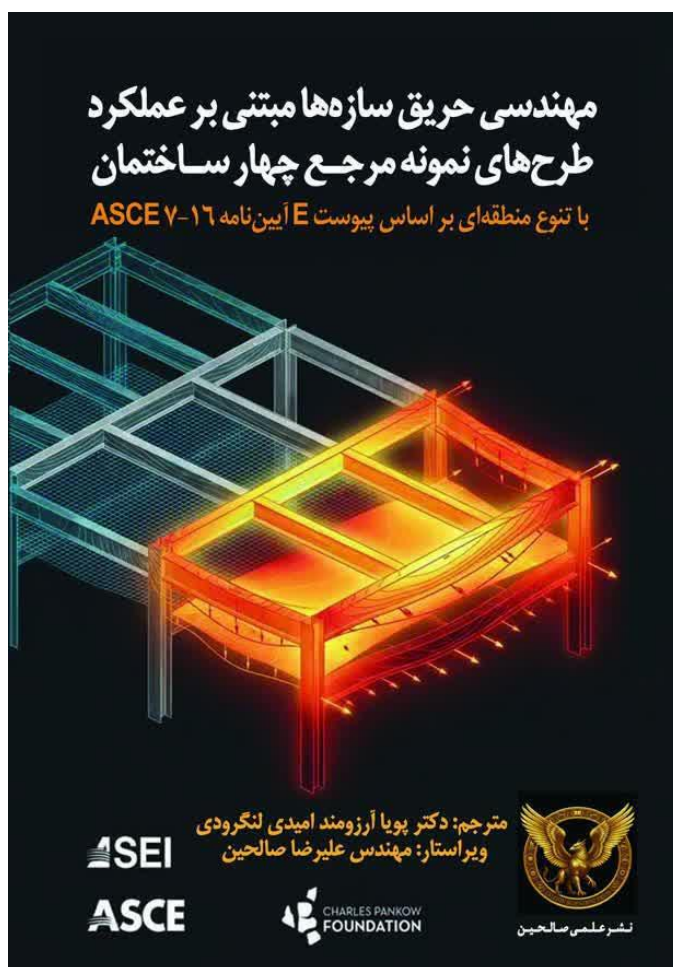


طراحی سازه‌های مبتنی بر عملکرد در برابر حریق

نمونه طراحی چهار ساختمان متنوع منطقه‌ای با استفاده از پیوست E
استاندارد ۷-۱۶ ASCE



مترجم: دکتر پویا آرزومند امیدیه لنگرودی

ویراستار: مهندس علیرضا صالحین



نشر علمی صالحین

نام کتاب: طراحی سازه‌ای مبتنی بر عملکرد در برابر حریق

نمونه طراحی چهار ساختمان متنوع منطقه‌ای با استفاده از پیوست E استاندارد ۷-۱۶ ASCE

مؤلف: انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE)

مترجم: دکتر پویا آرزومند امید لنگرودی

ویراستار: مهندس علیرضا صالحین

سال چاپ: ۱۴۰۴

نوبت چاپ: اول

شمارگان: ۱۰۰

بها: ۴۰۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۸۹۵۵۳-۷-۷

حق چاپ برای نشر علمی صالحین محفوظ می‌باشد

نشانی مرکز پخش: تهران، خیابان انقلاب، روبروی در اصلی دانشگاه، پاساژ فروزنده، طبقه اول

واحد ۴۱۹ تلفن: ۰۹۱۲۴۸۸۶۴۹۸ - ۸۸۲۸۳۶۹۸ - ۶۶۹۶۸۶۱۴ - ۰۹۱۲۵۰۱۰۰۳

عنوان و نام پدیدآور	طراحی سازه‌ای مبتنی بر عملکرد در برابر حریق نمونه چهار ساختمان متنوع منطقه A با استفاده از پیوست E استاندارد ASCE 61-7 مؤلف انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) مترجم پویا آرزومند امید لنگرودی، ویراستار علیرضا صالحین.
مشخصات نشر	نشر علمی صالحین ۱۴۰۴.
مشخصات ظاهری	۲۲۲ ص، مصور، جدول، نمودار.
شابک	978-622-89553-7-7
وضعیت فهرست نویسی	فیا
یادداشت	عنوان اصلی: Performance-Based Structural Fire Design: Exemplar Designs of Four Regionally Diverse Buildings using ASCE 7-16, Appendix E.
یادداشت موضوع	کتابنامه: ص. ۲۲۲. ساختمان‌های ضد آتش -- استانداردها -- ایالات متحده Building, Fireproof -- Standards -- United States ساختمان‌های ضد آتش -- طراحی Building, Fireproof -- Design سازه‌های بتنی -- آزمایش‌های اشتعال‌پذیری Concrete structures -- Fire testing* بتن -- آزمایش‌های اشتعال‌پذیری Concrete -- Fire Testing
شناسه افزوده	آرزومند امید لنگرودی، پویا، ۱۳۷۱-، مترجم
شناسه افزوده	صالحین، علیرضا، ۱۳۶۵-، ویراستار
شناسه افزوده	انجمن مهندسان راه و ساختمان آمریکا
شناسه افزوده	American Society of Civil Engineers
رده بندی کنگره	TH۱۰۶۵
رده بندی دیویی	۶۹۳/۸۲
شماره کتابشناسی ملی	۱۰۴۳۱۷۹۳
اطلاعات رکورد کتابشناسی	فیا

میثاق‌نامه حقوقی مالکیت فکری و شرایط بهره‌برداری انتشارات علمی صالحین (حق نشر (Copyright) ۱۴۰۴ ©)

ماده ۱: تعاریف و دامنه شمول اثر

۱-۱. تعریف اثر: این اثر شامل، اما نه محدود به، کلیه متون، نگاره‌ها، تصاویر، نمودارها، جداول، داده‌نماها (اینفوگرافیک)، طرح جلد، صفحه‌آرایی (Layout)، تایپوگرافی، کدهای منبع (در نسخه‌های دیجیتال)، فراداده‌ها (Metadata) و ساختار سازماندهی محتوا می‌باشد.

۱-۲. دامنه حقوق: کلیه حقوق (Economic Rights) ناشی از پدیدآوردن این اثر، شامل حق تکثیر، نشر، پخش، عرضه، اجرا، ترجمه، اقتباس و بهره‌برداری در هر فرمت (چاپی، صوتی، تصویری، الکترونیکی) و در هر بستر (فیزیکی، سایبری، متاورس) که اکنون موجود است یا در آینده ابداع گردد، به موجب قراردادهای معتبر قانونی، به صورت انحصاری، مطلق و غیرقابل رجوع به «انتشارات علمی صالحین (که از این پس «ناشر» نامیده می‌شود)» تعلق دارد.

۱-۳. حقوق معنوی: حقوق معنوی اثر، طبق ماده ۴ «قانون حمایت حقوق مؤلفان، مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸»، برای پدیدآوردندگان محفوظ است؛ لکن حق انحصاری صیانت از این حقوق و پیگرد قانونی هرگونه تحریف، تغییر یا آسیب به تمامیت اثر، به ناشر تفویض گردیده است.

ماده ۲: ماهیت حقوقی تملک و بهره‌برداری

۲-۱. تفکیک مالکیت (در نسخ چاپی): خرید نسخه فیزیکی این اثر، صرفاً موجب انتقال مالکیت بر «عین کالا» (صفحات و جلد) مطابق با عقد بیع در قانون مدنی می‌گردد. این خرید، هیچ‌گونه حقی نسبت به مالکیت محتوا، حق تکثیر، یا بهره‌برداری تجاری از آن برای خریدار ایجاد نمی‌نماید. قاعده «استفاده منصفانه» یا «مالکیت نسخه» مجوزی برای اسکن، فتوکپی یا تبدیل نسخه فیزیکی به دیجیتال نیست.

۲-۲. پروانه بهره‌برداری (در نسخ دیجیتال): دریافت، دانلود یا دسترسی به نسخه الکترونیکی این اثر، به منزله «بیع» نیست؛ بلکه اعطای یک «پروانه بهره‌برداری» (License Agreement) با ویژگی‌های زیر است:

الف) شخصی: فقط مختص شخصی است که هزینه را پرداخت کرده یا حساب کاربری به نام اوست.

ب) محدود: محدود به مطالعه و استفاده متعارف.

ج) غیرانحصاری و غیرقابل انتقال: کاربر حق فروش، اجاره، هدیه واگذاری لایسنس یا اشتراک‌گذاری حساب کاربری خود با اشخاص ثالث را

ندارد.

ماده ۳: ممنوعیت‌های صریح و نقض کپی‌رایت

هرگونه فعل یا ترک فعلی که منجر به نقض حقوق انحصاری ناشر گردد، مستند به مواد ۲۳، ۲۴ و ۲۵ «قانون حمایت حقوق مؤلفان» و مواد ۶۱ و ۷۴ «قانون تجارت الکترونیکی»، جرم تلقی شده و علاوه بر جبران کامل خسارات وارده (اعم از مادی و معنوی و افت منافع)، موجب پیگرد کیفری (حبس و جزای نقدی) خواهد بود. مصادیق نقض شامل موارد زیر است (حصری نیست):

۳-۱. بازتولید غیرمجاز: هرگونه عکس‌برداری، اسکن، فتوکپی، ضبط صوتی (روخوانی متن)، بازنویسی دستی یا تایپی و ذخیره‌سازی در پایگاه‌های

داده.

۳-۲. توزیع شبکه: بارگذاری (Upload) اثر در وبسایت‌ها، فضای ابری (Cloud)، شبکه‌های اجتماعی (تلگرام، اینستاگرام و...)، سامانه‌های اشتراک فایل (Torrent/P2P) و اینترنت‌های سازمانی.

۳-۳. آثار اشتقاقی و تبدیلی: هرگونه ترجمه، تلخیص، خلاصه‌نویسی، تبدیل به نمایشنامه، فیلم‌نامه، محتوای آموزشی ویدیویی، یا تولید آثار جدید بر پایه این اثر بدون مجوز کتبی ناشر.

۳-۴. بهره‌برداری تجاری ثانویه: فروش مجدد نسخه‌های دیجیتال، اجاره دادن نسخه‌های چاپی در مقیاس تجاری (غیر از کتابخانه‌های عمومی دارای مجوز)، یا استفاده از اثر در بسته‌های آموزشی انتفاعی.

ماده ۴: هوش مصنوعی، داده‌کاوی و فناوری‌های نوین

با توجه به پیشرفت فناوری، موارد زیر صراحتاً ممنوع اعلام می‌گردد و نقض آن به منزله سرقت محتوای علمی/ادبی تلقی می‌شود:

۴-۱. داده‌کاوی (Text & Data Mining): هرگونه استخراج ماشینی متن، تحلیل خودکار داده‌ها، خزش (Crawling) و اسکرپینگ (Scraping) محتوای اثر.

۴-۲. تغذیه هوش مصنوعی: استفاده از تمام یا بخشی از این اثر به عنوان «داده ورودی» (Input Data)، «داده آموزشی» (Training Set) یا جهت «تنظیم دقیق» (Fine-tuning) هرگونه سامانه هوش مصنوعی، مدل‌های زبانی بزرگ (LLMs)، هوش مصنوعی مولد (Generative AI) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین.

ماده ۵: استثنائات قانونی

صرفاً استفاده‌هایی که مشمول ماده ۷ «قانون حمایت حقوق مؤلفان» باشد مجاز است:

نقل قول مستقیم یا غیرمستقیم از بخش‌های مختصر اثر، منحصرأ برای اهداف نقد، تحلیل، آموزش و پژوهش علمی.

شرط الزامی: در تمامی موارد فوق، ذکر کامل منبع (عنوان اثر، نام مؤلف، نام ناشر) الزامی است. عدم ذکر منبع، حتی در استفاده جزئی، سرقت

علمی (Plagiarism) محسوب می‌شود.

ماده ۶: تدابیر فنی حفاظتی (DRM) و مهندسی معکوس

در صورتی که اثر (فیزیکی یا دیجیتال) حاوی قفل‌های نرم‌افزاری و اثرمارک (Watermark)، هولوگرام یا هرگونه تدابیر حفاظتی فنی باشد:

هرگونه اقدام جهت خنثی‌سازی، شکستن قفل، کرک کردن (Crack)، مهندسی معکوس، دی‌کامپایل (Decompile) یا دور زدن این تدابیر،

طبق مواد ۷۱ تا ۷۳ قانون تجارت الکترونیکی و مواد ۲۵ تا ۲۷ قانون جرایم رایانه‌ای، جرم مستقل محسوب شده و مستوجب مجازات حبس و جریمه سنگین

است.

ماده ۷: سلب مسئولیت (Disclaimer) و حدود ضمانت

۷-۱. ماهیت محتوا: ناشر و پدیدآورندگان نهایت تلاش خود را برای صحت و دقت محتوا به کار بسته‌اند، اما هیچ‌گونه ضمانتی (صریح یا ضمنی)

مبنی بر بی‌عیب بودن، به‌روز بودن، یا تناسب محتوا برای یک هدف خاص (Fitness for a Particular Purpose) ارائه نمی‌دهند.

۷-۲. محدودیت مسئولیت: مسئولیت هرگونه استفاده از اطلاعات، دستورالعمل‌ها یا داده‌های موجود در این اثر و عواقب ناشی از آن (اعم از

خسارات مستقیم، غیرمستقیم، تبعی، جانی یا مالی) تماماً بر عهده کاربر است. سقف مسئولیت مالی ناشر در برابر کاربر در هر شرایطی، محدود به «مبلغ پرداختی

برای خرید اثر» خواهد بود.

ماده ۸: حل اختلاف و قانون حاکم

این توافق‌نامه تابع قوانین و مقررات جمهوری اسلامی ایران است. در صورت بروز هرگونه اختلاف، ناشر حق دارد حسب صلاحدید خود، موضوع را

از طریق مراجع قضایی صالح در شهر تهران (یا محل اقامتگاه قانونی ناشر) یا از طریق داوری پیگیری نماید. کاربر با تهیه این اثر، صلاحیت محلی دادگاه‌های

تهران را پذیرفته و حق اعتراض به صلاحیت را از خود سلب می‌نماید.

