰	۰/۷۰۰	۰/۵۱۰	۰/۲۳۰
۱۵۰	۰/۶۸۵	۰/۵۰۱	۰/۲۲۴
۱۶۰	۰/۶۷۱	۰/۴۹۲	۰/۲۱۷
۱۷۰	۰/۶۵۷	۰/۴۸۳	۰/۲۱۱
۱۸۰	۰/۶۴۳	۰/۴۷۴	۰/۲۰۴
۱۹۰	۰/۶۳۰	۰/۴۶۶	۰/۱۹۸
۲۰۰	۰/۶۱۶	۰/۴۵۷	۰/۱۹۳



شکل ۱-۷: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST37** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق با آئین‌نامه **AISC 360**



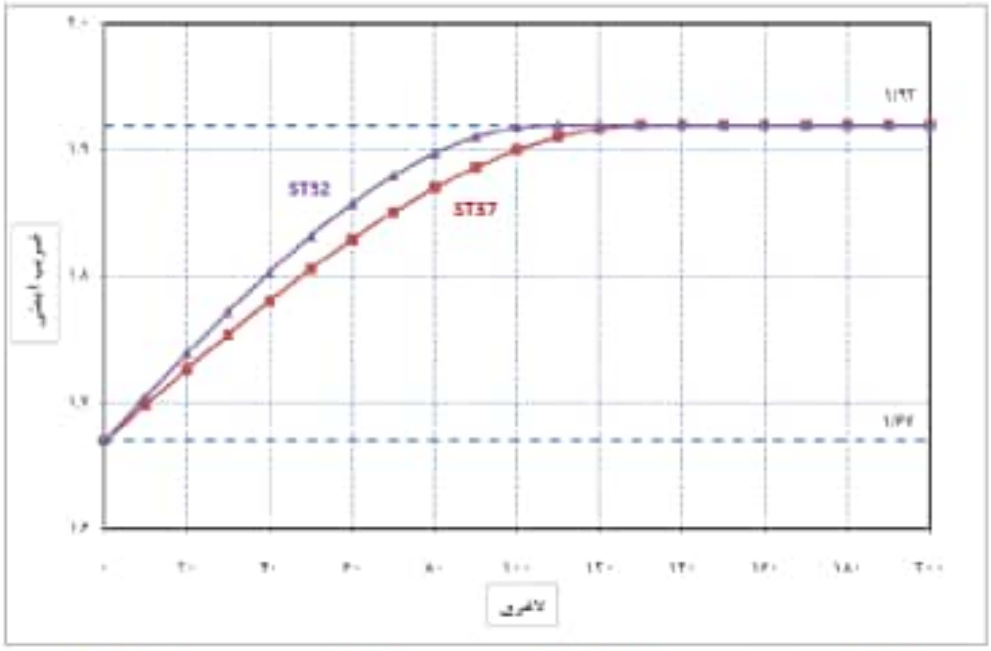
شکل ۱-۸: نسبت مقاومت ستون با فولاد **ST52** در دماهای بالا نسبت به دمای متعارف مطابق با آئین‌نامه **AISC 360**

از جداول ۱-۳ تا ۱-٦ مشاهده می‌شود که در هر دما، با افزایش لاغری ستون، ضریب کاهش مقاومت ستون نیز کوچک‌تر می‌شود. علت آن است که در لاغری‌های خیلی کم (ستون‌های خیلی چاق)، گسیختگی ستون از نوع لهیدگی است که با مقاومت تسلیم فولاد مرتبط است ولی با افزایش لاغری ستون، بحث کمانش ستون که با مدول الاستیسیته فولاد ارتباط دارد، اهمیت پیدا می‌کند و افت این کمیت با افزایش دما در مقایسه با مقاومت تسلیم فولاد در محدوده مورد بررسی مطابق جداول ۱-۱ و ۱-۲ شدیدتر است.

برای فولادهای ساختمانی متداول کشور یعنی ST37 و ST52، مقدار C_c طبق رابطه (۱-۲) محاسبه شده که به ترتیب مساوی ۱۳۱/٤ و ۱۰۷/۳ به دست می‌آید. در اینجا برای این فولادها، مقادیر ضریب اطمینان مبحث دهم مقررات ملی ساختمان برای طراحی ستون‌ها با مقادیر مختلف لاغری را محاسبه می‌شود. نتایج در جدول ۱-۷ ارائه شده و در شکل ۱-۹ نشان داده شده است.

