

فصل ۱

مقدمه

۱.۱ اهداف و چشم‌انداز

پس از این‌که در سال ۱۹۶۸، رونان پوینت^۱، که یک ساختمان ۲۲ طبقه در لندن بود، فرو ریخت، برای اولین بار توجه مهندسين به خرابی نامتناسب^۲ یا خرابی پیش‌رونده^۳ جلب شد (وزارت مسکن و فرمانداری محلی، ۱۹۶۸). حوادث ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ (NISTNCSTAR، ۲۰۰۵) که طی آن، برج‌های دوقلو^۴ در نیویورک فرو ریخت، اتفاق برجسته‌ی دیگری در تحقیق و معیارهای طراحی جدید برای مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده‌ی ساختمان بودند. این حادثه سبب شد تا چندین محقق بر روی دلایل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌ها متمرکز شوند تا روش‌های معقول ارزیابی و بهبود استحکام سازه تحت رویدادهای شدید را بیابند. حمله‌ی ۱۱ سپتامبر هم‌چنین سبب افزایش الزام راهنمای طراحی جدید به جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در انواع مختلف سازه‌ها شد.

پس از خرابی رونان پوینت، راهنمای طراحی سازه‌ای جزئی‌تر مانند برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در انگلستان و ایالات متحده توسعه یافته‌اند که برخی از آن‌ها عبارتند از مقررات ساختمان بریتانیا^۵ (دولت بریتانیا، ۲۰۱۳) و استاندارد ۵۹۵۰ بریتانیا (موسسه‌ی استانداردهای بریتانیا^۶، ۲۰۰۱) در انگلستان و راهنمای دپارتمان دفاع^۷ (DOD، ۲۰۰۹) و مدیریت سرویس‌های عمومی^۸ (GSA، ۲۰۰۳) در ایالات متحده.

به عنوان یک مهندس طراح، تضمین این‌که معیارهای مناسب در فرایند طراحی یک سازه به منظور جلوگیری از خرابی پیش‌رونده‌ی آن در نظر گرفته شده باشد، ضروری است. هم‌چنین یک مهندس باید توانایی تحلیل پتانسیل خرابی پیش‌رونده در یک سازه را با استفاده از روش‌ها و نرم‌افزار تحلیلی داشته باشد.

از این رو این کتاب با هدف کمک به مهندسين یا دانشجویان مهندسی سازه به منظور شناخت کامل راهنمای طراحی و فرایندهای تحلیل مربوطه طراحی شده است. از آن‌جایی که تحلیل خرابی پیش‌رونده یک فرایند متمایز و پیچیده است، معمولاً به توانایی استفاده از یک بسته‌ی تجاری المان محدودی مدرن نیاز است.

1 Ronan Point

2 Disproportionate collapse

3 Progressive collapse

4 Twin Towers

5 British Building Regulations

6 British Standards Institution (BSI)

7 Department of Defense (DOD)

8 General Services Administration

این کتاب یک معرفی دقیق در مورد استفاده برنامه‌های المان محدودی مانند آباکوس^۱، سپ^۲ ۲۰۰۰ و ایتبس^۳ در این نوع از تحلیل مشخص کرده است. علاوه بر این نمونه‌های مطالعاتی بر اساس انواع مختلف سازه‌ها مانند ساختمان‌های چند طبقه، سازه‌های فضاکار با دهانه‌ی بلند و پل‌ها برای نشان دادن مکانیزم‌های خرابی و روش‌های کاهش موثر در عرف طراحی فراهم آمده‌اند.

در فصل ۱ تعاریف خرابی نامتناسب و خرابی پیش‌رونده مشخص شده است و با تعریف استحکام و راهنمای طراحی مرتبط در سراسر دنیا ادامه یافته است.

در فصل ۲ چندین حالت خرابی پیش‌رونده‌ی ساختمان‌های چند طبقه بیان شده است. در این فصل به طور ویژه بر دلیل و مکانیزم خرابی برج دوقلو تمرکز شده است. علاوه بر این روش‌های تحلیل و طراحی مرتبط برای جلوگیری از خرابی نامتناسب ساختمان‌های چند طبقه معرفی شده است. در پایان این فصل، یک نمونه مدل‌سازی از تحلیل خرابی پیش‌رونده‌ی برج‌های دوقلو با استفاده از نرم‌افزار چند منظوره‌ی آباکوس ارائه شده است.