ماده ۹: ضمانت اجرا و جبران خسارت

کاربر متعهد می‌گردد در صورت نقض هر یک از مفاد این توافق‌نامه، کلیه خسارات وارده به ناشر (شامل زیان‌های مالی، از دست رفتن سود، لطمه به

شهرت تجاری) و تمامی هزینه‌های دادرسی و حق‌الوکاله وکیل انتخابی ناشر را بدون هیچ‌گونه قید و شرطی جبران نماید.

فهرست مطالب

بخش ۱- مروری بر طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD)

فصل ۱. مقدمه.....	۱۰
فصل ۲. رویه‌های طراحی پروژه.....	۱۸
فصل ۳. خلاصه تحلیل‌ها.....	۲۵
فصل ۴. خلاصه طراحی و بحث در مورد نتایج.....	۳۱
فصل ۵. نتایج.....	۵۷
فصل ۶. توصیه‌ها.....	۶۱
پیوست: شرح طراحی پروژه.....	۶۴
پیوست A: حریق‌های از نوع متحرک، پیوست B: روش‌های محاسبه حریق محصور، پیوست C: گستره حریق، پیوست D: خواص حرارتی SFRM، پیوست E: لیست‌های UL ارجاع‌شده، پیوست F: نمایش صریح خزش حرارتی فولاد، پیوست G: نمایش صریح خزش گذرای بتن، پیوست H: مدل‌سازی گل‌میخ‌های برشی، پیوست I: روش اجزای اتصال.	

بخش ۲- گزارش‌های تیم‌ها برای ساختمان‌های ۱ تا ۴

فصل ۷. ساختمان ۱: تشریح تحلیل تفصیلی، شرکت Heger & Simpson Gumpertz.....	۹۹
فصل ۸. ساختمان ۲: شرکت مگنوسون کلمنسیک و همکاران (MKA).....	۱۶۵
فصل ۹. ساختمان ۳: شرکت تورنتون توماسیتی (Thornton Tomasetti - TT).....	۱۹۳
فصل ۱۰. ساختمان ۴: Walter P Moore (WPM).....	۲۲۲
واژه‌نامه تخصصی.....	۲۴۶

مقدمه مترجم

حفاظت از سازه‌ها در برابر حریق و تضمین ایمنی جانی و مالی ساکنین، همواره یکی از الزامات بنیادین در مهندسی عمران بوده است. با پیچیده‌تر شدن معماری ساختمان‌های مدرن و محدودیت‌های روش‌های تجویزی (Prescriptive) در آیین‌نامه‌های سنتی، رویکرد «طراحی سازه‌ای مبتنی بر عملکرد در برابر حریق» (Performance-Based Structural Fire Design - PBSFD) دیگر یک ایده نظری نیست، بلکه به یک ضرورت مهندسی برای ارزیابی دقیق‌تر رفتار سازه و تامین ایمنی در برابر فروریزش تبدیل شده است.

کتاب حاضر که تدوین شده توسط انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) است، یکی از جامع‌ترین و کاربردی‌ترین مراجع موجود در زمینه شناخت، طراحی و مدل‌سازی رفتار سازه‌ها در برابر حریق به شمار می‌رود. وجه تمایز این اثر با سایر منابع مشابه، تمرکز دقیق آن بر گذار از تئوری به عمل، از طریق ارائه نمونه‌های جامع طراحی برای چهار ساختمان متنوع منطقه‌ای با استفاده از پیوست E استاندارد ۷-۱۶ ASCE است. در همین راستا، کتاب به بررسی مستند مفاهیم پیچیده‌ای نظیر حریق‌های متحرک (Traveling Fires)، روش‌های محاسبه حریق محصور، خزش حرارتی فولاد (Steel Thermal Creep)، خزش گذرای بتن (Concrete Transient Creep)، خواص حرارتی مواد مقاوم در برابر حریق (SFRM) و مدل‌سازی گل‌میخ‌های برشی می‌پردازد تا آسیب‌پذیری‌های کلیدی سازه شناسایی و از طریق تخصیص منطقی عایق‌ها برطرف گردند.

در فرآیند ترجمه این اثر، دغدغه اصلی بنده حفظ امانت‌داری علمی و انتقال دقیق مفاهیم تلفیقی مهندسی سازه و حریق بوده است. با توجه به ماهیت تخصصی متن، معادل‌سازی واژگان با وسواس فراوان انجام پذیرفت و به منظور تسهیل مطالعه، واژه‌نامه‌ای تخصصی در انتهای کتاب گردآوری شده است. مطالعه این مرجع به مهندسان محاسب، مشاوران ایمنی، پژوهشگران و دانشجویان تحصیلات تکمیلی توصیه می‌گردد.

در پایان، بر خود لازم می‌دانم از زحمات جناب مهندس علیرضا صالحین به عنوان ویراستار علمی اثر که بر غنای متن افزودند و همچنین از «انتشارات علمی صالحین» جهت اهتمام در چاپ کیفی این کتاب کمال تشکر را داشته باشم. با وجود تلاش‌های فراوان برای ارائه ترجمه‌ای دقیق و وفادار به متن اصلی، بروز خطاهای سهوی در آثار علمی دور از ذهن نیست. از این رو، از اساتید، پژوهشگران و دانشجویان گرامی تقاضا می‌شود نظرات، انتقادات و پیشنهادات ارزشمند خود را جهت ارتقای کیفی چاپ‌های آتی، از طریق راه‌های ارتباطی انتشارات علمی صالحین (تلفن: ۰۲۱-۸۸۲۸۳۶۹۸ و AlirezaSalehin@Gmail.com و تلگرام: @AlirezaSalehin) با ما در میان بگذارند.

دکتر پویا آرزومند امیدی لنگرودی

زمستان ۱۴۰۴

pooyaarezoomand@gmail.com

خلاصه اجرایی (چکیده)

مؤسسه مهندسی سازه (SEI) وابسته به انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE)، با حمایت «بنیاد چارلز پانکو» (CPF)، این پروژه را با هدف نمایش صریح اجرای صحیح و مزایای بالقوه «طراحی سازه در برابر حریق بر اساس عملکرد» (PBSFD) جهت محافظت سازه‌ای در برابر حریق، به عنوان جایگزینی برای روش تجویزی سنتی، توسعه داد. به‌طور خاص، PBSFD یک روش جایگزین است که امکان ارزیابی صریح عملکرد سازه را تحت شرایط واقعی حریق فراهم می‌سازد. از این‌رو، می‌توان از PBSFD برای دستیابی به اهداف و مقاصد ایمنی در برابر حریق که به صورت گسترده تعریف شده‌اند، استفاده نمود.

این پروژه شامل تحلیل چهار طرح ساختمانی با اسکلت فولادی محافظت‌شده و متنوع از نظر منطقه‌ای است که توسط تیم‌های طراحی از چهار شرکت پیشرو در مهندسی سازه انجام شده است: سیمپسون گامپرتز و هگر (SGH)، مگنوسون کلمنسیک اسوشیتس (MKA)، تورنتون توماستی (TT) و والتر پی مور (WPM). تیم‌های طراحی با همکاری نزدیک یک هیئت از مشاوران دانشگاهی از چهار مؤسسه فعالیت کردند: دانشگاه بوفالو، دانشگاه ایالتی اورگان، دانشگاه جانز هاپکینز و کالج دانشگاهی لندن (که پیش از این با دانشگاه مریلند همکاری داشت). تیم‌های طراحی و مشاوران دانشگاهی درگیر در پروژه، مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از تخصص و تجربه در جنبه‌های طراحی سازه و حریق را به اشتراک گذاشته، اطلاعات را آزادانه تبادل کرده و با هدف ارتقای دانش صنعت، در یک مشارکت صمیمانه با یکدیگر همکاری نمودند.

هر تیم طراحی، ساختمان موجود خود را برای سه سناریوی طراحی که شامل سطوح متفاوتی از اهداف عملکردی و آزادی عمل در طراحی سازه بود، مورد بازبینی قرار داد. دامنه هر تحلیل شامل تعیین مشخصات «قرارگیری در معرض حریق مهارنشده» در فضاهای ساختمان، پاسخ حرارتی مرتبطِ المان‌های سازه‌ای، و پاسخ نهایی سیستم سازه‌ای بر اساس ضوابط «پیوست E آیین‌نامه ۷-۱۶ ASCE» (بارگذاری حداقل طراحی و معیارهای مرتبط برای ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها: روش‌های طراحی بر اساس عملکرد برای آثار حریق بر سازه‌ها) (ASCE ۲۰۱۷) و بر مبنای راهنمای موجود در «مهندسی حریق در سازه، راهنمای عملی شماره ۱۳۸» (ASCE ۲۰۱۸) بود. تحلیل‌های جامع سازه‌ای، آسیب‌پذیری‌های کلیدی سیستم سازه‌ای را در برابر حریق شناسایی کردند که می‌بایست برای دستیابی به اهداف عملکردی مشخص‌شده در پیوست E آیین‌نامه ۷-۱۶ ASCE برطرف می‌گردیدند.

در چارچوب سه سناریوی طراحی در نظر گرفته شده، هر تیم طراحی طرح‌هایی را توسعه داد که در آن‌ها با تخصیص منطقی عایق‌های محافظ و اعمال تقویت‌های سازه‌ای جزئی (در صورت لزوم)، عملکرد سازه‌ای مقاوم و مستحکم تحت شرایط تعریف‌شده حریق تأمین گردید. با بررسی این سه سناریوی طراحی، هر تیم ارزش مشارکت مهندسی سازه را در مراحل اولیه طراحی ایمنی حریق ساختمان به اثبات رساند. تأیید عملکرد در برابر حریق، به‌ویژه برای ساختمان‌هایی با پیامدهای سنگین شکست، نظیر ساختمان‌های با تصرف بالا یا ساختمان‌های حیاتی و یا برای سازه‌هایی با قاب‌بندی غیرمتداول یا مسیرهای انتقال بار پیچیده، حائز اهمیت است. نتایج تحلیل‌های سازه‌ای و تقویت‌های سازه‌ای مورد نیاز، برای هر ساختمان به‌صورت منحصربه‌فرد است و بنابراین نمی‌توان آن‌ها را به تمام ساختمان‌ها تعمیم داد. از این‌رو، برای دستیابی به اهداف عملکردی خاص با استفاده از روش PBSFD، تخصص مهندسی سازه به صورت پروژه-محور مورد نیاز است.

در مجموع، این طرح‌های نمونه، مهم‌ترین مزیت روش PBSFD را برای ذی‌نفعان پروژه ساختمان‌های جدید (از جمله مقامات ساختمان، بازرسان آتش‌نشانی (Fire Marshals) یا مرجع قانونی دارای صلاحیت (AHJ) مناسب برای تایید نهایی) نشان می‌دهند؛ این مزیت عبارت است از اینکه این روش، فرآیندی صریح را برای تایید عملکرد سیستم سازه‌ای در شرایط قرارگیری در معرض حریق فراهم می‌کند. از آنجا که PBSFD می‌تواند ملاحظات طراحی سازه و طراحی محافظت در برابر حریق را به‌صورت توأمان در نظر بگیرد، این روش پتانسیل تأثیرگذاری بر جنبه‌های متعدد یک پروژه، از جمله مسائل اقتصادی را برای بسیاری از انواع ساختمان‌ها داراست.

این راهنما در دو بخش سازماندهی شده است. بخش اول (Part I) شامل مروری بر متدولوژی PBSFD و همچنین شرحی از رویه‌های طراحی این پروژه است که در ادامه با خلاصه‌ای از تحلیل‌ها، نتایج و نتیجه‌گیری‌های هر «تیم طراحی» همراه می‌شود. «پیوست A» از بخش اول، شامل متن کامل «شرح مبانی طراحی» (Design Brief) است که تیم‌های طراحی از آن پیروی کرده‌اند. بخش دوم (Part II) شامل گزارش‌های هر چهار تیم طراحی است که ارزیابی سناریوهای طراحی، از جمله روش‌های تحلیل و طراحی مورد استفاده را با جزئیات بیشتر مستند و تشریح می‌کنند.

انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE)

بخش ۱- مروری بر طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر

حریق

فصل ۱. مقدمه

مؤسسه مهندسی سازه (SEI)^۱ از انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE)، با حمایت بنیاد چارلز پانکو (CPF)^۲، در راستای چشم‌انداز خود، پیشبرد طراحی بر اساس عملکرد را دنبال کرده است. توسعه و پذیرش طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD)^۳ این پتانسیل را دارد که ضمن فراهم آوردن سطوح مشخصی از ایمنی عملکردی سازه در برابر حریق، به طراحی‌های اقتصادی‌تر و کارآمدتر برای ساختمان‌ها منجر شود. مشابه سایر حوزه‌های طراحی بر اساس عملکرد در مهندسی سازه، استفاده از روش مهندسی حریق سازه‌ای، نیازمند درک و پذیرش از سوی ذینفعان پروژه است و میزان مزایای آن در هر پروژه متفاوت خواهد بود.

آیین‌نامه‌های ساختمانی عموماً استفاده از روش‌ها و ابزارهای جایگزین را با تأیید مقام مسئول دارای صلاحیت (AHJ)^۴ مجاز می‌دانند تا امکان استفاده از روش‌ها یا مصالح نوآورانه فراهم شود. طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) یک روش جایگزین است که امکان ارزیابی صریح عملکرد سازه تحت شرایط واقع‌بینانه‌ی حریق را فراهم می‌کند. این روش برای دستیابی به اهداف کلی ایمنی در برابر حریق می‌تواند به کار گرفته شود. استاندارد ملی بارگذاری آمریکا، ASCE ۷-۱۶ تحت عنوان «حداقل بارهای طراحی و معیارهای وابسته برای ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها»، در پیوست E با عنوان «روش‌های طراحی بر اساس عملکرد برای آثار حریق بر سازه‌ها» (ASCE ۷-۱۶, Appendix E) (ASCE ۲۰۱۷)، یک چارچوب مبتنی بر عملکرد ارائه می‌دهد. این چارچوب برای ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها قابل استفاده است، همان‌طور که در بند ۱.۳.۷ استاندارد ASCE ۷-۱۶ و همچنین در بخش مربوط به روش‌های جایگزین در آیین‌نامه‌های ساختمانی مجاز شمرده شده است. مطابق بند E.۳ پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ (الزامات عمومی)، فرایندهای PBSFD شامل دو مرحله است: ارزیابی آثار حریق و ارزیابی پاسخ سازه با توجه به اهداف عملکردی تعریف‌شده.