جدول ۱-۷: مقادیر ضریب اطمینان طراحی ستون‌ها مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان برای لاغری‌های مختلف

لاغری ستون (λ)	ضریب ایمنی برای فولاد ST37	ضریب ایمنی برای فولاد ST52
۰	۱/٦٧۰	۱/٦٧۰
۱۰	۱/٦٩٨	۱/۷۰٥
۲۰	۱/۷۲۷	۱/۷۳۹
۳۰	۱/۷٥٤	۱/۷۷۲
٤۰	۱/۷۸۱	۱/۸۰۳
٥۰	۱/۸۰٦	۱/۸۳۲
٦۰	۱/۸۲۹	۱/۸٥۸
۷۰	۱/۸٥۱	۱/۸۸۰
۸۰	۱/۸۷۰	۱/۸۹۸
۹۰	۱/۸۸۷	۱/۹۱۱
۱۰۰	۱/۹۰۰	۱/۹۱۸
۱۱۰	۱/۹۱۱	۱/۹۲۰
۱۲۰	۱/۹۱۷	۱/۹۲۰
۱۳۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۱٤۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۱٥۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۱٦۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۱۷۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۱۸۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۱۹۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰
۲۰۰	۱/۹۲۰	۱/۹۲۰



شکل ۱-۹: مقادیر ضریب اطمینان طراحی ستون مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان

در استاندارد ASTM E119، دمای (۵۳۸°C) ۱۰۰۰°F به عنوان دمای بحرانی ستون فولادی در نظر گرفته شده است. اکنون در این قسمت بررسی می‌شود که آیا این دما تعریف مناسبی برای دمای بحرانی ستون است یا خیر. برای این کار رابطه (۱-۱۱) مطابق آئین‌نامه‌های EN 1993-1-2 و AISC 360 در دمای ۵۳۸°C برای فولادهای ST37 و ST52 محاسبه می‌شود. نتایج در جداول ۱-۸ تا ۱-۱۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱-۸: کنترل گسیختگی ستون با فولاد **ST37** مطابق آئین‌نامه **EN 1993-1-2** در دمای ۵۳۸°C

لاغری ستون ($\bar{\lambda}$)	F.S.	1/F.S.	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C (α)	$\beta = \alpha \times F.S.$
۰	۱/۶۷۰	۰/۵۹۹	۰/۶۶۰	۱/۱۰
۱۰	۱/۶۹۸	۰/۵۸۹	۰/۶۵۳	۱/۱۱
۲۰	۱/۷۲۷	۰/۵۷۹	۰/۶۴۶	۱/۱۱
۳۰	۱/۷۵٤	۰/۵۷۰	۰/۶۳۷	۱/۱۲
٤۰	۱/۷۸۱	۰/۵۶۲	۰/۶۲۷	۱/۱۲
۵۰	۱/۸۰۶	۰/۵۵٤	۰/۶۱۵	۱/۱۱
۶۰	۱/۸۲۹	۰/۵٤۷	۰/۶۰۲	۱/۱۰
۷۰	۱/۸۵۱	۰/۵٤۰	۰/۵۸۹	۱/۰۹
۸۰	۱/۸۷۰	۰/۵۳۵	۰/۵۷۶	۱/۰۸
۹۰	۱/۸۸۷	۰/۵۳۰	۰/۵۶۵	۱/۰۷
۱۰۰	۱/۹۰۰	۰/۵۲۶	۰/۵۵۵	۱/۰۵
۱۱۰	۱/۹۱۱	۰/۵۲۳	۰/۵٤۶	۱/۰٤
۱۲۰	۱/۹۱۷	۰/۵۲۲	۰/۵٤۰	۱/۰۳
۱۳۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۳٤	۱/۰۳
۱٤۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۹	۱/۰۲
۱۵۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۵	۱/۰۱
۱۶۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۲	۱/۰۰
۱۷۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۹	۱/۰۰
۱۸۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۷	۰/۹۹
۱۹۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۵	۰/۹۹
۲۰۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۳	۰/۹۹

جدول ۱-۹: کنترل کمیتگی ستون با فولاد **ST52** مطابق آئین‌نامه **EN 1993-1-2** در دمای ۵۳۸°C

لاغری ستون ($\bar{\lambda}$)	F.S.	1/F.S.	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C (α)	$\beta = \alpha \times F.S.$
۰	۱/۲۷۰	۰/۷۹۹	۰/۶۱۰	۱/۱۰
۱۰	۱/۷۰۵	۰/۵۸۷	۰/۶۵۴	۱/۱۲
۲۰	۱/۷۲۹	۰/۵۷۵	۰/۶۴۸	۱/۱۳
۳۰	۱/۷۷۲	۰/۵۶۴	۰/۶۴۰	۱/۱۳
۴۰	۱/۸۰۳	۰/۵۵۵	۰/۶۳۱	۱/۱۴
۵۰	۱/۸۴۲	۰/۵۴۶	۰/۶۱۹	۱/۱۳
۶۰	۱/۸۵۸	۰/۵۴۸	۰/۶۰۵	۱/۱۲
۷۰	۱/۸۸۰	۰/۵۳۲	۰/۵۹۱	۱/۱۱
۸۰	۱/۸۹۸	۰/۵۲۷	۰/۵۷۷	۱/۰۹
۹۰	۱/۹۱۱	۰/۵۲۳	۰/۵۶۴	۱/۰۸
۱۰۰	۱/۹۱۸	۰/۵۲۱	۰/۵۵۳	۱/۰۶
۱۱۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۴۴	۱/۰۴
۱۲۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۳۷	۱/۰۳
۱۳۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۳۱	۱/۰۲
۱۴۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۶	۱/۰۱
۱۵۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۲	۱/۰۰
۱۶۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۹	۱/۰۰
۱۷۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۶	۰/۹۹
۱۸۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۴	۰/۹۹
۱۹۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۲	۰/۹۸
۲۰۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۰	۰/۹۸