در فصل ۳ چندین حادثه‌ی فروریزش سازه‌های با دهانه‌های بلند معرفی شامل خرابی فرودگاه چارلز دی گاوله^۴ و ساختمان‌های فضاکار دیگر معرفی شده‌اند. دلیل و مکانیزم خرابی سازه‌ی فضاکار نیز بیان شده است. در پایان این فصل، مثل‌سازی یک نمونه از تحلیل خرابی پیش‌رونده‌ی یک شبکه‌ی دولایه‌ای با استفاده از آباکوس ارائه شده است.

در فصل ۴ چندین حادثه‌ی خرابی پل‌ها با توجه به دلایلی مانند ضربه‌ی کامیون^۵ و یک زلزله معرفی شده‌اند. پس از آن، این رویدادها که سبب فروریزش شده‌اند با جزئیات بررسی می‌شود و روش‌های طراحی و تحلیل مرتبط برای جلوگیری از خرابی نامتناسب معرفی می‌شوند. در پایان، یک نمونه‌ی مدل‌سازی از تحلیل خرابی پیش‌رونده‌ی پل میلانو^۶ با استفاده از آباکوس ارائه شده است.

فصل ۵، اطلاعات عمومی در مورد آتش را پوشش می‌دهد. با توجه به این موضوع، حوادث خرابی ساختمان‌ها به دلیل آتش‌سوزی و روش‌های تحلیل و طراحی مرتبط برای طراحی سازه‌ی آتش و جلوگیری از خرابی نامتناسب معرفی شده‌اند. در پایان این فصل، یک نمونه‌ی مدل‌سازی از تحلیل سازه‌ی آتش مرکز تجارت جهانی^۷ با استفاده از آباکوس ارائه شده است.

1 Abaqus

2 SAP2000

3 Etabs

4 Charles de Gaulle Airport

5 Lorry strike

6 Millau Bridge

7 World Trade Center

در فصل ۶، حوادث خرابی ساختمان‌ها بر اثر بارگذاری انفجار^۱ معرفی می‌شوند. در این فصل اطلاعات عمومی از بارگذاری انفجار بیان می‌شود تا خوانندگان بتوانند بارگذاری انفجار و پاسخ اجزای ساختمان و چگونگی دسته‌بندی سطح خرابی را درک نمایند. در پایان این فصل، یک نمونه‌ی مدل‌سازی از تحلیل سازه‌ای انفجار ساختمان فدرال آلفرد موراه^۲ با استفاده از آباکوس ارائه شده است.

۲.۱ تعریف خرابی پیش‌رونده یا خرابی نامتناسب

تا کنون عبارت‌های "خرابی پیش‌رونده" و "خرابی نامتناسب" در بسیاری از مقالات فنی مشاهده شده‌اند و تعاریف مختلفی از آن‌ها وجود دارد. این موضوع درک اختلاف مشخص بین آن‌ها را دشوار می‌سازد.

در این جا تعاریفی از این دو عبارت که از نظر نویسنده دقیق‌ترین آن‌ها هستند، ارائه شده است. خرابی پیش‌رونده به این صورت تعریف می‌شود: "گسترش خرابی محلی اولیه از المان به المان که در نهایت منجر به خرابی کل سازه یا به صورت نامتناسب بخش عظیمی از آن می‌گردد" (ASCE, ۲۰۰۵). خرابی نامتناسب به این صورت تعریف می‌شود: "یک خرابی در اثر خسارت‌های کوچک یا فعالیت‌های کوچک‌تر که منجر به خرابی یک قسمت نسبتاً بزرگ از سازه می‌گردد" (آگروال^۳ و انگلند^۴, ۲۰۰۸).

با توجه به تعریف بالا می‌توان مشاهده کرد که خرابی نامتناسب به فضای ناحیه‌ی خرابی اشاره می‌نماید؛ به عبارت دیگر یک ناحیه‌ی خرابی کوچک به یک ناحیه‌ی بزرگ و غیر قابل کنترل گسترش می‌یابد. خرابی پیش‌رونده معمولاً به نوعی از فرآیند خرابی اشاره می‌گردد که در آن المان‌های سازه‌ای به ترتیب یکی پس از دیگری تخریب می‌شوند. این بدان معناست که خرابی پیش‌رونده می‌تواند در یک ناحیه‌ی نسبتاً کوچک بدون این‌که سبب خرابی کل سازه شود، رخ دهد. بنابراین اغلب از عبارت "خرابی نامتناسب" در راهنمای طراحی، به عنوان هدف اصلی جلوگیری از خرابی در ساختمان در یک ناحیه‌ی بزرگ و غیر قابل کنترل، استفاده می‌شود.