این پروژه، کاربرد و اجرای صحیح طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) را برای چهار طرح ساختمانی موجود، ناشناس و واقع در مناطق جغرافیایی گوناگون، با استفاده از روش‌شناسی مشخص‌شده در پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ و راهنمایی‌های ارائه‌شده در نشریه شماره ۱۳۸ با عنوان «مهندسی حریق سازه‌ای»

^۱ Structural Engineering Institute

^۲ Charles Pankow Foundation

^۳ Performance-Based Structural Fire Design

^۴ Authority Having Jurisdiction

(ASCE ۲۰۱۸) به نمایش می‌گذارد. تمرکز این پروژه بر سازه‌های فولادی محافظت‌شده است؛ سازه‌های بتنی، مصالح بنایی و چوبی در دامنه این پروژه قرار ندارند. چهار تیم طراحی شرکت‌کننده در این پروژه از رویه‌ها و استراتژی‌های طراحی مختص دفتر خود استفاده کرده‌اند و این تفاوت در ارائه تحلیل‌های تفصیلی هر تیم، که در بخش دوم کتاب آمده، منعکس شده است.

۱.۱. پیشینه

الزامات طراحی تجویزی فعلی آیین‌نامه‌ها برای محافظت سازه در برابر حریق، که به آن «طراحی مقاومت در برابر حریق استاندارد» (SFRD^۵) گفته می‌شود، عملکرد سازه در حریق را به‌طور صریح ارزیابی نمی‌کند. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در مورد عملکرد سازه‌ها در دماهای بالا انجام شده است که مالکان و سایر ذینفعان پروژه می‌توانند از نتایج آن برای مدیریت کارآمد و بهبود بالقوه عملکرد در برابر حریق با استفاده از روش‌های جایگزین، مانند پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ (ASCE/SEI ۲۰۱۶)، بهره‌مند شوند.

روش طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) بر پایه کاربرد اصول مهندسی و مدل‌سازی مبتنی بر فیزیک برای دستیابی به اهداف عملکردی مشخص، به جای پیروی از قوانین تجویزی سنتی، استوار است. برخلاف طراحی تجویزی، این روش نیازمند تحلیل‌های مهندسی سازه است و این تلاش مهندسی مضاعف می‌تواند مزایای ارزشمند بسیاری به همراه داشته باشد. در حال حاضر، این روش در ایالات متحده به‌طور گسترده در عمل به کار گرفته نمی‌شود. عواملی که مانع پذیرش PBSFD در ایالات متحده شده‌اند، ممکن است شامل موارد زیر باشد: عدم درک و مشارکت کافی از سوی مهندسان سازه، کمبود طرح‌های آزمایشی که مزایای بالقوه را برای مالکان و سایر ذینفعان و عدم آشنایی مقامات کنترل ساختمان با این رویکرد را به نمایش بگذارند. این راهنمای نمونه در نظر دارد تا درک و پذیرش PBSFD را در میان ذینفعان پروژه‌های واقعی، از جمله مهندسان سازه، معماران، پیمانکاران، مالکان و مقامات کنترل ساختمان، افزایش دهد.

۱.۲. هدف پروژه

هدف این پروژه، ارتقای درک و کاربرد طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) در صنعت طراحی و ساخت‌وساز، از طریق نمایش فرآیند مهندسی و روش‌شناسی‌ها به همراه مزایای بالقوه در پروژه‌های واقعی است. قابل ذکر است که با بهبودهای سازه‌ای نسبتاً جزئی، بسیاری از سیستم‌های سازه‌ای می‌توانند برای دستیابی به اهداف عملکردی سطح بالاتر تحت سناریوی حریق کنترل‌نشده طراحی شوند. این امر عملکرد سازه‌ای شناخته‌شده و رضایت‌بخش و همچنین صرفه اقتصادی بالقوه بیشتری را در مقایسه با رویکرد تجویزی ارائه می‌دهد.

۱.۳. اهداف مشخص پروژه

برای دستیابی به هدف کلی پروژه که پیش‌تر شرح داده شد، اهداف مشخص زیر دنبال می‌شوند:

- نمایش اجرای صحیح PBSFD مطابق با پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶، با استفاده از رویکردهای توصیه‌شده

^۵ Standard Fire Resistance Design

در نشریه شماره ۱۳۸ با عنوان «مهندسی حریق سازه‌ای» (ASCE ۲۰۱۸).

- ارائه راهنمای رویه‌ای نمونه برای مجموعه‌ای از ساختمان‌ها با نمایندگی منطقه‌ای (پراکندگی جغرافیایی).
- نمایش صریح مزایای بالقوه PBSFD از طریق طرح‌های آزمایشی.
- انتقال مفاهیم کلی مربوط به پیامدهای هزینه‌ای طرح‌های آزمایشی و همچنین بحث در مورد ملاحظات اضافی مانند تأثیرات ردپای کربن و جنبه‌های زیبایی‌شناختی، در صورت امکان.

۱.۴. سناریوهای طراحی و اهداف عملکردی

برای آگاه‌سازی ذینفعان پروژه‌های واقعی از تأثیرگذارترین شیوه پیاده‌سازی PBSFD، هر تیم طراحی مجموعه‌ای از سناریوهای طراحی فرضی را بررسی کرد که از حداقل سطح تأثیرگذاری در طراحی سازه تا سطح جامعی از یکپارچه‌سازی اهداف عملکردی الزامی و اختیاری در طراحی سازه را در بر می‌گیرند و به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

- **سطح طراحی ۰ (Design ۰):** الزامات تجویزی برای عایق‌بندی طبق آیین‌نامه حاکم ساختمان. این یک رویکرد تجربی و غیرمهندسی است (که نشان‌دهنده عملکرد نامشخص است).
- **سطح طراحی ۱ (Design ۱):** سطح عایق‌بندی لازم برای برآوردن اهداف عملکردی الزامی که حداقل الزامات بند ۴.۱ پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ می‌باشند (به بخش ۲.۳.۱ مراجعه شود). این بند بر تخلیه کامل و ایمن ساکنین به معبر عمومی و توانایی قاب‌های سازه‌ای پشتیبان «نواحی امن»^۶ (در صورت وجود) برای تحمل سوخت کامل حریق بدون فروریزش تأکید دارد (به بخش ۲.۳.۲.۱ مراجعه شود). این یک رویکرد مهندسی بدون امکان اصلاح سیستم سازه‌ای است (که نشان‌دهنده حداقل عملکرد است).
- **سطح طراحی ۲ (Design ۲):** سطح عایق‌بندی لازم برای برآورده ساختن الزامات اختیاری بند ۴.۱ پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ (بخش ۲.۳.۲) به‌منظور دستیابی به سوخت کامل حریق بدون هیچ‌گونه فروریزش در سیستم سازه‌ای. این یک رویکرد مهندسی بدون امکان اصلاح سیستم سازه‌ای است (که نشان‌دهنده عملکرد بهینه است).
- **سطح طراحی ۳ (Design ۳):** سطح عایق‌بندی و اصلاحات سازه‌ای (در صورت نیاز) برای دستیابی به الزامات اختیاری سوخت کامل حریق (مشابه الزامات سطح طراحی ۲ در بخش ۲.۳.۲) بدون هیچ‌گونه فروریزش در سیستم سازه‌ای. این یک رویکرد مهندسی با امکان اصلاح سیستم سازه‌ای است (که نشان‌دهنده عملکرد بهینه است).

^۶ Refuge Areas

در عمل، عایق محافظ می‌تواند به شکل مواد پاششی الیافی یا سیمانی، پوشش‌های گچی، رنگ‌ها یا مواد اپوکسی پف‌کننده و انواع دیگر محافظت باشد. عملیات پاشش عایق محافظ روی اعضای سازه‌ای در محل (که یک عملیات ساختمانی «تر» محسوب می‌شود) معمولاً «ضدحریق‌سازی»^۷ نامیده می‌شود.

سطح طراحی ۰ نمایانگر روش سنتی تجویز عایق برای محافظت سازه در برابر حریق بدون هیچ‌گونه تحلیل سازه‌ای است. معیار پذیرش برای سطح طراحی ۰، سطح تجویزی مقاومت در برابر حریق مورد نیاز آیین‌نامه حاکم است؛ هیچ سطح عملکرد مشخصی برای آن تعریف نشده است.

سطح طراحی ۱ حالتی را نشان می‌دهد که در آن تنها حداقل اهداف عملکردی الزامی دنبال شده و حداقل سطح عملکرد مدنظر است.

سطح طراحی ۲ حالتی را نشان می‌دهد که در آن اهداف عملکردی اختیاری (فراتر از حداقل‌های الزامی) برای دستیابی به سطح عملکرد بهینه دنبال می‌شوند.

در دنیای واقعی، سطوح طراحی ۱ و ۲ معادل سناریوهایی هستند که در آنها یک «مهندس حریق سازه‌ای» در مراحل پایانی فرآیند طراحی و پس از پیشرفت قابل توجه طراحی سازه (به‌گونه‌ای که امکان تغییرات اساسی وجود ندارد) به پروژه ملحق می‌شود؛ برای مثال، در فاز تهیه «نقشه‌های اجرایی» (CD)^۸.

سطح طراحی ۳ حالتی را نشان می‌دهد که در آن مهندس حریق سازه‌ای از ابتدای طراحی سازه در پروژه مشارکت دارد (مثلاً در فاز «طراحی شماتیک» (SD)^۹) و اهداف اختیاری (فراتر از حداقل) برای دستیابی به عملکرد بهینه دنبال می‌شوند. در این حالت، مهندس حریق سازه‌ای می‌تواند بر طراحی سازه تأثیر بگذارد تا با در نظر گرفتن آثار حریق، به سطح عملکرد مطلوب دست یابد.

برای سطح طراحی ۰، هیچ تغییری در طراحی تجویزی اعمال نمی‌شود. برای سطوح طراحی ۱ و ۲، تنها عایق‌بندی سازه می‌تواند برای برآورده ساختن اهداف عملکردی حداقل یا اختیاری تغییر کند. برای سطح طراحی ۳، علاوه بر تغییرات عایق‌بندی، اصلاحات طراحی سازه نیز برای رسیدن به اهداف عملکردی اختیاری مجاز است. در هیچ‌یک از موارد، نمی‌توان برای تأمین اهداف عملکردی بر سیستم‌های آب‌پاش (اطفای حریق، آب‌پاش خودکار آتش‌نشانی) اتکا کرد؛ زیرا طبق پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ و نشریه «مهندسی حریق سازه‌ای» (MOP ۱۳۸)، باید سناریوی حریق کاملاً کنترل‌نشده فرض شود.

معیار پذیرش برای سطوح طراحی ۱، ۲ و ۳، حفظ یکپارچگی سازه‌ای است که از طریق برآورده ساختن تمامی حالات حدی سازه‌ای قابل اجرا و/یا نمایش صریح عملکرد رضایت‌بخش سازه با روش‌های دیگر (مانند شبیه‌سازی‌های المان محدود) اثبات می‌شود. در این زمینه، توانایی ذاتی یک سیستم سازه‌ای برای مقاومت در برابر حریق می‌تواند همراه با مزایای عایق حرارتی اعمال‌شده در نظر گرفته شود. برخلاف طراحی سازه متعارف، سطوح طراحی ۱، ۲ و ۳ ممکن

^۷ Fireproofing

^۸ Construction Documents

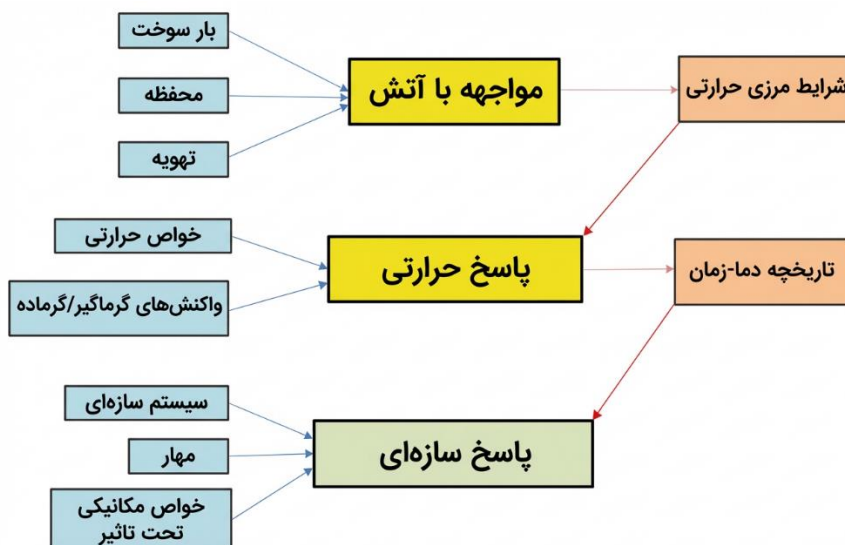
^۹ Schematic Design

است بر بازتوزیع بار یا منابع غیرمتعارف ظرفیت باربری، مانند «کنش غشایی کششی-فشاری» (*Compressive-Tensile Membrane Action*)، تکیه کنند.

۱.۵. رویکرد و الزامات عمومی

روش‌های طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) شامل مفاهیم سنتی مهندسی سازه برای ارزیابی مقاومت اعضا و اتصالات تحت بارهای وارده، و همچنین در نظر گرفتن آثار حریق مانند انبساط حرارتی مقیدشده (*restrained thermal expansion*) است. همان‌طور که در فصل ۲ نشریه «مهندسی حریق سازه‌ای» (MOP ۱۳۸) و مطابق با فلسفه بنیادی مورد استفاده در طراحی سازه‌ها توضیح داده شده، PBSFD به‌طور صریح «تقاضا» (Demand) و «ظرفیت» (Capacity) سیستم‌های سازه‌ای را تحت اثر حریق ارزیابی می‌کند (ASCE ۲۰۱۸). بنابراین، علاوه بر شناسایی اهداف عملکردی که در بخش ۱.۴ بیان شد، تطابق با بند E.۳ پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ نیازمند تعیین صحیح تقاضاهای ناشی از آثار حریق و همچنین ارزیابی ظرفیت سیستم سازه‌ای برای تحمل این آثار است. به‌طور خاص در بند E.۵ بیان شده که ارزیابی آثار حریق باید شامل کمی‌سازی بار سوخت، شناسایی حریق‌های طراحی سازه‌ای و تعیین تاریخچه زمانی دمای اعضا و اتصالات سازه‌ای باشد. همچنین در بند E.۶ تصریح شده که ارزیابی ظرفیت باید پاسخ سیستم سازه‌ای را در طول مراحل گرمایش و سرمایش متعاقب آن در حریق‌های طراحی سازه‌ای در نظر بگیرد.