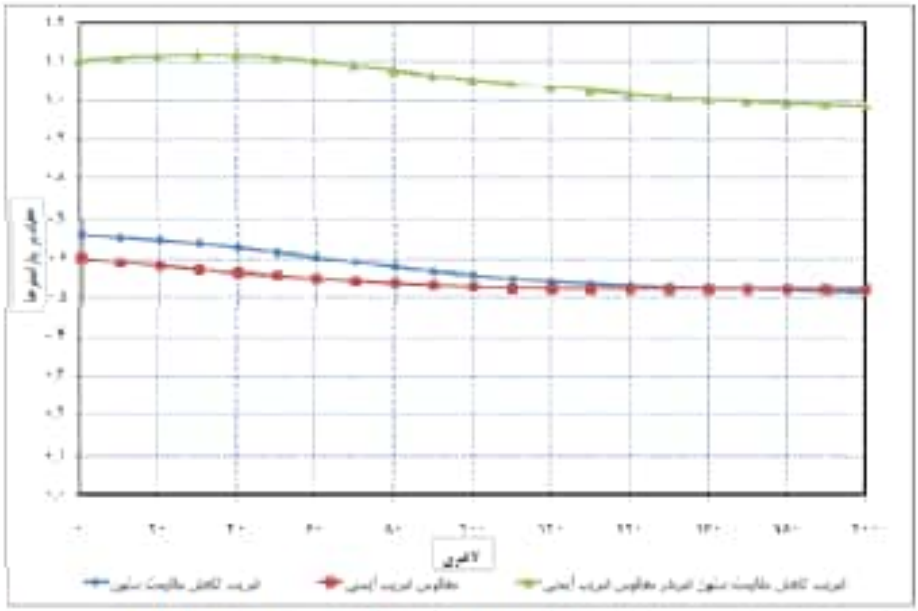
جدول ۱-۱۰: کنترل کمیتگی ستون با فولاد **ST37** مطابق آئین‌نامه **AISC 360** در دمای ۵۳۸°C

لاغری ستون (λ)	F.S.	1/F.S.	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C (α)	$\beta = \alpha \times F.S.$
۰	۱/۶۷۰	۰/۵۹۹	۰/۶۶۰	۱/۱۰
۱۰	۱/۶۹۸	۰/۵۸۹	۰/۶۵۰	۱/۱۰
۲۰	۱/۷۲۷	۰/۵۷۹	۰/۶۴۱	۱/۱۱
۳۰	۱/۷۵۴	۰/۵۷۰	۰/۶۳۱	۱/۱۱
۴۰	۱/۷۸۱	۰/۵۶۲	۰/۶۲۲	۱/۱۱
۵۰	۱/۸۰۶	۰/۵۵۴	۰/۶۱۴	۱/۱۱
۶۰	۱/۸۲۹	۰/۵۴۷	۰/۶۰۳	۱/۱۰
۷۰	۱/۸۵۱	۰/۵۴۰	۰/۵۹۴	۱/۱۰
۸۰	۱/۸۷۰	۰/۵۳۵	۰/۵۸۵	۱/۰۹
۹۰	۱/۸۸۷	۰/۵۳۰	۰/۵۷۷	۱/۰۹
۱۰۰	۱/۹۰۰	۰/۵۲۶	۰/۵۶۸	۱/۰۸
۱۱۰	۱/۹۱۱	۰/۵۲۳	۰/۵۶۰	۱/۰۷
۱۲۰	۱/۹۱۷	۰/۵۲۲	۰/۵۵۱	۱/۰۶
۱۳۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۴۳	۱/۰۴
۱۴۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۳۵	۱/۰۳
۱۵۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۷	۱/۰۱
۱۶۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۹	۱/۰۰
۱۷۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۲	۰/۹۸
۱۸۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۰۴	۰/۹۷
۱۹۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۴۹۶	۰/۹۵
۲۰۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۴۸۹	۰/۹۴