اگر چه با توجه به درک نویسنده، در عرف طراحی خرابی نامتناسب معمولاً به صورت پیش‌رونده رخ می‌دهد و بیش‌تر خرابی‌های پیش‌رونده در نهایت منجر به خرابی نامتناسب می‌گردند. بنابراین نیازی به تفاوت قائل شدن میان آن‌ها نیست و از این رو در این کتاب، آن‌ها به شرایط یکسانی اطلاق می‌گردند.

1 Blast loading

2 Alfred P. Murrah Federal Building

3 Agarwal

4 England

۳.۱ تعریف استحکام

"استحکام"^۱ یک عبارت مهم دیگر در طراحی مقاوم در برابر خرابی پیش‌رونده است. بر اساس آیین‌نامه‌ی اروپا BS EN ۱۹۹۰ (BSI، ۲۰۱۰، صفحه ۲۶) تعریف "استحکام" به این صورت آورده شده است: "یک سازه باید به صورتی طراحی و اجرا گردد که به وسیله‌ی حوادثی مانند انفجار^۲، ضربه^۳ و عواقب اشتباهات انسانی به مقدار نامتناسب با دلیل اصلی آسیب نبینند." بنابراین در فرآیند طراحی سازه، حفظ استحکام سازه یک امر طراحی مهم است که معمولاً توسط برخی از مهندسين طراح چشم‌پوشی می‌گردد. در این کتاب، روش دقیق برای به دست آوردن استحکام معرفی شده است.

۴.۱ دلایل خرابی پیش‌رونده و حوادث خرابی در انواع مختلف سازه‌ها

یک خرابی پیش‌رونده ممکن است با توجه به الگوی بار و سیستم سازه‌ای و نیز نوع، موقعیت و شدت رخداد غیرعادی دلیل خرابی، در اثر مکانیزم‌های خرابی مختلفی رخ دهد. انواع مختلفی از عوامل مانند برخورد وسایل، ضربه‌ی هواپیما و آتش و انفجارهای گاز وجود دارند که نمونه‌هایی از خطرات ممکن و بارهای غیرعادی هستند که می‌توانند سبب این خرابی شوند.

چندین نمونه‌ی معروف حوادث خرابی پیش‌رونده با توجه به عوامل ایجادکننده‌ی مختلف وجود دارند. برای خرابی ساختمان، فروریزش برج‌های دوقلو در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ به دلیل برخورد هواپیما یکی از آنهاست. خرابی مرکز تجارت جهانی ۷ که پس از مدتی از آن روز به دلیل آتش ایجاد شده در اثر واریزه‌های برج‌های دوقلو به وقوع پیوست. خرابی بخشی از ساختمان رونان پوینت به دلیل انفجار گاز در لندن در سال ۱۹۶۸ رخ داد و یک انفجار منجر به خرابی بخشی از ساختمان فدرال آلفرد مورا در شهر اوکلاهاما در سال ۱۹۹۵ شد. برای سازه‌های فضاکار، یک خرابی معروف مربوط به فرودگاه پاریس وجود دارد. قاب فضاکار مرکز تجمع هارتفورد^۴ در ایالات متحده در سال ۱۹۷۸ به دلیل برف سنگین فرو ریخت. خرابی پل نیز یک دیگر از حوادث تقریباً رایج است؛ دلایل این خرابی بارگذاری ضربه‌ای ناشی از برخورد یک قایق یا بار بیش از اندازه‌ی کامیون‌هاست. یک نمونه از خرابی‌های اخیر پل مربوط به خرابی پیش‌رونده‌ی پل معلق^۵ کوتای کارتانگارا^۶ در بورنئوی شرقی^۷ در اندونزی می‌باشد.