برای سطوح طراحی ۱ تا ۳، هر تیم طراحی از فرآیند تحلیل کلی نشان داده شده در شکل ۱-۱ استفاده کرده است. این رویکرد تحلیلی، همان‌طور که در پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ توصیف شده، قطعی (*deterministic*) است.



شکل ۱-۱. فرآیند تحلیل مهندسی حریق سازه‌ای بر اساس عملکرد.

منبع: مهندسی حریق سازه‌ای، نشریه MOP 138 (ASCE 2018).

از آنجا که PBSFD قطعی است، هر طراحی ملزم به در نظر گرفتن چندین سناریوی حریق بود که بر سازه مورد نظر تأثیر می‌گذارند. پس از تعیین میزان مواجهه با حریق، محاسبات انتقال حرارت برای استخراج پاسخ‌های حرارتی سازه (که به صورت نمودارهای تاریخچه زمانی دما-زمان سازه نمایش داده می‌شوند) انجام می‌گردد. در نهایت، تحلیل‌های سازه‌ای بر اساس پاسخ حرارتی صورت می‌گیرد. فصل ۲ شامل جزئیات بسیار مشخصی از این فرآیند تحلیل، از جمله مرور کلی و توضیح ابزار همکاری ذینفعان که شرح طراحی نامیده می‌شود، است.

۱.۶. تیم‌های طراحی

تیم‌های طراحی این پروژه در جدول ۱-۱ نشان داده شده‌اند. هیئت مشاوران متخصص دانشگاهی به تیم‌های طراحی در جنبه‌های فنی خاصی در طول فاز طراحی مشاوره دادند و به صورت جمعی محصول نهایی کار فنی هر تیم، از جمله محاسبات تفصیلی آنها را که به طور کامل در این گزارش نیامده، بازبینی کردند. همان‌طور که در شرح طراحی (به فصل ۲ مراجعه نمایید) ذکر شده، برنامه اولیه این بود که یک مشاور دانشگاهی به هر تیم طراحی اختصاص یابد. با این حال، بعداً تصمیم گرفته شد که با توجه به تنوع تخصص‌های موجود در میان مشاوران دانشگاهی، یک فرآیند بازبینی فنی جمعی جامع‌تر خواهد بود.

جدول ۱-۱. تیم‌های طراحی.

عنوان تیم	نام تیم طراحی؛ حامی صنعتی	مشاوران دانشگاهی
تیم ۱	Simpson Gumpertz & Heger (SGH); Kevin LaMalva	نگار الهامی خراسانی، دانشگاه بوفالو
تیم ۲	Magnusson Klemencic Associates (MKA); Ron Klemencic	اریکا فیشر، دانشگاه آیالتی اورگن
تیم ۳	Thornton Tomasetti (TT); Najib Abboud	توماس گرني، دانشگاه جانز هاپکینز
تیم ۴	Walter P Moore (WPM); Larry Grifis	خوزه توره رو، کالج دانشگاهی لندن (سابقاً دانشگاه مریلند)

۱.۷. ساختمان‌های پروژه

چهار ساختمان موجود و ناشناس انتخاب شده‌اند تا طیفی از موقعیت‌های جغرافیایی، ابعاد ساختمان و کاربری‌ها را پوشش دهند (جدول ۱-۲ را مشاهده نمایید). هر چهار ساختمان سازه‌های فولادی با دال‌های کامپوزیت هستند که طبق الزامات تجویزی آیین‌نامه، برای تمام اعضای اصلی و فرعی نیاز به محافظت در برابر حریق دارند. سیستم‌های قاب خمشی باربر جانبی برای این پروژه در نظر گرفته نشدند، زیرا در مقایسه با قاب‌های مهاربندی‌شده، کاربرد نسبتاً کمتری در عمل دارند.

۱.۷.۱. ساختمان ۱

ساختمان ۱ یک پروژه واقعی تکمیل‌شده با گروه خطرپذیری II است که در اوایل دهه ۲۰۰۰ ساخته شده و در منطقه

شهری بوستون واقع است. این ساختمان شش طبقه با مساحت تقریبی ۲۴,۰۰۰ فوت مربع (حدود ۲,۲۳۰ متر مربع) در هر طبقه دارد و عمدتاً برای فضای اداری در تمام طبقات استفاده می‌شود (کاربری گروه B). با توجه به تخفیف اعطا شده برای ساختمان‌های با ارتفاع بیش از ۷۰ فوت (حدود ۲۱ متر)، نوع ساخت ساختمان طبق آیین‌نامه حاکم به‌صورت تجویزی ایجاب می‌کند که تمام قاب‌های فولادی (شامل سازه بام) دارای مقاومت ۱ ساعته در برابر حریق باشند. این ساختمان دارای یک سیستم باربر جانبی قاب مهاربندی شده است که عمدتاً تحت کنترل بارهای طراحی ناشی از باد قرار دارد.

۱.۷.۲. ۲. ساختمان

ساختمان ۲ یک پروژه واقعی تکمیل شده با گروه خطرپذیری IV است که در اواخر دهه ۲۰۰۰ ساخته شده و در ایالت واشنگتن واقع است. این ساختمان ۱۲ طبقه با مساحت تقریبی ۵۰,۰۰۰ فوت مربع (حدود ۴,۶۴۵ متر مربع) در هر طبقه دارد و عمدتاً به عنوان مرکز بهداشتی/بیمارستان استفاده می‌شود. نوع ساخت ساختمان طبق آیین‌نامه حاکم به‌صورت تجویزی ایجاب می‌کند که تمام قاب‌های فولادی دارای مقاومت ۲ ساعته در برابر حریق باشند، به استثنای بام که مقاومت ۱ ساعته برای آن مجاز است. این ساختمان دارای یک سیستم باربر جانبی مهاربند کماتش‌ناپذیر (BRB^{۱۰}) است که عمدتاً تحت کنترل بارهای طراحی ناشی از زلزله قرار دارد.

۱.۷.۳. ۳. ساختمان

ساختمان ۳ بر اساس یک پروژه واقعی تکمیل شده با گروه خطرپذیری III است که در اواسط دهه ۲۰۱۰ ساخته شده و در منطقه غرب میانه آمریکا (Midwest) واقع است. این ساختمان ۵۰ طبقه با مساحت تقریبی ۲۰,۰۰۰ فوت مربع (حدود ۱,۸۶۰ متر مربع) در هر طبقه دارد و برای فضای اداری در طبقات پایین‌تر (کاربری گروه B) و فضای مسکونی در طبقات بالاتر (کاربری گروه R) استفاده می‌شود. قاب ساختمان در ۳۰ طبقه پایین از فولاد و در طبقات بالاتر با انتقال بار از طریق یک سری خرپاهای انتقالی فولادی، به قاب بتنی منتقل می‌شوند. نوع ساخت ساختمان طبق آیین‌نامه حاکم به‌صورت تجویزی ایجاب می‌کند که اعضای اصلی و فرعی به ترتیب دارای مقاومت ۳ ساعته و ۲ ساعته در برابر حریق باشند، به استثنای بام که مقاومت ۱.۵ ساعته برای آن مجاز است. طبقات اداری دارای ستون‌های فولادی پیرامونی بوده و از یک هسته بتن مسلح به عنوان سیستم باربر جانبی استفاده می‌کنند که عمدتاً تحت کنترل بارهای طراحی ناشی از باد قرار دارد.

۱.۷.۴. ۴. ساختمان

ساختمان ۴ یک پروژه واقعی تکمیل شده با گروه خطرپذیری II است که در اواخر دهه ۲۰۰۰ ساخته شده و در ایالت فلوریدا واقع است. این ساختمان شش طبقه با مساحت تقریبی ۳۰,۰۰۰ فوت مربع (حدود ۲,۷۸۷ متر مربع) در هر طبقه دارد و عمدتاً برای فضای اداری در تمام طبقات استفاده می‌شود (کاربری گروه B). نوع ساخت ساختمان طبق آیین‌نامه حاکم به‌صورت تجویزی ایجاب می‌کند که تمام قاب‌های فولادی دارای مقاومت ۲ ساعته در برابر حریق باشند، به استثنای بام که مقاومت ۱ ساعته برای آن مجاز است. این ساختمان دارای یک سیستم باربر جانبی قاب مهاربندی شده

^{۱۰} Buckling-Restrained Braced

است که عمدتاً تحت کنترل بارهای طراحی ناشی از باد قرار دارد.

۱.۸. تأثیرات بالقوه بر پروژه‌های واقعی

PBSFD پتانسیل تأثیرگذاری بر جنبه‌های متعددی از یک پروژه ساختمانی واقعی را دارد. اگرچه این تأثیرات بالقوه فراتر از دامنه این راهنمای نمونه است، اما ذکر این نکته مهم است که این تأثیرات بر حسب منطقه و نوع ساختمان متفاوت بوده و باید به‌طور مستقل برای تعیین مزایای هر پروژه برای ذینفعان پروژه مورد مطالعه قرار گیرند.

به‌طور سنتی، مهندسان سازه طراحی‌های خود را برای بهینه‌سازی تناژ فولاد و هزینه‌های نصب انجام می‌دهند. پس از تکمیل طراحی، محافظت در برابر حریق معمولاً برای اعضای سازه‌ای به‌صورت کلی و پوشانده شده (*blanketed*) مشخص می‌شود، برای مثال، ضخامت معینی برای تمام قاب‌های اصلی و فرعی. از آنجا که PBSFD می‌تواند هم ملاحظات طراحی سازه و هم ملاحظات محافظت در برابر حریق را در نظر بگیرد، این روش پتانسیل کاهش هزینه‌های ساخت و ایجاد مزایا در سایر جنبه‌های پروژه واقعی مانند زمان‌بندی، کربن نهفته (*embodied carbon*)، انعطاف‌پذیری معماری، زیبایی‌شناسی و چرخه عمر را دارد.

۱.۹. محدودیت‌ها

این راهنمای نمونه قصد دارد تا وضعیت دانش کنونی این حوزه نوظهور را به نمایش بگذارد. تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی که در سایر منابع شناسایی شده و همچنین قضاوت مهندسی افراد آگاه در زمینه PBSFD در تحلیل‌ها و طراحی‌های مورد بررسی منعکس شده است و لزوماً یک طراحی کامل و قابل ارائه به مقام مسئول دارای صلاحیت (AHJ) برای تأیید را نشان نمی‌دهد. نویسندگان تلاش کرده‌اند تا با توجه به دانش و محدودیت‌های عملی کنونی صنعت، این راهنمای نمونه را برای PBSFD ساختمان‌های معرف قابل کاربرد توسعه دهند و در عین حال به محدودیت‌های موجود و نیاز به تحقیقات بیشتر آگاه هستند. با این حال، هیچ راهنمایی نمی‌تواند تمام سازه‌هایی را که ممکن است به آن اعمال شود، پیش‌بینی کند و نه می‌تواند پیشرفت‌های آتی در دانش و عمل را پیش‌بینی نماید. نویسندگان قصد ندارند استفاده از تکنیک‌ها یا رویکردهای جایگزین را هنگام انجام PBSFD منع کنند. PBSFD یک حوزه به سرعت در حال توسعه است و احتمالاً دانش کسب‌شده در آینده نشان خواهد داد که برخی از راهنمایی‌های ارائه‌شده در اینجا باید اصلاح شوند. مهندسان، مقامات کنترل ساختمان و ذینفعان پروژه که PBSFD را اجرا می‌کنند، باید قضاوت مستقل خود را در مورد مناسب بودن این توصیه‌ها برای اهداف خود به کار گیرند.

فصل ۲. رویه‌های طراحی پروژه

همان‌طور که در فصل ۱ شرح داده شد، رویکرد طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) شامل تعیین اهداف عملکردی و همچنین مشخص کردن حریق‌های طراحی سازه‌ای مناسب است. با توجه به اهداف این پروژه که در فصل ۱ بیان شد، تیم‌های طراحی در مورد چندین پارامتر طراحی برای تحلیل و طراحی ساختمان‌های خود بحث و توافق کردند. این جنبه‌های مورد توافق در پروژه نمونه، در ابزاری برای همکاری به نام شرح مبانی طراحی (Design Brief) مستند شده است.

۲.۱. شرح مبانی طراحی (Design Brief)

در این پروژه، یک شرح طراحی تهیه شد. این ابزار همکاری بین ذینفعان پروژه به منظور مستندسازی جنبه‌های مورد توافق PBSFD برای این پروژه توسعه یافت. هدف از شرح طراحی، ترسیم اهداف واقعی پروژه، شناسایی ابزارهای قابل استفاده توسط تیم‌ها (مانند مراجع صنعتی و نرم‌افزارها)، و دستیابی به توافق در مورد ملاحظات خاص تحلیل و طراحی مربوط به تعریف بار سوخت و حریق‌های طراحی سازه‌ای، مشخص‌سازی آثار حریق و رویه‌های تحلیل سازه‌ای است. ایجاد این نوع سند، ذینفعان واقعی پروژه، از جمله مقام کنترل ساختمان (AHJ) را قادر می‌سازد تا در ابتدای پروژه، رویکرد را درک کرده و با آن موافقت کنند.

برای ارائه دیدگاهی عمیق‌تر در مورد چگونگی تعریف این پروژه، سند نهایی که توسط تیم‌های طراحی استفاده شد، در پیوست A: شرح طراحی پروژه گنجانده شده است. این همچنین نمونه‌ای است از آنچه ذینفعان واقعی پروژه باید پیش از شروع PBSFD برای یک پروژه خاص، تعریف کرده و تأییدیه مقام کنترل ساختمان (AHJ) را برای آن دریافت کنند. بخش‌های مرتبط از شرح طراحی نهایی برای اهداف بحث در اینجا گنجانده شده است؛ برای مشاهده سند کامل به پیوست A مراجعه نمایید.