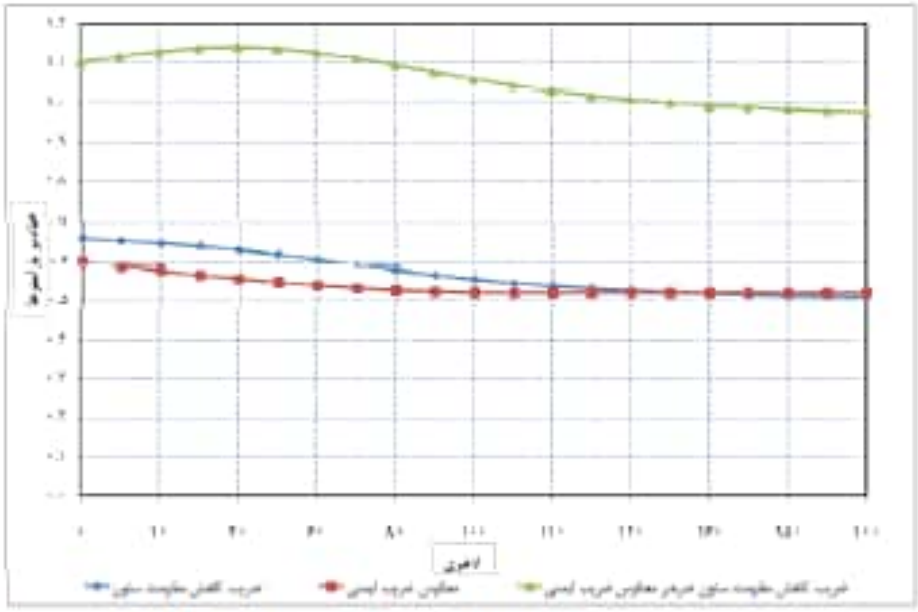
جدول ۱-۱۱: کنترل گسیختگی ستون با فولاد **ST52** مطابق آئین‌نامه **AISC 360** در دمای ۵۳۸°C

لاغری ستون (λ)	F.S.	1/F.S.	ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C (α)	$\beta = \alpha \times F.S.$
۰	۱/٦٧۰	۰/۵۹۹	۰/٦٦۰	۱/۱۰
۱۰	۱/۷۰۵	۰/۵۸۷	۰/٦٤٨	۱/۱۰
۲۰	۱/۷۲۹	۰/۵۷۵	۰/٦۳٦	۱/۱۱
۳۰	۱/۷۷۲	۰/۵٦٤	۰/٦۲۵	۱/۱۱
٤۰	۱/۸۰۳	۰/۵۵۵	۰/٦۱۳	۱/۱۱
۵۰	۱/۸۳۲	۰/۵٤٦	۰/٦۰۲	۱/۱۰
٦۰	۱/۸۵۸	۰/۵۳۸	۰/۵۹۱	۱/۱۰
۷۰	۱/۸۸۰	۰/۵۳۲	۰/۵۸۰	۱/۰۹
۸۰	۱/۸۹۸	۰/۵۲۷	۰/۵۷۰	۱/۰۸
۹۰	۱/۹۱۱	۰/۵۲۳	۰/۵۵۹	۱/۰۷
۱۰۰	۱/۹۱۸	۰/۵۲۱	۰/۵٤۹	۱/۰۵
۱۱۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۳۹	۱/۰٤
۱۲۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۳۰	۱/۰۲
۱۳۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۲۰	۱/۰۰
۱٤۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۱۰	۰/۹۸
۱۵۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/۵۰۱	۰/۹٦
۱٦۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/٤۹۲	۰/۹٤
۱۷۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/٤۸۳	۰/۹۳
۱۸۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/٤۷٤	۰/۹۱
۱۹۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/٤٦٦	۰/۸۹
۲۰۰	۱/۹۲۰	۰/۵۲۱	۰/٤۵۷	۰/۸۸

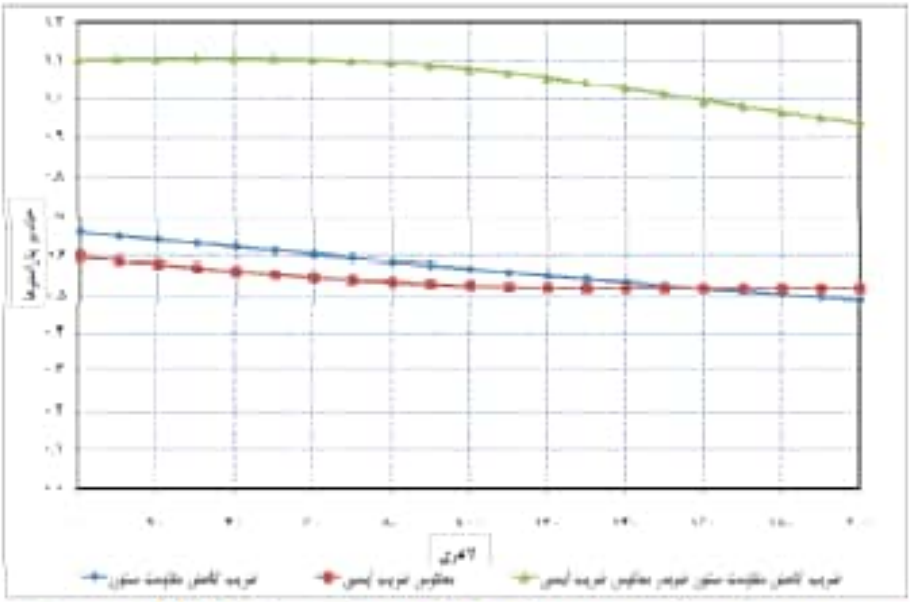
همچنین نتایج به دست آمده به صورت نمودار در شکل‌های ۱-۱۰ تا ۱-۱۳ نمایش داده شده است.