1 Robustness

2 Explosion

3 Impact

4 Hartford Civic Center

5 Suspension bridge

6 Kutai Kartanegara

7 East Borneo

به منظور کمک به درک کامل مکانیزم این حوادث خرابی، این حوادث به طور دقیق در فصول ۲ تا ۶ بررسی خواهند شد که در آن مباحث سیستم سازه‌ای سازه‌های فروریخته شده، دلیل اصلی خرابی و روش‌های محتمل کاهش به منظور جلوگیری از اتفاقات و خرابی‌های مشابه در آینده پوشش داده شده‌اند.

حوادث خرابی بالا سبب خسارات جانی و مالی شدند. بنابراین، به عنوان مهندس، این وظیفه‌ی ماست که از بروز خرابی در طراحی‌هایمان ممانعت نماییم تا به یک طراحی بهتر که از خرابی پیش‌رونده جلوگیری نماید، دست یابیم.

۵.۱ راهنمای طراحی موجود برای جلوگیری از خرابی نامتناسب

در عرف طراحی موجود، چندین آیین‌نامه و راهنمای طراحی در سراسر دنیا به منظور جلوگیری از خرابی نامتناسب استفاده می‌شود. اگر چه بیش‌تر آن‌ها برای طراحی ساختمان‌هاست، تعداد کمی هم برای طراحی‌های پل و سازه‌های فضاکار وجود دارند. یک معرفی کوتاه از این راهنماها در ادامه آورده شده است.

۱.۵.۱ راهنمای طراحی بریتانیا و اروپا

انگلستان اولین کشور در جهان است که یک راهنمای طراحی برای جلوگیری از خرابی نامتناسب ساختمان‌ها منتشر کرد. الزامات مقررات ساختمان انگلستان (دولت انگلستان، ۲۰۱۳) به منظور پیش‌گیری از خرابی نامتناسب می‌باشند. این الزامات در آیین‌نامه‌های طراحی خاص مواد و استاندارد ۵۹۵۰ بریتانیا برای فولادکاری^۱ سازه‌ای تصحیح شده‌اند. این الزامات را می‌توان در قالب سه روش زیر توصیف کرد:

۱. شروط تجویزی "نیروی مهار کششی"^۲ که به منظور جلوگیری از خرابی نامتناسب در نظر گرفته شده‌اند.

۲. شروط حذف فرضی عضو تنها در صورتی که الزامات نیروی کششی ارضا نگردد.

۳. شروط المان کلیدی برای اعضای به کار می‌رود که حذف فرضی آن‌ها سبب عبور آسیب از حدود تجویزی شده باشد.

مطابق این راهنمای طراحی، مهندسين در طول فرآیند طراحی باید از مطابقت تمام ساختمان‌های طراحی شده با استاندارد ۱-۵۹۵۰ بریتانیا ویرایش ۲۰۰۰، بند ۵.۴.۲، "یکپارچگی سازه"^۳ (موسسه‌ی استانداردهای بریتانیا، ۲۰۰۱) مطمئن شوند. مهارهای کششی کافی در قاب به منظور کاهش احتمال خرابی پیش‌رونده، مطابق مقررات ساختمان، مشارکت خواهند کرد. المان‌های کلیدی باید برای تحمل بار طراحی اتفاقی ۳۴ کیلونیوتن بر متر مربع طراحی شوند. همچنین آیین‌نامه‌ی اروپا، الزامات دقیق‌تری مانند آیین‌نامه‌ی ۱۹۹۰

1 Steelwork

2 Tying force

3 Structural Integrity

BS EN اروپا (موسسه‌ی استانداردهای اروپا، ۲۰۱۰)، ENV ۱۹۹۱-۱-۷ (موسسه‌ی استانداردهای اروپا، ۲۰۰۶) و ENV ۱۹۹۱-۲-۷ (۲۰۰۶) دارد. این الزامات مشابه آن چه در راهنمای طراحی بریتانیا وجود دارد، هستند (ENV ۱۹۹۱-۱-۷ و ENV ۱۹۹۱-۲-۷).