۲.۲. ابزارها و تعاریف صنعتی

در هر شرح طراحی، مشخص کردن استانداردها و نرم‌افزارهای مورد تأیید صنعتی که تیم طراحی از آنها استفاده خواهد کرد، حائز اهمیت است. این سند رویکرد را برای ذینفعان جدید پروژه و به‌ویژه برای مقام کنترل ساختمان (AHJ) که باید با این جنبه‌های طراحی پیشنهادی موافقت کند، شفاف می‌سازد. برای این پروژه، تعاریف کلیدی که مختص روش‌شناسی‌های PBSFD هستند، برای وضوح بیشتر در بخش ۲.۲.۳ بازتولید شده‌اند.

۲.۲.۱. مراجع صنعتی

تحلیل‌های شرح داده شده برای این پروژه، کاملاً مطابق با تنها استاندارد اجماع صنعتی برای PBSFD که در ایالات متحده توسعه یافته، انجام شده است:

- ASCE ۷-۱۶ حداقل بارهای طراحی و معیارهای وابسته برای ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها (ASCE ۲۰۱۷)

پیوست E: رویه‌های طراحی بر اساس عملکرد برای آثار حریق بر سازه‌ها

تحلیل و طراحی همچنین به تشخیص هر تیم طراحی، به جنبه‌هایی از مراجع زیر ارجاع داده است:

- مهندسی حریق سازه‌ای، (ASCE ۲۰۱۸) ۱۳۸ (MOP)
- AISC ۳۶۰ مشخصات فنی ساختمان‌های فولادی سازه‌ای (AISC ۲۰۱۶)، پیوست ۴: طراحی سازه برای شرایط حریق
- EN ۱۹۹۱-۱-۲: یوروکد ۱: بارگذاری بر سازه‌ها؛ بخش ۱-۲: بارگذاری بر سازه‌های در معرض حریق (CEN ۲۰۰۱).
- EN ۱۹۹۲-۱-۲: یوروکد ۲: طراحی سازه‌های بتنی - بخش ۲-۱: قوانین عمومی - طراحی سازه در برابر حریق (CEN ۲۰۰۴).
- EN ۱۹۹۳-۱-۲: یوروکد ۳: طراحی سازه‌های فولادی - بخش ۲-۱: قوانین عمومی. طراحی سازه در برابر حریق (CEN ۲۰۰۵a).
- EN ۱۹۹۴-۱-۲: یوروکد ۴: طراحی سازه‌های مختلط فولادی و بتنی - بخش ۲-۱: قوانین عمومی. طراحی سازه در برابر حریق (CEN ۲۰۰۵b).
- SFPE S.۰۱ استاندارد محاسبه میزان مواجهه سازه‌ها با حریق (SFPE ۲۰۱۰).
- SFPE S.۰۲ استاندارد روش‌های محاسباتی برای پیش‌بینی عملکرد حرارتی مجموعه‌های سازه‌ای و مقاوم در برابر حریق (SFPE ۲۰۱۵).

۲.۲.۲. نرم‌افزارهای صنعتی

نرم‌افزارها برای جنبه‌های مختلف تحلیل در PBSFD استفاده می‌شوند، از جمله تحلیل تخلیه ساختمان و تحلیل مواجهه با حریق و همچنین ارزیابی پاسخ حرارتی و سازه‌ای. تیم‌های طراحی از نرم‌افزارهای زیر در تحلیل‌های خود استفاده کردند؛ برای جزئیات مربوط به هر تیم و ساختمان، به بخش دوم: گزارش‌های تیم‌ها در فصول ۷ تا ۱۰ مراجعه نمایید.

برای تحلیل تخلیه (رجوع کنید به پیوست A: شرح طراحی پروژه، بخش ۶.۱):

- *Pathfinder* (Thunderhead Engineering Consultants, Inc. ۲۰۱۶)
برای تحلیل مواجهه با حریق (رجوع کنید به پیوست A: شرح طراحی پروژه، بخش ۷.۲.۳):
- *Fire Dynamics Simulator (FDS)* (NIST ۲۰۰۰)
برای تحلیل انتقال حرارت (رجوع کنید به پیوست A: شرح طراحی پروژه، بخش ۷.۳):

- *Abaqus* (Dassault Systèmes Simulia Corp. n.d.)
 - *SAFIR* (University of Liège and Johns Hopkins University ۲۰۱۷)
- برای تحلیل پاسخ سازه‌ای (رجوع کنید به پیوست A: شرح طراحی پروژه، بخش ۹.۲):
- *Abaqus* (Dassault Systèmes Simulia Corp. n.d.)
 - *SAFIR* (University of Liège and Johns Hopkins University ۲۰۱۷)
 - *MACS+* (ArcelorMittal)
 - *SPM* (Heavy Engineering Research Association (HERA) / University of Auckland)

۲.۲.۳. تعاریف کلیدی

تعاریف واژگان کلیدی که برای درک این پروژه مفید هستند، از کتاب مهندسی حریق سازه‌ای (*Structural Fire Engineering*)، (ASCE ۲۰۱۸) ۱۳۸ (MOP)، فصل ۱ برگرفته شده‌اند، به جز مواردی که با ** مشخص شده‌اند که از استاندارد ۷-۱۶ ASCE، پیوست E گرفته شده‌اند.

سیستم حفاظت فعال در برابر حریق (Active Fire Protection System): یک سیستم حفاظت در برابر حریق که برای شناسایی، کنترل یا اطفای حریق طراحی شده و فعال‌سازی آن نیازمند تشخیص مشتقات جانبی حریق (مانند گازهای داغ) است. یک سیستم اطفای حریق خودکار (آب پاش) نمونه‌ای از یک سیستم حفاظت فعال در برابر حریق است.

زمان خروج ایمن در دسترس (ASET - Available Safe Egress Time): زمان در دسترس برای ساکنین جهت تخلیه یا رسیدن به یک مکان ایمن، پیش از شروع شرایط غیرقابل تحمل یا عملکرد ناکافی سازه. ارزیابی شرایط قابل تحمل، به صورت جداگانه از فرآیند طراحی عملکردی سازه در برابر حریق (PBSFD) انجام می‌شود.

ناحیه امن (پناهگاه) ساختمان (Building Refuge Area): هر مکانی در داخل یک ساختمان که برای پناه دادن ایمن به ساکنین در هنگام وقوع حریق طراحی شده است؛ زمانی که تخلیه فوری ممکن است ایمن یا امکان‌پذیر نباشد.

سوخت کامل (Burnout): خاموش شدن حریق به دلیل به پایان رسیدن (مصرف شدن) تمام بار سوخت.

ضریب انبساط حرارتی (Coefficient of Thermal Expansion): معیاری از میزان تغییر ابعاد یک عضو با تغییر دما. واحدهای رایج برای ضریب انبساط حرارتی mm/mm/K (میلی‌متر بر میلی‌متر بر کلوین) هستند.

انتقال حرارت هدایتی (رسانشی) (Conductive Heat Transfer): انتقال حرارت از طریق یک جسم جامد (مانند یک دیوار بتنی) که ناشی از یک گرادیان فضایی دما است. این پارامتر اغلب بر حسب کیلووات بر متر مربع

(kW/m²) اندازه‌گیری می‌شود.

انتقال حرارت جابجایی (همرفتی) (Convective Heat Transfer): انتقال حرارت به دلیل حرکت توده‌ای یک سیال به سمت یک سطح جامد، مانند حرکت گازهای داغ در امتداد یک دیوار بتنی. این پارامتر اغلب بر حسب کیلووات بر متر مربع (kW/m²) اندازه‌گیری می‌شود.

چگالی (Density): جرم یک ماده در واحد حجم. واحدهای رایج برای چگالی، کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m³) است.

فضای بسته (محفظه) (Enclosed Compartment): یک اتاق با سطوح متقاطع سقف، کف و دیوار که می‌تواند دارای باز شو باشند.

آثار حریق (آتش) (Fire Effects): پاسخ حرارتی و سازه‌ای ناشی از مواجهه با حریق و سرمایش متعاقب آن.

مواجهه با حریق (Fire Exposure): میزانی که مصالح، محصولات یا مجموعه‌ها در معرض شرایط ایجاد شده توسط حریق قرار می‌گیرند.

مدل حریق (Fire Model): یک نمایش فیزیکی یا ریاضیاتی از دینامیک فرآیند سوختن و پدیده‌های مرتبط با آن.

سناریوی حریق (Fire Scenario): شرح یا مجموعه‌ای از شرایط که توسعه حریق را تعریف می‌کند؛ مانند مساحت تهویه، هندسه فضا (محفظه)، و توزیع بار سوخت در فضا یا ناحیه مورد نظر از ساختمان.

گرگرفتگی (Flashover): یک گذار سریع در حریق یک فضا، از سوختن موضعی به سوختن همزمان تمام مواد قابل اشتعال در آن فضا. گرگرفتگی تنها در یک فضای بسته با سوخت و تهویه کافی رخ می‌دهد، جایی که سقف می‌تواند گازهای داغ را محبوس کند که این امر منجر به گرمایش تابشی تمام سوخت‌ها تا نقطه احتراق می‌گردد.

بار سوخت (Fuel Load): مقدار کل محتویات قابل احتراق در یک ساختمان، فضا یا ناحیه که به صورت انرژی کل یا جرم معادل بیان می‌شود.

نرخ آزادسازی حرارت (Heat Release Rate): نرخ که در آن واکنش‌های احتراق یک حریق، حرارت تولید می‌کنند؛ معمولاً بر حسب مگاوات (MW) اندازه‌گیری می‌شود.

انتقال حرارت (Heat Transfer): تبادل انرژی حرارتی ناشی از اختلاف دما.

پوشش‌های پف‌کننده (Intumescent Coatings): رنگ یا پوششی که به صورت لایه‌ای به عنوان یک حفاظت غیرفعال در برابر حریق اعمال می‌شود. هنگامی که در معرض حرارت قرار می‌گیرند، پوشش‌های پف‌کننده ذغال شده و متورم می‌شوند که با افزایش حجم و ضخامت پوشش و کاهش چگالی و رسانایی حرارتی آن، اثری عایق‌کننده ایجاد می‌کنند.

حریق موضعی (Localized Fire): حریقی که مواد قابل احتراق را در مکانی معین را سوزانده و سازه را به صورت

موضعی گرم می نماید. سوختن موضعی می تواند در فضاهای باز، فضاهای بزرگ، نواحی با سقف بلند یا سایر اماکن مشابه رخ دهد.

بازشوها (Openings): درها، پنجره‌ها، یا نفوذها (روزنه‌ها) به داخل یک فضا که مسیری برای تهویه حریق فراهم می کنند.

طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (Performance Based Structural Fire Design - PBSFD): طراحی صریح اعضاء و اتصالات سازه‌ای برای برآورده کردن اهداف عملکردی در برابر حریق‌های طراحی سازه‌ای.

انتقال حرارت تابشی (Radiative Heat Transfer): انتقال حرارت از طریق امواج الکترومغناطیسی؛ اغلب بر حسب کیلووات بر متر مربع (kW/m^2) اندازه گیری می شود.

زمان خروج ایمن مورد نیاز (Required Safe Egress Time - RSET): زمان مورد نیاز از لحظه شروع حریق تا زمانی که ساکنین ساختمان، آن را تخلیه کرده یا به یک مکان امن رسیده اند.

گرمای ویژه (Specific Heat): معیاری از مقدار انرژی مورد نیاز برای افزایش دمای یک واحد جرم به اندازه یک واحد دما؛ اغلب بر حسب ژول بر کیلوگرم-کلوین [J/(kg-K)] اندازه گیری می شود.

ماده مقاوم در برابر حریق پاششی (Spray-Applied Fire Resistive Material - SFRM): یک ماده حفاظت غیرفعال در برابر حریق که برای اعمال مستقیم بر روی اعضای سازه‌ای ساختمان در نظر گرفته شده است. هدف این ماده، افزایش مقاومت در برابر حریق اعضای ساختمان، عمدتاً از طریق خواص عایق کنندگی آن است.

طراحی مقاومت در برابر حریق استاندارد (Standard Fire Resistance Design - SFRD): انتخاب مجموعه‌های مقاوم در برابر حریق مورد تأیید برای برآورده کردن الزامات آیین‌نامه‌ای مقاومت سازه در برابر حریق (که به آن طراحی تجویزی نیز گفته می شود).

حریق طراحی سازه‌ای (Structural Design Fire): حرقی کنترل نشده که پتانسیل تأثیرگذاری بر یکپارچگی و پایداری سازه را داشته و برای طراحی و ارزیابی سازه استفاده می گردد.

شرط مرزی حرارتی (Thermal Boundary Condition): دما و/یا شار حرارتی که یک مجموعه یا سازه در حین یا پس از مواجهه با حریق، بر اساس شرایط گرمایش/سرمایش تابشی و جابجایی در سطوح در معرض، تحت آن قرار می گیرد.

رسانایی حرارتی (Thermal Conductivity): معیاری از توانایی یک ماده برای هدایت گرما. واحدهای رایج برای رسانایی حرارتی وات بر متر-کلوین [W/(m-K)] هستند.

پاسخ حرارتی (Thermal Response):** توزیع دمای اعضا و اتصالات هنگامی که در معرض شرایط مرزی حرارتی قرار می‌گیرند.

مهار حرارتی (Thermal Restraint):** شرایطی که در آن انبساط یا انقباض حرارتی اعضای سازه‌ای توسط نیروهای خارجی وارد بر اعضا مهار می‌شود. سطح مهار به قاب‌بندی مجاور و جزئیات اتصال بستگی دارد.

۲.۳ اهداف عملکردی

طرح‌های نمونه، اهداف عملکردی الزامی و اختیاری را همانطور که در بخش ۱.۴ شرح داده شد، در نظر گرفتند. طرح صفر (۰ Design) هیچگونه انتظار عملکردی صریحی ندارد. انتظارات عملکردی برای طرح‌های ۱، ۲ و ۳ در بخش‌های زیر شرح داده شده است.