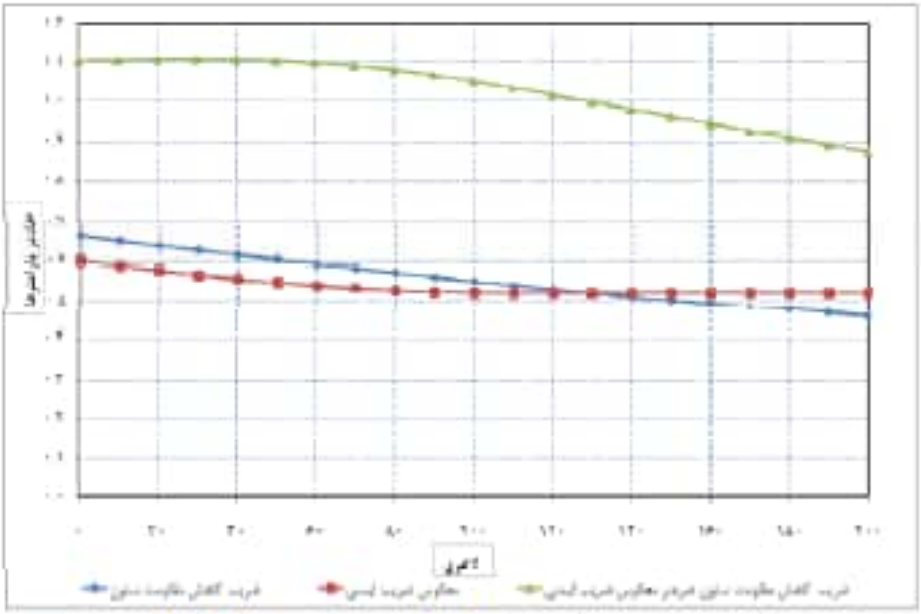
شکل ۱-۱۰: کنترل گسیختگی متون با فولاد **ST37** مطابق آئین‌نامه **EN 1993-1-2** در دمای **۵۳۸°C**



شکل ۱-۱۱: کنترل گسیختگی متون با فولاد **ST52** مطابق آئین‌نامه **EN 1993-1-2** در دمای **۵۳۸°C**



شکل ۱-۱۲: کنترل کمیختگی ستون با فولاد **ST37** مطابق آئین‌نامه **AISC 360** در دمای **۵۳۸°C**



شکل ۱-۱۳: کنترل کمیختگی ستون با فولاد **ST52** مطابق آئین‌نامه **AISC 360** در دمای **۵۳۸°C**

از جداول ۱-۸ و ۱-۹ و شکل‌های ۱-۱۰ و ۱-۱۱ که مطابق آئین‌نامه EN 1993-1-2 به دست آمده است، دیده می‌شود که مقدار 1/F.S. و ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C نزدیک به یکدیگر بوده، به عبارت دیگر مقدار پارامتر β نزدیک به ۱ می‌باشد، بنابراین دمای ۵۳۸°C می‌تواند تعریف مناسبی برای دمای بحرانی ستون فولادی باشد که البته این دما برای لاغری‌های پایین، مقداری محافظه‌کارانه نیز می‌باشد.

از جدول ۱-۱۰ و شکل ۱-۱۲ که مطابق آئین‌نامه AISC 360 برای فولاد ST37 محاسبه شده است، دیده می‌شود که مقدار 1/F.S. و ضریب کاهش مقاومت ستون در دمای ۵۳۸°C نزدیک به هم بوده به عبارت دیگر مقدار پارامتر β نزدیک به ۱ می‌باشد بنابراین دمای ۵۳۸°C می‌تواند تعریف مناسبی برای دمای بحرانی ستون فولادی باشد که البته به جز در لاغری‌های خیلی بالا که در عمل به ندرت با آن مواجه هستیم، این دما مقداری محافظه‌کارانه نیز می‌باشد.

از جدول ۱-۱۱ و شکل ۱-۱۳ که مطابق آئین‌نامه AISC 360 برای فولاد ST52 محاسبه شده است، دیده می‌شود که روند مشابه فولاد ST37 بوده ولی در لاغری‌های خیلی بالا، افت مقاومت ستون از حاشیه ایمنی طراحی بیشتر تجاوز می‌کند. البته باید در نظر داشت که در صنعت ساختمان ایران، فولاد غالب مورد استفاده، فولاد ST37 می‌باشد.