۲.۵.۱ راهنمای طراحی ایالات متحده

ایالات متحده در زمره‌ی چند کشور اول در جهان است که راهنمای دقیق طراحی برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در طراحی ساختمان را منتشر کرده است. راهنماهای طراحی برای طراحی مقاوم در مقابل خرابی پیش‌رونده را در چندین مرجع دولتی ایالات متحده می‌توان یافت. دپارتمان دفاع (DOD، ۲۰۰۹) و مدیریت سرویس‌های عمومی (GSA، ۲۰۰۳)، دستورالعمل‌های دقیق را در مورد روش‌های طراحی برای مقاومت در مقابل خرابی پیش‌رونده‌ی سازه‌های ساختمان ارائه می‌نماید. هر دو مرجع از روشی به نام روش مسیر متناوب^۱ به منظور تضمین کفایت مقاومت در مقابل خرابی پیش‌رونده استفاده می‌نماید. این روش مستقل از خطر^۲ می‌باشد که در آن حالات حذف ستون تعریف می‌شود که بر اساس آن‌ها، ستون ساختمان حذف و پاسخ تحلیل می‌گردد. همچنین بارهایی که باید برای تحلیل سازه‌ی آسیب دیده در نظر گرفته شوند، تجویز شده است. نسبت ظرفیت تقاضا^۳ (DCR) هر عضو اصلی و ثانویه به منظور تعیین پتانسیل خرابی پیش‌رونده، محاسبه می‌شود. جزییات بیش‌تر در فصل ۲ ارائه می‌گردد.

روش دپارتمان دفاع (۲۰۰۹) بر اساس سطوح دلخواه محافظت، خیلی کم، کم، متوسط یا بالا، می‌باشد. بیش‌تر سازه‌های ساختمان در دو دسته‌بندی اول فرو می‌ریزند و تنها سازه‌هایی با استفاده‌ی خاص یا خطر بالای غیرمعمول در دو دسته‌ی آخر خراب می‌شوند. بر خلاف APM، این روش نیز از روش نیروی مهار کششی استفاده می‌شود.

SEI/ASCE ۷-۰۵ (ASCE، ۲۰۰۵) تنها استاندارد عمومی در ایالات متحده است که الزام طراحی برای خرابی پیش‌رونده را دارد. این استاندارد دو روش برای مقابله با خرابی پیش‌رونده را ارائه می‌کند: روش طراحی مستقیم و روش طراحی غیرمستقیم.

در روش طراحی مستقیم نیاز است تا مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده مستقیماً در طول فرآیند طراحی با استفاده از حالات (۱) APM که به دنبال ایجاد یک الگوی بار فرعی پس از خرابی محلی است که بر اساس آن خرابی محل متوقف و از خرابی اصلی جلوگیری شود. (۲) روش مقاومت محلی ویژه^۴ که به دنبال ایجاد مقاومت کافی برای مقاومت در برابر خرابی در موقعیت‌های بحرانی است، در نظر گرفته می‌شود.

1 Alternate Path Method (APM)

2 Threat-independent

3 Demand Capacity Ration (DCR)

4 Specific local resistance

در روش طراحی غیرمستقیم شروط حداقل سطح پیوستگی مقاومت و شکل‌پذیری اعضای سازه‌ای مورد نیاز است. بنابراین نیاز است تا یک مهندس یکپارچگی سازه را فراهم آورد و اتصالات شکل‌پذیر را برای این‌که سازه، تغییرشکل‌های بزرگ را تحمل و مقدار زیادی از انرژی را تحت شرایط بارگذاری غیرعادی جذب نماید، طراحی کند.

موسسه ملی استانداردها و تکنولوژی^۱ (۲۰۰۷)، دستورالعمل‌های دقیق را برای کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده در ساختمان‌ها ارائه می‌دهد. این منبع شامل یک روش مورد قبول برای خرابی پیش‌رونده است که متشکل از تعریف خطر، کنترل حادثه و طراحی سازه‌ای برای مقاومت در مقابل حوادث مرتبط می‌باشد. همچنین توصیف دقیق برای روش طراحی مانند روش‌های مستقیم و غیرمستقیم و روش مقاومت محلی ویژه (مشابه با روش المان کلیدی) موجود می‌باشد.

۳.۵.۱ راهنمای طراحی کانادا

CSA-S8۰۰ تنها استاندارد کاناداست که شامل ضوابط صریح و دقیق کاهنده‌ی خرابی نامتناسب در ساختمان‌هاست. (دراپور^۲، ۲۰۱۴). این منبع یک استاندارد برای طراحی و ارزیابی ساختمان‌ها تحت بارهای انفجاری است؛ اگر چه شامل شرایطی برای پیش‌گیری از خرابی پیش‌گیرنده و شکست ترد نیز می‌باشد.