۲.۳.۱ اهداف عملکردی الزامی

استاندارد ۷-۱۶ ASCE، بخش E.۴.۱، ایجاب می‌کند که سیستم سازه‌ای در طول مواجهه با حریق، پایدار باقی بماند و دارای یک مسیر بار پیوسته تا حدی باشد که برای تأمین ایمنی جانی ساکنین ضروری است. از این رو، عملکرد سیستم سازه‌ای تحت حریق‌های طراحی سازه‌ای باید به ساکنین ساختمان اجازه دهد تا با ایمنی به یک معبر عمومی (مانند جاده عمومی) خارج شوند. به طور خاص، پشتیبانی سازه‌ای از مسیرهای خروج ساختمان باید برای مدت زمانی حفظ شود که برای تأیید تخلیه ایمن و کامل ساکنین لازم است. همچنین، بخش‌هایی از سیستم سازه‌ای که از نواحی امن (پناهگاه‌ها) که انتظار می‌رود ساکنین در حین حریق به آنجا پناه ببرند پشتیبانی می‌کنند، باید در طول سوختن کامل حریق (شامل فاز گرمایش و سرمایش) پابرجا بمانند. طرح ۱ (Design ۱) تنها برای برآورده کردن این حداقل الزامات انجام شد.

۲.۳.۱.۱ ملاحظات خروج ساکنین

آیین‌نامه‌های ساختمانی، مسافت‌های طی مسیر خروج تا دسترسی به خروجی‌ها (مانند پلکان‌ها) را محدود می‌کنند، اما عموماً زمان کل تخلیه را محدود نمی‌کنند. با افزایش فاصله عمودی ساکنین از نقطه تخلیه به یک معبر عمومی، زمان مورد نیاز برای تخلیه ساختمان افزایش می‌یابد. برخلاف روش تجویزی (SFRD)، طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) به صراحت پیامدهای افزایش زمان تخلیه ساکنین و اتکا به نواحی امن ساختمان را ارزیابی می‌کند.

برای اثبات کفایت مسیرهای خروج ساکنین، برای هر ساختمان یک تحلیل ASET در مقابل RSET انجام می‌شود. زمان خروج ایمن در دسترس (ASET^۱) بر اساس پایداری سیستم سازه‌ای در برابر حریق تعیین می‌گردد. زمان خروج ایمن مورد نیاز (RSET^۲) زمانی است که طول می‌کشد تا ساکنین با ایمنی به نواحی امن داخل ساختمان برسند یا از ساختمان به یک معبر عمومی خارج شوند. مقدار ASET باید بیشتر از مقدار RSET باشد. پایداری سازه در طول سوختن کامل حریق، این الزام را برآورده می‌کند. برای سازه بلندمرتبه ساختمان شماره ۳، تأثیر تخلیه مرحله‌ای در

^۱ Available Safe Egress Time

^۲ Required Safe Egress Time

نظر گرفته شده است.

۲.۳.۲ اهداف عملکردی اختیاری

استاندارد ۷-۱۶ ASCE، بخش ۴.۲، E.۴، بیان می‌کند که ممکن است اهداف عملکردی خاص پروژه توسط ذی‌نفعان پروژه الزامی شوند.

طرح‌های ۲ و ۳، برای برآورده کردن الزامات الزامی شرح داده شده در بخش ۲.۳.۱ و همچنین تأمین هدف عملکردی اختیاری و خاص پروژه، یعنی سوختن کامل حریق بدون هیچ‌گونه فروریزش سازه‌ای (عملکرد بهینه)، انجام شدند.

۲.۳.۲.۱ طراحی برای سوختن کامل (Burnout Design)

طراحی برای سوختن کامل حریق، نشان‌دهنده عملکرد ایده‌آل در طول یک حریق کنترل نشده است. در این حالت، هیچ فروریزی انتظار نمی‌رود. بر این اساس، پس از یک رویداد حریق کنترل نشده، به جای تخریب کامل ساختمان، تنها تعویض اجزای آسیب‌دیده منتخب مورد انتظار خواهد بود.

۲.۴ تحلیل

طرح‌های نمونه شامل تحلیل‌هایی برای تعیین نیازهای (demands) لازم جهت ارزیابی اهداف عملکردی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ (که در بخش ۲.۳ شرح داده شد) هستند. ملاحظات مربوط به نیازها شامل تعیین بارهای حریق (محاسبه شده از بار سوخت طراحی و حریق طراحی سازه‌ای) و آثار ناشی از حریق بر سازه است.

هنگام ارزیابی عملکرد سازه در حضور آثار حریق، هم محاسبات دستی سازه‌ای و هم شبیه‌سازی‌های کامپیوتری پاسخ سازه می‌توانند استفاده شوند. آثار قابل توجه حریق شامل انبساط حرارتی مهار شده و خواص وابسته به دمای مصالح است.

فصل ۳. خلاصه تحلیل‌ها

مطابق با فرآیندی که در بخش ۲.۴ تشریح شد، زیربخش‌های پیش رو به صورت کلی، تحلیل‌های انجام‌شده برای چهار ساختمان پروژه را خلاصه می‌کنند؛ برای مشاهده توضیحات مربوط به هر ساختمان به بخش ۱.۷ مراجعه نمایید. برای شرح کامل‌تر تحلیل‌های هر تیم طراحی، به بخش دوم: گزارش‌های تیم‌ها، رجوع شود.

۳.۱ در معرض حریق قرار گرفتن (Fire Exposure)

در معرض حریق قرار گرفتن (*Fire Exposure*) به میزانی تعریف می‌شود که مصالح، محصولات یا اجزای سازه‌ای در معرض شرایط ایجادشده توسط حریق قرار می‌گیرند. این پارامتر با توسعه تاریخچه زمان-دمای حریق، که نمایانگر حریق طراحی سازه‌ای است، ارزیابی شده و برای تحلیل پاسخ حرارتی (*Thermal Response*) سازه به کار می‌رود. برای تعیین تاریخچه زمان-دمای حریق طراحی سازه‌ای، لازم است پارامترهای بخش‌بندی فضا (*Compartmentalization*)، تهویه (*Ventilation*) و بار سوخت طرح (*Design Fuel Load*) مشخص شوند.

در این پروژه، مراحل انجام کار در ارتباط با الزامات پیوست E استاندارد ASCE ۷-۱۶ (ASCE ۷-۱۶, Appendix E) شرح داده شده است که بر اساس آن، در نظر گرفتن شرایط حریق کنترل‌نشده در فضاهای داخلی ساختمان – که از آن با عنوان «حریق طراحی سازه‌ای» (*structural design fire*) یاد می‌شود – الزامی است. طبق پیوست E، پس از تعیین حریق‌های طراحی سازه‌ای، پاسخ حرارتی سازه همان‌گونه که در بخش ۳.۲ توضیح داده شده، ارزیابی گردید.

به عنوان گام نخست برای تعیین حریق‌های طراحی سازه‌ای، هر تیم طراحی مجموعه‌ای از شرایط قابل تصور برای تهویه و بخش‌بندی فضا را در نظر گرفت تا جنبه‌های محیطی متفاوت یا نامشخص فضاهای ساختمان را پوشش دهد. این شرایط با عنوان «سناریوهای حریق طراحی سازه‌ای» (*structural design fire scenarios*) شناخته می‌شوند. به عنوان مثال، شکستن پنجره‌ها یا باز بودن پلان معماری می‌تواند برای حریق، تهویه ایجاد کند. به طور کلی، تهویه کمتر، مدت زمان یک حریق کنترل‌نشده را افزایش می‌دهد و می‌تواند از طریق کاهش اکسیژن، شدت حریق (*fire intensity*) را – که به صورت نرخ انرژی حرارتی آزادشده تعریف می‌شود – کاهش دهد. در مقابل، شرایط تهویه بیشتر می‌تواند شدت حریق را افزایش دهد، اما همزمان اجازه خروج گازهای داغ را نیز فراهم کرده و باعث کاهش دما می‌شود. علاوه بر تهویه، بخش‌بندی فضا ناشی از چیدمان دیوارهای داخلی می‌تواند حرارت ناشی از حریق را محبوس کرده و دما را افزایش دهد.

پس از در نظر گرفتن شرایط تهویه و بخش‌بندی، هر تیم طراحی سطح مناسبی از مواد قابل اشتعال در فضاهای ساختمان را تعیین کرد که از آن با عنوان «بار سوخت طرح» (*design fuel load*) یاد می‌شود. مواد قابل اشتعال موجود در فضاهای ساختمان، نشان‌دهنده انرژی پتانسیلی هستند که با اشتعال آزاد شده و به صورت نرخ آزادسازی حرارت حریق (*heat-release-rate*) کمی‌سازی می‌شوند. بر این اساس، بارهای سوخت بالاتر عموماً مدت زمان قرار گرفتن در معرض حریق را طولانی‌تر می‌کنند. تیم طراحی تصمیم گرفت از پیوست E آیین‌نامه یوروکد ۱ (*Eurocode 1*)، که در صورت تأیید مقام مسئول ساختمان (AHJ)، جایگزین قابل قبولی برای استاندارد NFPA ۵۵۷ است، برای

محاسبه بار سوخت طراحی توزیع شده مناسب برای هر سناریوی حریق طراحی سازه‌ای استفاده کند. این مرجع مقادیر مشخصه بار سوخت توزیع شده (مانند مقدار انرژی پتانسیل بر واحد سطح کف) را بر اساس نوع کاربری ساختمان ارائه می‌دهد. اگرچه پیوست E یوروکد، ضرایب افزایش/کاهش ریسک بار سوخت را مرتبط با وجود یا عدم وجود شرایطی که معمولاً قرار گرفتن در معرض حریق را کاهش می‌دهند (مانند سیستم‌های اعلام حریق) ارائه می‌کند، اما هدف این پروژه ارزیابی یک حریق کنترل نشده بود و به همین دلیل، از ضرایب کاهش ریسک استفاده نشد. علاوه بر این، برخی از تیم‌های طراحی، مجموعه‌ای از بارهای سوخت تشدید یافته را مورد مطالعه قرار دادند تا آسیب‌پذیری کلی طرح سازه‌ای را بسنجند؛ این رویکرد مشابه در نظر گرفتن پارامترهای طراحی لرزه‌ای فراتر از سطوح زلزله طراحی معمول است.

در معرض حریق کنترل نشده قرار گرفتن ممکن است تحت تأثیر مرزهای فضا (compartment boundaries) باشد یا نباشد، بنابراین این موضوع باید برای هر ساختمان به طور خاص ارزیابی شود. برای هر ساختمان، فضای تعریف شده در درجه اول نوع حریق را به صورت «حریق محصور» (enclosure fire) یا «حریق موضعی» (localized fire) تعیین می‌کند که این طبقه‌بندی بر اساس احتمال وقوع گرگرفتگی (flashover) است. برای تعیین اینکه کدام نوع حریق باید در نظر گرفته شود، از محاسبات دستی استفاده شد. گرگرفتگی زمانی در یک فضای محصور رخ می‌دهد که به دلیل محبوس شدن حرارت و رسیدن به دمای اشتعال همزمان، تمام مواد قابل اشتعال به یکباره شروع به سوختن کنند. از استاندارد (SFPE ۲۰۱۰) (SFPE S.۰۱) برای محاسبه نرخ آزادسازی حرارتی که برای وقوع گرگرفتگی در یک فضای معین لازم است، استفاده شد و سپس این مقدار با نرخ آزادسازی حرارت حداکثر پیش‌بینی شده بر اساس نوع کاربری (طبق پیوست E یوروکد ۱) مقایسه گردید. اگر نرخ آزادسازی حرارت حداکثر مواد قابل اشتعال در فضا، از مقدار لازم برای گرگرفتگی بیشتر باشد، باید یک حریق محصور در نظر گرفته شود. در غیر این صورت، یک حریق موضعی را می‌توان مد نظر قرار داد. برای اکثر ساختمان‌های مورد مطالعه، تیم‌های طراحی فقط حریق‌های محصور را در نظر گرفتند، زیرا بیشتر فضاهای ساختمان مستعد این نوع حریق بودند. با این حال، تیم طراحی ۳ علاوه بر حریق محصور، از مدل‌سازی میدانی (field modeling) برای تحلیل قرار گرفتن در معرض حریق موضعی برای یک سناریوی خاص حریق طراحی سازه‌ای استفاده کرد.

برای استخراج تاریخچه دمای حریق‌های محصور، هر تیم طراحی از معادلات پارامتریک موجود در پیوست A یوروکد ۱ (Eurocode ۱, Annex A) استفاده کرد. این معادلات پارامتریک تابعی از مشخصات بخش‌بندی فضا (شامل مشخصات حرارتی مرزها)، مشخصات تهویه و بار سوخت طراحی هستند. این روش به عنوان راحت‌ترین راه برای استخراج چندین تاریخچه زمان-دمای حریق در نظر گرفته شد؛ با این حال، ذکر این نکته حائز اهمیت است که انتظار می‌رود سایر روش‌های محاسبه قرار گرفتن در معرض حریق - مانند مدل‌سازی ناحیه‌ای (zone modeling) - نتایج مشابهی تولید کنند. در واقع، تیم طراحی ۱ از مدل‌سازی میدانی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مطالعه تأثیر دریاچه‌های حرارتی سقف بر تاریخچه زمان-دمای سناریوهای حریق محصور استفاده کرد.

۳.۲ پاسخ حرارتی (Thermal Response)

بر اساس تاریخچه‌های زمان-دمای حریق استخراج شده (که در بخش ۳.۱ شرح داده شد) و خواص حرارتی مصالح (که در پیوست A: شرح طراحی پروژه، بخش ۷.۳.۲ توضیح داده شده است)، هر تیم طراحی محاسبات انتقال حرارت را برای مشخص کردن پاسخ حرارتی سیستم‌های سازه‌ای انجام داد. نتایج این محاسبات به صورت تاریخچه‌های زمان-دمای

سازه ارائه می‌شوند.

برای این محاسبات انتقال حرارت، تیم‌های طراحی از چند رویکرد مختلف استفاده کردند. بیشتر تیم‌ها از روش محاسبات دستی ارائه شده در پیوست ۴ آیین‌نامه ۳۶۰ AISC برای استخراج تاریخچه زمان-دمای اعضای فولادی محافظت‌شده و محافظت‌نشده استفاده کردند و محیط در معرض حرارت هر عضو را در نظر گرفتند - برای مثال، بال بالایی یک تیر به دلیل تماس با دال/عرشه فوقانی، در برابر قرار گرفتن مستقیم در معرض حریق محافظت‌شده در نظر گرفته شد. به عنوان مکمل این رویکرد، تیم طراحی ۱ محاسبات تفاضل محدود دو بعدی را برای استخراج تاریخچه توزیع دمای سازه‌ای در دال‌های بتنی انجام داد. در مقابل، سایر تیم‌های طراحی تحلیل‌های انتقال حرارت اجزای محدود دو بعدی را برای استخراج تاریخچه توزیع فضایی دما برای مجموعه‌های کامل سازه‌ای فولادی/بتنی به کار بردند.