همچنین قابل ذکر است که به دلایل مختلف از جمله دلایل زیر، حاشیه ایمنی در ایران بزرگتر از آنچه در این مطالعه مورد نظر قرار گرفته، می‌باشد؛ به بیان دیگر، دمای بحرانی ستون فولادی می‌تواند از دمای ۵۳۸°C نیز تجاوز کند:

۱- با توجه به اینکه تغییرات مقطع پروفیل‌های فولادی موجود در بازار، پیوسته نبوده و برای طراحی یک ستون فولادی به منظور تحمل بارهای ثقلی وارده، لازم است ضریب

اطمینان آئین‌نامه رعایت شود، به ندرت با این حالت مواجه هستیم که برای ضریب اطمینان آئین‌نامه، بتوان یک پروفیل فولادی دقیقاً با خصوصیات مورد نیاز پیدا نمود و غالباً مجبور به استفاده از پروفیل‌های فولادی قوی‌تر از حد نیاز هستیم. بنابراین در عمل، ضریب اطمینان ستون بزرگتر از ضریب اطمینان آئین‌نامه است که در محاسبات این مطالعه مورد نظر قرار گرفته است.

۲- همزمانی وقوع زلزله یا طوفان شدید و آتش‌سوزی در ساختمان بسیار بعید است. در این مطالعه، ضریب اطمینان در نظر گرفته شده مربوط به تحمل بارهای ثقلی توسط ستون است. بنابراین اگر ستونی علاوه بر تحمل بارهای ثقلی برای تحمل زلزله یا طوفان نیز طراحی شده باشد، ضریب اطمینان این ستون برای تحمل فقط بارهای ثقلی بزرگتر از ضریب اطمینانی است که در محاسبات این مطالعه مد نظر قرار گرفته است.

در ارزیابی ستون‌های فولادی یک ساختمان موجود، می‌توان با توجه به مشخصات هندسی و مکانیکی هر ستون و بارهای ثقلی وارد به آن، مقدار ضریب اطمینان (F.S.) ستون در تحمل بارها را محاسبه کرده و بر اساس آن و به کمک روابط ارائه شده در این مطالعه، دمای بحرانی آن ستون را تعیین کرد. در این حالت، در یک ساختمان موجود، احتمالاً با ستون‌هایی مواجه خواهیم شد که دارای دماهای بحرانی متفاوتی هستند.

اکنون دمای بحرانی یک ستون فولادی موجود تعیین می‌شود، صرفنظر از این که، ستون چگونه و بر اساس چه آئین‌نامه‌ای طراحی شده است. بنابراین می‌توان نوشت:

(۱-۲٤) (مقاومت ستون در دمای متعارف/بار وارد به ستون) = (Ratio)

(۱-۲۵) مقاومت ستون در دمای T ≥ بارهای وارد به ستون در دمای T :گسیختگی

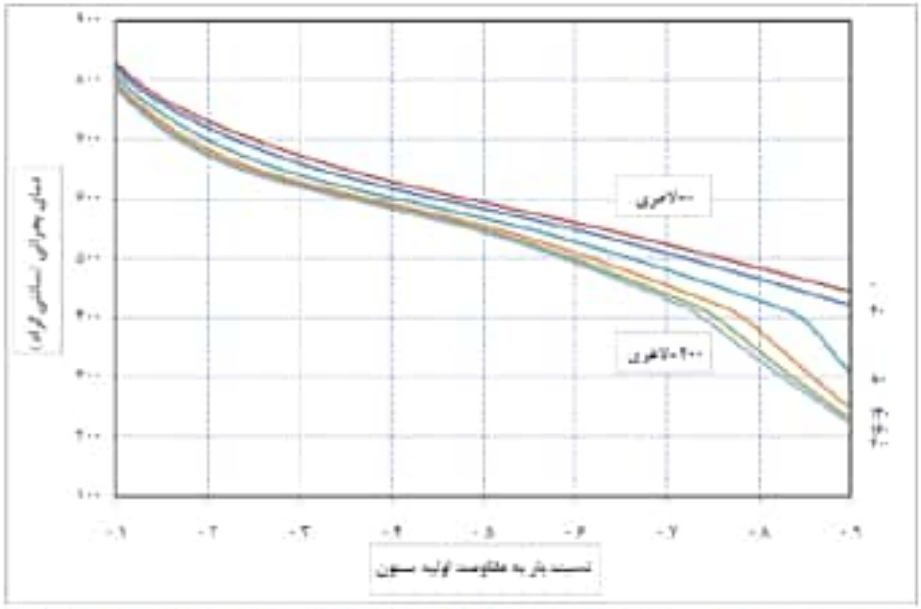
ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما×مقاومت ستون در دمای متعارف ≥ مقاومت ستون در دمای متعارف×(Ratio) (۲۶–۱)

(Ratio) ≤ ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما تا T (۲۷–۱)