برخلاف در نظر گرفتن قرار گرفتن در معرض حریق در فضاهای ساختمان، عدم قطعیت در پاسخ حرارتی مرتبط یک سیستم سازه‌ای بسیار کمتر است. از این رو، اگرچه از رویکردهای مدل‌سازی متفاوتی می‌توان استفاده کرد، اما این رویکردها لزوماً بر قطعیت خروجی تأثیر نمی‌گذارند. بنابراین، برای توسعه تاریخچه‌های زمان-دمای سازه، تکرارها و تغییرات متعدد در این محاسبات ضروری نبود.

۳.۳ پاسخ سازه‌ای (Structural Response)

بر اساس تاریخچه‌های زمان-دمای سازه استخراج‌شده (که در بخش ۳.۲ شرح داده شد)، هر تیم طراحی تحلیل‌های سازه‌ای جدیدی را برای تعیین کفایت طرح خود و همچنین مشخص کردن میزان عایق‌بندی و/یا تقویت‌های سازه‌ای لازم برای برآورده ساختن اهداف عملکردی هر حالت طراحی (مانند طرح‌های ۱، ۲ و ۳ که در بخش ۱.۵ شرح داده شدند) انجام داد. به استثنای فضاهای با بخش‌بندی شدید، تاریخچه‌های زمان-دمای سازه که توسط هر تیم طراحی استخراج شد، نسبتاً مشابه بودند. با این حال، سیستم سازه‌ای هر ساختمان منحصربه‌فرد است، موضوعی که لزوماً در طراحی تجویزی سستی در نظر گرفته نمی‌شود. از این رو، تحلیل پاسخ سازه‌ای، حیاتی‌ترین جنبه در کل فرآیند طراحی سازه‌ای بر اساس عملکرد در برابر حریق (PBSFD) است.

در این پروژه، بخش عمده‌ای از کار تحلیلی انجام‌شده توسط هر تیم طراحی به درک تأثیر دماهای بالا بر سیستم‌های سازه‌ای (که از آن با عنوان «اثر حریق» (fire effects) یاد می‌شود) و توانایی سیستم‌های سازه‌ای برای تحمل ایمن این آثار - که با عنوان «مقاومت در برابر حریق» (fire robustness) شناخته می‌شود - اختصاص یافت. در حالی که طیف وسیعی از متخصصان طراحی، از جمله مهندسان سازه، ممکن است قادر به انجام تحلیل‌های قرار گرفتن در معرض حریق و پاسخ حرارتی (شرح داده شده در بخش‌های ۳.۱ و ۳.۲) باشند، مهندسان سازه به طور منحصربه‌فردی توانایی انجام تحلیل‌های پاسخ سازه‌ای را دارند.

بند E.۶.۳ از استاندارد ۷-۱۶ ASCE، استفاده از ترکیب بار سازه‌ای برای رویدادهای فوق‌العاده مندرج در بند ۲.۵.۲.۱ همان استاندارد را برای تحلیل‌های PBSFD الزامی می‌داند، به شرح زیر:

$$1.2D + A_k + 0.5L + 0.2S \quad (\text{رابطه ۳-۱})$$

که در آن:

• $D =$ بار مرده

• $A_k =$ بار یا اثر ناشی از رویداد فوق‌العاده A

• $L =$ بار زنده

• $S =$ بار برف

عبارت مربوط به اثر بار حریق (A_k) در ترکیب بار بالا شامل نیروهای القایی در یک عضو یا جزء (مانند نیروی محوری، نیروی برشی، لنگر خمشی و/یا گشتاور) به دلیل انبساط/انقباض حرارتی مهارشده در حین قرار گرفتن در معرض حریق است. بارهای مرده، زنده و برف طراحی باید از آیین‌نامه ساختمانی حاکم یا مستقیماً از اسناد ساختمانی ساختمان مورد نظر استخراج شوند.

هر تیم طراحی نیازهای (demands) وارده بر سیستم‌های سازه‌ای تحت تأثیر حریق را با در نظر گرفتن آثار حریق زیر ارزیابی کرد:

- بارهای مکانیکی اعمال‌شده، طبق ترکیب بار الزامی برای یک رویداد فوق‌العاده.
- انبساط و انقباض حرارتی اعضای سازه‌ای در مراحل گرمایش و سرمایش قرار گرفتن در معرض حریق.
- نیروها و لنگرهای القایی در اتصالات سازه‌ای به دلیل انبساط یا انقباض حرارتی مهارشده.
- خیز و تغییرشکل اعضای سازه‌ای ناشی از کاهش مقاومت و سختی در دماهای بالا.
- دوران در اتصالات به دلیل تغییرشکل‌های بزرگ اعضا.
- کمایش موضعی اعضای سازه‌ای ناشی از نیروها یا لنگرهای القایی و تغییرشکل‌های بزرگ.
- خردشدگی دال بتنی و کرنش کششی یا گسیختگی آرماتورها یا مش.
- جدا شدن عرشه فلزی (metal decking) از بتن.
- اثر گرمایش غیر یکنواخت در مقاطع عرضی، مانند انبساط تفاضلی.

هر تیم طراحی ظرفیت (capacity) سیستم‌های سازه‌ای تحت تأثیر حریق را با در نظر گرفتن جنبه‌های مقاومت حریق زیر ارزیابی کرد:

- رفتار تنش-کرنش وابسته به دمای فولاد و بتن.
- شکل‌پذیری اتصالات سازه‌ای و آرماتور دال.

- تأثیر پیوستگی سازه‌ای، بازتوزیع بار و منابع جایگزین ظرفیت باربری، مانند کنش غشایی کششی-فشاری (compressive tensile membrane action).
- توانایی عرشه فلزی در جلوگیری از پوست‌پوست شدن و ترک‌یدن بتن (concrete spalling).
- توانایی سیستم سازه‌ای برای پایدار ماندن و جلوگیری از فروریزش در صورت وقوع خرابی‌های موضعی.
- تأثیر تقویت‌های سازه‌ای PBSFD بر عملکرد سیستم سازه‌ای در برابر سایر بارهای طراحی الزامی، مانند بار لرزه‌ای.
- یکپارچگی پیوستگی کف برای جلوگیری از گسترش عمودی حریق.
- تیم‌های طراحی تحلیل‌های سازه‌ای را با استفاده از ابزارهای متنوع طراحی سازه‌ای انجام دادند، از جمله:
 - محاسبات دستی طبق پیوست ۴ آیین‌نامه ۳۶۰ AISC.
 - نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی حریق سازه‌ای (SFE) [مانند SAFIR (Franssen and Gernay) و MACS+ (Vassart et al. n.d.)، (۲۰۱۷)، و نرم‌افزار (Slab Panel Method (SPM) (HERA)].
 - نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود عمومی (FEA) [مانند Abaqus (Dassault Systems n.d.)].

بر اساس تحلیل‌های نیازها و ظرفیت‌های سازه‌ای تحت شرایط حریق، اکثر تیم‌های طراحی آسیب‌پذیری‌های سازه‌ای خاصی را در طرح‌های اسمی سازه شناسایی کردند که برای دستیابی به اهداف عملکردی مشخص شده این پروژه، نیاز به افزایش سطح عایق‌بندی سازه‌ای، یا تقویت‌های سازه‌ای، یا هر دو داشتند. به عنوان جایگزینی برای افزودن عایق سازه‌ای به عنوان راهکاری برای کاهش دمای فولاد، تیم طراحی ۱ نصب درپچه‌های حرارتی غیرفعال یا نورگیرها را در تراز بام انتخاب کرد. برای برخی از این سناریوهای طراحی، افزایش سطح عایق‌بندی سازه‌ای (تا حدی که برای قابلیت باقی ماندن مطمئن آن تأیید شده است) به طور قابل ملاحظه‌ای سطح مقاومت حریق سازه را بهبود بخشید و در نتیجه، اهداف عملکردی مشخص شده این پروژه را برآورده نکرد. همچنین، تیم طراحی ۲ به طور عمدی سطح عایق‌بندی را برای کاهش کرنش‌های اعضا کاهش داد.

به طور خلاصه، انواع تقویت‌های سازه‌ای که توسط تیم‌های طراحی برای دستیابی به اهداف عملکردی استفاده شد، در جدول ۳.۱ نشان داده شده است. در مجموع، تیم‌های طراحی توانستند طرح‌های مقاومی ایجاد کنند که سطح عملکرد مورد نیاز را تحت شرایط حریق کنترل‌نشده فراهم می‌کنند. همچنین، به طور کلی مشخص شد که آثار حریق درجا (in-situ fire effects) (آنهايي که در ساختار واقعی ساختمان وجود دارند) به طور قابل توجهی مهم‌تر از دمای خود اعضای سازه‌ای در پاسخ سازه هستند. در نهایت، نتایج تحلیل‌های سازه‌ای و تقویت‌های سازه‌ای لازم برای هر ساختمان منحصربه‌فرد بوده و بنابراین نمی‌توان آنها را به صورت تجویزی برای همه ساختمان‌ها تعمیم داد. از این رو، برای دستیابی به اهداف عملکردی با استفاده از PBSFD، تخصص مهندسی سازه به صورت پروژه‌به‌پروژه مورد نیاز است.

جدول ۱-۳. تقویت‌های سازه‌ای پیشنهادی و مزایای بالقوه.

مزیت بالقوه ^a	تقویت سازه‌ای پیشنهادی
مقاومت بیشتری برای مقابله با کشش دوطرفه در مرحله گرمایش حریق فراهم می‌کند.	افزایش چگالی مش آرماتور دال بتنی
مقاومت بیشتری برای مقابله با کشش دوطرفه در مرحله گرمایش حریق فراهم می‌کند.	افزایش سازه‌های آرماتورهای دال بتنی
مقاومت خمشی را با افزایش عمق مؤثر دال برای جبران کاهش مقاومت عرشه فلزی در مرحله گرمایش حریق، افزایش می‌دهد؛ و پایداری لبه دال را برای کنش غشایی کششی-فشاری کاملاً توسعه‌یافته در مراحل گرمایش و سرمايش حریق فراهم می‌کند.	کاهش ارتفاع قرارگیری مش آرماتور در دال‌های بتنی
پایداری لبه دال را برای کنش غشایی کششی-فشاری کاملاً توسعه‌یافته در مراحل گرمایش و سرمايش حریق فراهم می‌کند.	اصلاح کنش مش آرماتور در لبه‌های دال
مقاومت کششی پیوسته دال را برای کنش غشایی کششی-فشاری کاملاً توسعه‌یافته در مراحل گرمایش و سرمايش حریق فراهم می‌کند.	افزایش طول همپوشانی مش آرماتور در دال‌های بتنی
مقاومت بیشتری برای مقابله با کشش القایی در اتصالات در مرحله سرمايش حریق فراهم می‌کند.	افزایش فاصله لبه سوراخ پیچ در اتصالات سازه‌ای
مقاومت بیشتری برای مقابله با نیروی فشاری رانشی (compressive thrust) در اتصالات در مرحله گرمایش حریق و کشش القایی در اتصالات در مرحله سرمايش حریق فراهم می‌کند.	افزایش تعداد پیچ‌ها در اتصالات سازه‌ای ^b
مقاومت بیشتری برای مقابله با نیروی فشاری رانشی در اتصالات در مرحله گرمایش حریق و کشش القایی در اتصالات در مرحله سرمايش حریق فراهم می‌کند.	اصلاح الگوی پیچ در اتصالات سازه‌ای
به اتصالات اجازه می‌دهد تا انبساط یا انقباض تیر ناشی از گرمایش، سرمايش و کاهش سختی و مقاومت را بدون القای بارهای محوری در اتصالات تحمل کنند و در نتیجه نیازهای اتصال را کاهش می‌دهد.	افزودن سوراخ‌های لوبیایی (slotted holes) به اتصالات سازه‌ای ^b
مقاومت بیشتری برای مقابله با نیروی فشاری رانشی در اتصالات در مرحله گرمایش حریق و کشش القایی در اتصالات در مرحله سرمايش حریق فراهم می‌کند.	افزایش ضخامت ورق‌های جان در اتصالات ^b
شکل‌پذیری بیشتری برای اتصالات فراهم می‌کند تا در مرحله گرمایش حریق، دوران را بدون گسیختگی اتصال تجربه کنند.	تغییر نوع اتصالات سازه‌ای از ورق جان به نبشی جان
مقاومت خمشی بیشتری برای مقابله با بارگذاری جانبی ناشی از انبساط کف‌ها در مرحله گرمایش حریق فراهم می‌کند.	تغییر جهت ستون‌های پیرامونی (محور قوی عمود بر پیرامون ساختمان)
مقاومت خمشی بیشتری برای مقابله با بارگذاری جانبی دوطرفه ناشی از انبساط کف‌ها در مرحله گرمایش حریق فراهم می‌کند.	تغییر مقطع ستون‌های فولادی گوشه از مقاطع W به مقاطع HSS
مقاومت خمشی بیشتری برای کنش غشایی کششی-فشاری کاملاً توسعه‌یافته در مرحله گرمایش حریق فراهم می‌کند.	افزایش اندازه اعضای اصلی برای شاه‌تیرها و/یا تیرهای مرزی
مقاومت خمشی را با افزایش عمق مؤثر دال برای جبران کاهش مقاومت عرشه فلزی در مرحله گرمایش حریق افزایش می‌دهد.	افزودن آرماتور در کنگره‌های عرشه فلزی

^a تحقیقات در حال انجام ممکن است این یافته‌ها را در طول زمان تغییر دهد.

^b اثربخشی تقویت‌های پیشنهادی همچنان نیازمند تأیید آزمایشگاهی است.