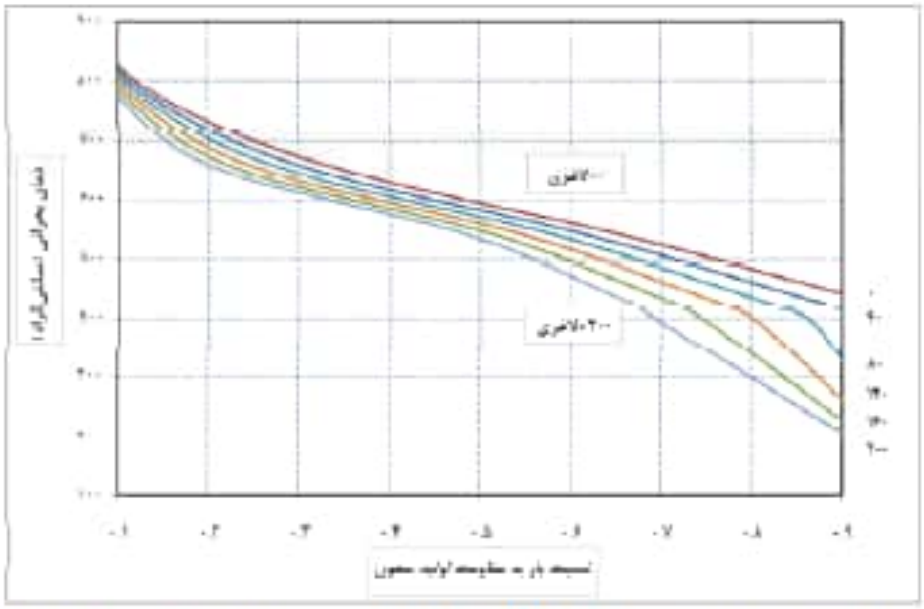
(Ratio) = ضریب کاهش مقاومت ستون در اثر افزایش دما تا T_{cr} (۲۸–۱)

T_{cr} :دمای بحرانی

اکنون با توجه به رابطه (۱–۲۸)، دمای بحرانی ستون با فولاد ST37 را در حالت‌های مختلف بر اساس آئین‌نامه‌های EN 1993-1-2 و AISC 360 محاسبه می‌کنیم و نتایج را به ترتیب در شکل‌های ۱–۱٤ و ۱–۱۵ نشان می‌دهیم.



شکل ۱–۱٤: دمای بحرانی ستون با فولاد **ST37** برای لاغری‌ها و نسبت‌های مختلف بار فشاری وارده به مقاومت اولیه ستون مطابق با آئین‌نامه **EN 1993-1-2**



شکل ۱-۱۵: دمای بحرانی ستون با فولاد **ST37** برای لاغری‌ها و نسبت‌های مختلف بار فشاری وارده به مقاومت اولیه ستون مطابق با آئین‌نامه **AISC 360**

با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۱-۱٤ و ۱-۱۵، می‌توان دمای بحرانی هر ستون را با توجه به لاغری آن و نسبت بار وارده به مقاومت اولیه ستون تعیین کرد و سپس ضخامت مناسب پوشش محافظت‌کننده در مقابل حریق انتخابی را بدست آورد. مراحل انجام کار به طور خلاصه در زیر لیست شده است:

۱- انتخاب ستون؛

۲- تعیین لاغری ستون؛

۳- تعیین نسبت بار وارده به مقاومت اولیه ستون؛

٤- تعیین دمای بحرانی ستون بر اساس منحنی‌های ترسیم شده بر اساس آئین‌نامه EN 1993-1-2 یا AISC 360 (شکل‌های ۱-۱٤ و ۱-۱۵)؛

۵- تعیین زمان مورد نیاز مقاومت ستون در برابر آتش مطابق آئین‌نامه محافظت در برابر حریق مورد استناد؛

۶- انتخاب نوع پوشش محافظت‌کننده ستون؛

۷- تعیین ضخامت پوشش محافظت‌کننده مطابق جداول تهیه شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی.

یک نمونه جدول تهیه شده برای یک پوشش محافظت‌کننده در مقابل آتش با حذف نام تولیدکننده، در شکل زیر نشان داده شده است.

جدول ۱-۱۲: یک نمونه جدول ضخامت ماده محافظت کننده در برابر حریق برای زمان‌های مختلف مقاومت در برابر آتش و ضریب مقطع مختلف ستون فولادی با مقطع **I** و **H** شکل برای یک دمای بحرانی مشخص

Thickness (mm)						
Critical Temperature=550°C						
Section Factor (1/m)	Time (min)					
	30	60	90	120	150	180
120	14	14	20	27	34	41
130	14	14	21	28	35	42
140	14	15	22	29	36	43
150	14	16	22	29	36	43
160	14	16	23	30	37	44
170	14	16	23	31	38	45
180	14	17	24	31	38	45
190	14	17	24	31	39	46
200	14	17	25	32	39	46
210	14	18	25	32	39	47
220	14	18	25	33	40	47
230	14	18	26	33	40	47
240	14	18	26	33	40	48
250	14	19	26	33	41	48
260	14	19	26	34	41	48
270	14	19	26	34	41	49
280	14	19	27	34	41	49
290	14	19	27	34	42	49
300	14	19	27	34	42	49
310	14	20	27	35	42	50
320	14	20	27	35	42	50
330	14	20	27	35	42	50
340	14	20	28	35	43	50

در این روش، پوشش محافظت‌کننده در هنگام آتش‌سوزی موجب ایجاد یک تاخیر زمانی در رسیدن دمای ستون فولادی به دمای بحرانی آن (گسیختگی ستون) می‌شود.

این تاخیر زمانی، برابر نرخ زمان مقاومت مورد نیاز ستون در مقابل آتش است که مطابق مبحث سوم مقررات ملی ساختمان و یا هر مرجع معتبر دیگر تعیین می‌شود.

۱-٤ هدف و دامنه پژوهش

هدف از تهیه این مجموعه، تهیه استانداردها، روش‌های کار و آیین‌نامه‌های مورد نیاز برای کنترل پوشش‌های محافظت‌کننده در برابر آتش به عنوان پشتیبان مبحث سوم مقررات ملی ساختمان و صدور گواهی‌نامه فنی برای آنها می‌باشد.

گواهی‌نامه فنی در یک جمله کوتاه، تطبیق محصول یا سیستم ساختمانی مورد نظر با الزامات مقررات و آیین‌نامه‌های ساختمانی است، به گونه‌ای که نشان دهد محصول مورد بررسی، الزامات اساسی برای کاربرد مورد نظر را در دوره بهره‌برداری برآورده می‌سازد، به شرطی که طراحی و ساخت بر اساس اصول صحیح و مقررات صورت گرفته و محصول مورد نظر بر اساس دستورالعمل‌ها و روش‌های صحیح اجرا شده باشد.

همان گونه که بیان شد، یکی از الزامات مهم در طرح و اجرای ساختمان‌ها، تأمین مقاومت لازم در برابر آتش برای اجزای سازه است، به گونه‌ای که دمای سازه بر اثر حرارت به مقدار بحرانی نرسیده و از شکست سازه به علت افزایش دما جلوگیری شود. تعریف لازم برای دمای بحرانی برای ستون‌های فولادی در بالا ارائه شد. مدت زمان لازم برای مقاومت سازه در برابر آتش بستگی به مشخصات ساختمان و آیین‌نامه مرجع دارد که در مبحث سوم مقررات ملی ساختمان ارائه شده است.

در مطالب بالا نشان داده شد، برای ستون فولادی و با طراحی بر اساس آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ای (مانند مبحث دهم مقررات ملی ساختمان)، به طور کلی دماهای حدود

۵۵۰ درجه سلسیوس، دمای بحرانی محسوب می‌شود. این در حالی است که دمای آتش‌سوزی معمولاً بسیار بیشتر بوده، بنابراین برای رسیدن به مقاومت لازم در برابر آتش، لازم است تا از پوشش‌های محافظت‌کننده استفاده شود. برای این منظور، نیاز است تا پوشش محافظ خود از مشخصات مناسب برای این هدف برخوردار باشد؛ از جمله می‌توان به نارسانایی حرارتی مناسب، چسبندگی به سطح زیر کار در دمای معمولی و در دمای بالا، عدم ایجاد خوردگی در سطح زیر کار، دارا بودن وزن مناسب و حتی‌الامکان سبک و مقاومت‌های مکانیکی مناسب را نام برد. همچنین لازم است تا حداقل ضخامت مورد نیاز برای رسیدن به مقاومت‌های مورد نظربرای ضرایب مقطع مختلف دریک جدول طراحی ضخامت تأیید شده، مشخص شده باشد.

در این مجموعه، روش‌های ارزیابی و تهیه جدول ضخامت برای پوشش‌های محافظت‌کننده در برابر آتش از نوع معدنی پاششی (که تقریباً مهم‌ترین نوع پوشش‌های اصطلاحاً ضد حریق محسوب می‌شوند) ارائه می‌شود. این جداول شامل چهار پارامتر ضریب مقطع، دمای طراحی، مدت زمان رسیدن به آن دمای طراحی و ضخامت پوشش محافظت‌کننده می‌باشد که با انتخاب سه پارامتر، پارامتر چهارم از آن قابل استخراج است. این جداول چارچوب اصلی یک مدرک گواهی‌نامه فنی برای پوشش را تشکیل می‌دهند که طراحان بر اساس آن می‌توانند ضخامت مورد نیاز برای اجرای پوشش بر روی مقاطع فولادی مورد نظر را تعیین کنند. بدیهی است که جزئیات اجرایی که جدول بر آن اساس به دست آمده، نیز باید به صورت کامل مشخص باشد. سپس راهنمای گواهی‌نامه فنی برای این محصولات ارائه می‌شود که علاوه بر جداول طراحی ضخامت، شامل مشخصات فنی متعدد می‌باشد. تنها برای مثال می‌توان چگالی، مقاومت فشاری، چسبندگی، نفوذپذیری بخار آب، دوام در برابر شرایط محیطی و مشخصات

دیگر را نام برد. برخی از این مشخصات جنبه الزامی داشته و معیارهای ارزیابی برای آنها موجود است. برخی دیگر جنبه اطلاعات طراحی داشته و بر حسب الزامات پروژه ممکن است مورد استفاده قرار گیرند.

موضوع مهم دیگر، نحوه کنترل این پوشش‌ها در حین اجرا در کارگاه ساختمانی است. برای این موضوع نیز یک آیین‌کار استاندارد در این مجموعه تدوین و ارائه شده است.