فصل ۴. خلاصه طراحی و بحث در مورد نتایج

۴.۱ نگاه کلی

خلاصه طراحی شامل نتایج تیم طراحی برای هر یک از سناریوهای طراحی با توجه به اهداف عملکردی مشخص شده است. بحث شامل این است که چگونه هر تیم طراحی، یافته‌های هر تحلیل را مقایسه کرده و جنبه‌های در نظر گرفته شده مانند حجم مصالح یا مقایسه‌های هزینه (در صورت انجام توسط تیم طراحی) را شامل می‌شود.

۴.۲ ساختمان‌های ۱ تا ۴

هر تیم، خلاصه طراحی و بحث خود را در بخش‌های جداگانه زیر بیان کرده است.

۴.۲.۱ ساختمان ۱: خلاصه طراحی و بحث

خلاصه طراحی و بحثی که در ادامه می‌آید توسط شرکت Heger & Simpson Gumpertz برای ساختمان شماره ۱ تهیه شده است. این ساختمان، یک ساختمان اداری ۶ طبقه با گروه خطر II در منطقه متروی بوستون است که طراحی آن حاکم بر باد بود. نوع ساخت این ساختمان بر اساس آیین‌نامه ساختمانی حاکم، به صورت تجویزی ایجاب می‌کند که تمام قاب‌بندی‌های فولادی (شامل سازه سقف) دارای مقاومت ۱ ساعته در برابر حریق باشند. انگیزه برای ارائه طرح ۳ در بخش ۴.۲.۱.۲ مورد بحث قرار گرفته و گزارش کامل تیم طراحی در فصل ۷ گنجانده شده است.

۴.۲.۱.۱ خلاصه طرح‌ها

جدول ۴-۱ نتایج طراحی برای ساختمان ۱ را خلاصه می‌کند. طراحی اسمی (Nominal) ساختمان ۱، جزئیات UL Design No. D۹۰۸ را برای برآورده کردن الزامات آیین‌نامه برای کف‌های با مقاومت ۱ ساعته در برابر حریق مشخص کرده بود. این کنش کف، به همراه بسیاری دیگر (مانند D۹۲۰, D۹۲۳, D۹۲۵, D۹۴۰, D۹۴۳, D۹۴۹ و D۹۲۹m)، نیازی به آرماتورگذاری در کنگره‌های عرشه دال ندارد. همانطور که در بخش ۳.۶.۷ بحث شد، فقدان آرماتور لنگر مثبت در دال، به غیرقابل اجرا بودن طرح ۱ و طرح ۲ منجر می‌گردد. البته، انتخاب یک مجموعه مقاوم در برابر حریق که نیازمند آرماتورگذاری در کنگره‌های عرشه فلزی باشد، می‌توانست این طرح‌ها را قابل دستیابی کند. با این حال، چنین تصمیم طراحی به منزله یک اصلاح/ارتقاء سازه‌ای است که در طرح ۱ و طرح ۲ مجاز نیست.

طرح ۳ با اصلاح جزئی طراحی سازه‌ای اسمی و تخصیص منطقی عایق به شرح زیر، اهداف عملکردی اختیاری را برآورده کرده و با نمایش عملکرد بهینه (سوختن کامل حریق)، حفاظت سازه‌ای قوی و قابل اعتمادی در برابر حریق فراهم می‌آورد:

- تقریباً تمام اعضای فرعی بدون محافظ رها شده‌اند،
- تمام اعضای سقف بدون محافظ رها شده‌اند،

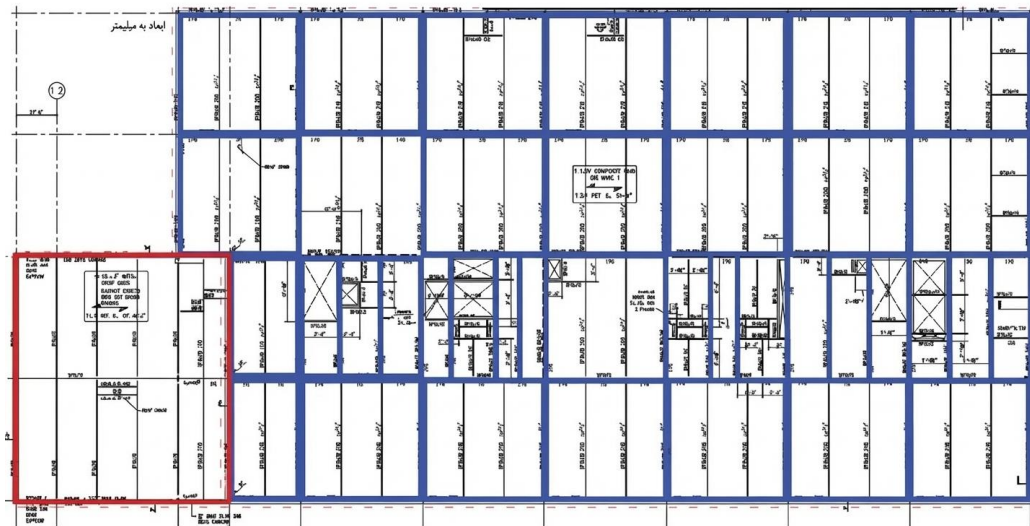
- مش دال از 22.9×2.9 D۶-۶X۶ به صورت 4×4 D۵-۴X۵، تقویت شده است،
- پوشش (کاور) رویی مش دال از $3/4$ in به $5/8$ in افزایش یافته است،
- مش دال در لبه‌ها برای مهاربندی (آنکراژ) مناسب، جزئیات‌دهی شده است،
- فاصله آزاد سوراخ پیچ در جان اعضای اصلی از $1/2$ in - ۱ به $3/4$ in - ۱ افزایش یافته است،
- تعداد پیچ‌ها برای اتصالات تیرهای پیرامونی از سه به چهار افزایش یافته است،
- ستون‌های پیرامونی مجدداً جهت‌دهی شده‌اند (محور قوی عمود بر پیرامون ساختمان) و
- ستون‌های گوشه پیرامونی از مقاطع W-شکل به مقاطع HSS تغییر یافته و اتصالات آنها نیز بیشتر از آنچه توصیف شد، تقویت شده است.

جدول ۴-۱. خلاصه طراحی ساختمان ۱

سناریوی طراحی	آیا اصلاحات سازه‌ای مجاز است؟	آیا کاهش محدوده عایق کاری مجاز است؟	آیا اهداف عملکردی الزامی برآورده شد؟	آیا اهداف عملکردی اختیاری برآورده شد: امکان سوختن کامل حریق (عملکرد بهینه) وجود دارد؟
۰	خیر	خیر	نامشخص*	نامشخص*
۱	خیر	خیر	خیر	خیر
۲	خیر	خیر	خیر	خیر
۳	بله	بله	بله	بله

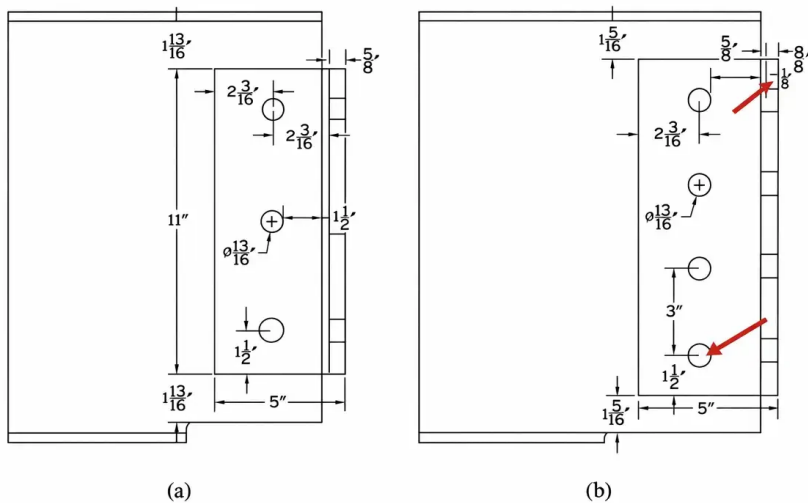
* روش تجویزی شامل تحلیل سازه‌ای قابل توجهی نیست یا به آن نیاز ندارد.

شکل ۴-۱ توزیع عایق سازه‌ای در طرح ۳ را برای یک طبقه نوعی از ساختمان ۱ که شامل یک بخش بام پایینی نیز می‌شود، نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۴-۲ تقویت مورد نیاز اتصالات تیر پیرامونی نوعی را نمایش می‌دهد. در نهایت، شکل ۴-۳ نحوه قرارگیری مش دال و جزئیات لبه را تشریح می‌کند. در تراز بام‌های پایینی/بالایی، نصب درپچه‌های حرارتی/نورگیرهای غیرفعال برای کاهش چشمگیر نیازهای دمایی (temperature demands) بر سازه‌های سقف (به جای اتکا به عایق سازه‌ای) و حفظ پایداری سازه تحت حریق استفاده می‌شود. شکل ۴-۴ مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) را که برای تأیید این موضوع استفاده شده، به تصویر می‌کشد. ترکیب تخصیص منطقی عایق کاری سازه‌ای و اصلاحات سازه‌ای ذکر شده، این امکان را فراهم می‌کند که دهانه‌های کف در خیزهای بزرگ، غشاءهای کششی-فشاری پایدار و خودمتعادل‌شونده‌ای (self-equilibrated) را تشکیل دهند که در اثر قرارگیری در معرض حریق کنترل نشده ایجاد می‌شوند. شکل ۴-۵ تصویری مفهومی از این تعادل نیرو ارائه می‌دهد و شکل ۴-۶ نتایج مدل سازی سازه‌ای را نشان می‌دهد که وقوع این رفتار را برای طرح ۳ تأیید می‌کند. برای تاریخچه‌های دمایی سازه که در شکل ۴-۷ ترسیم شده‌اند، شکل ۴-۸ روند تکامل ظرفیت سیستم کف را در مقایسه با بار ثابت اعمال شده نمایش می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که دال مسلح، با افزایش میزان خیز، عملاً تقویت می‌شود و بدین ترتیب افت سریع مقاومت تیرهای فرعی داخلی بدون محافظ را - که در اوج دما تقریباً ناچیز می‌شود - به‌طور مؤثر جبران می‌کند. افزون بر این، مش آرماتور حیاتی به دلیل مدفون بودن در داخل دال بتنی، به‌خوبی در برابر حریق عایق شده است. این سازوکار پایدارکننده را می‌توان مشابه وارد کردن نیرو به تویی مرکزی یک چرخ دوچرخه در حالت افقی دانست؛ حالتی که در آن، پره‌ها بار اعمالی را در کشش و طوقه چرخ آن را در فشار تحمل می‌کنند.



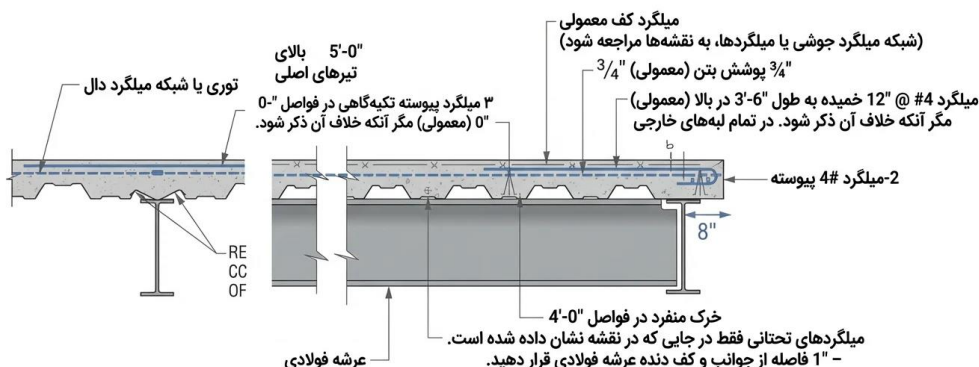
شکل ۴-۱. توزیع عایق سازه‌ای در طرح ۳. منبع: Heger & Simpson Gumpertz (۲۰۱۹).

نکته: عایق با رنگ آبی نشان داده شده است؛ محدوده سقف با رنگ قرمز مشخص شده است.

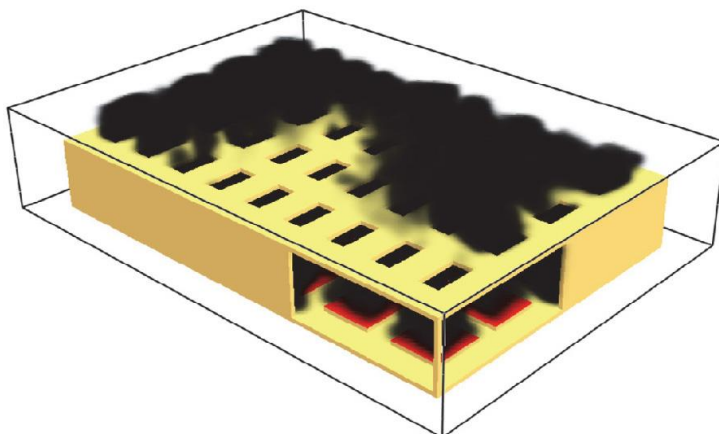


شکل ۴-۲. اتصال تیر مرزی نمونه: (a) اسمی و (b) تقویت شده.

منبع: Heger & Simpson Gumpertz (۲۰۱۹).

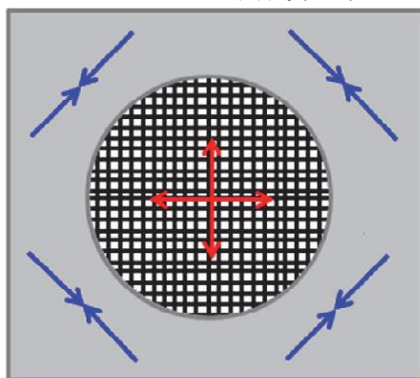


شکل ۳-۴. محل قرارگیری مش دال و جزئیات لبه. منبع: Heger & Simpson Gumpertz (۲۰۱۹).



شکل ۴-۴. عملکرد در پیچه‌های حرارتی سقف (مدل CFD).

منبع: Heger & Simpson Gumpertz (۲۰۱۹) و نرم‌افزار © ۲۰۱۹ NIST Fire Dynamics Simulator (FDS).



شکل ۴-۵. کنش غشایی کششی/فشاری پایدار شده در دال کف (مش ناحیه مرکزی در داخل بتن نمایان شده است).

منبع: Heger & Simpson Gumpertz (۲۰۱۹).