این استاندارد، آسیب تحت بارهای ناشی از یک انفجار را محدود می‌نماید و بیش از یک راهنمای عمومی طراحی در مقابل خرابی نامتناسب، شروطی با هدف پیش‌گیری از وقوع خرابی نامتناسب پس از انفجار دارد.

به عنوان نتیجه می‌توان گفت که این شرایط بر اساس روش مستقل از خطر اشاره شده در راهنمای ایالات متحده نیست. فرآیند ارزیابی خطر و ریسک مورد بحث قرار گرفته است. بنابراین، سازه با پتانسیل آسیب‌پذیری در مقابل انفجار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا نحوه‌ی سازش مورد انتظار سازه مشخص شود و اساس آغاز تحلیل‌های مورد نیاز خرابی نامتناسب شکل گیرد.

۴.۵.۱ راهنمای طراحی چین

جامعه‌ی معماران چین یک کمیته‌ی ویژه برای تألیف یک معیار طراحی برای جلوگیری از خرابی ساختمان‌ها تشکیل دادند (لی^۳ و دیگران، ۲۰۱۴). روش‌های طراحی و تحلیل برای جلوگیری از خرابی ناشی از زلزله، خرابی پیش‌رونده، خرابی ناشی از آتش‌سوزی و خرابی ناشی از اشکال اجرایی در این راهنما توضیح داده شده

^۱ National Institute of Standards and Technology (NIST)

^۲ Driver

^۳ Li

است. مقدار تقاضا برای مقاومت در مقابل خرابی پیش‌رونده بر اساس روش انرژی تعیین می‌شود و مقاومت در برابر خرابی ناشی از زلزله منطبق بر تحلیل دینامیکی افزاینده^۱ است.

برای خرابی ناشی از آتش، این معیار الزام می‌کند که سازه بتواند به مدت زمان طولانی مناسب در مقابل آتش بدون خرابی مقاومت کند. سه روش معرفی شده‌اند: روش مولفه‌ی ساده شده، روش الگوی بار جایگزین و تحلیل پیشرفته برای تمام فرآیند آتش. جلوگیری از خرابی ناشی از انفجار اغلب با بهبود نگهداری سازه‌ها به دست آمده است و طراحی خاصی برای جلوگیری از انفجار در سازه‌ی اصلی وجود ندارد.

^۱ Incremental Dynamic Analysis (IDA)

منابع

- ASCE (American Society of Civil Engineers). 2005. Minimum design for buildings and other structures. SEI/ASCE 7-05. Washington, DC :American Society of Civil Engineers.
- Agarwal, J., and England, J. 2008. Recent developments in robustness and relation with risk. *Structures and Buildings*, 161(SB4), 183–188.
- BSI (British Standards Institution). 2001. Structural use of steelwork in buildings. Part 1: Code of practice for design—rolled and welded sections. BS 5950. London: BSI.
- BSI (British Standards Institution). 2010. Eurocode—Basis of structural design: Incorporating corrigenda December 2008 and April 2010. BS EN 1990: 2002 + A1: 2005. London: BSI.
- CSA (Canadian Standards Association). 2012. Design and assessment of buildings subjected to blast loads. CSA-S850-12. Ontario: CSA. 810-1.
- Driver, R.G. 2014. Canadian disproportionate collapse design provisions and recent research developments. Presented at Structures Congress 2014, Boston, April 3–5.
- DOD (Department of Defense). 2009. Design of buildings to resist progressive collapse. UFC 4-023-03. Arlington, VA: Department of Defense, July 14.
- GSA (General Services Administration). 2003. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. Washington, DC: GSA.
- HM (Her Majesty's) Government. 2013. The Building Regulations 2010: Structure, A3: Disproportionate collapse. Approved Document A, 2004 edition, incorporating 2004, 2010, and 2013 amendments. London: HM Government.
- Li, Y., Ren, P.Q., and Lu, X.Z. 2014. Development of the design specification for the collapse prevention of buildings in China. Presented at Structures Congress 2014, Boston, April 3–5.
- Ministry of Housing and Local Government. 1968. Report of the inquiry into the collapse of flats at Ronan Point, Canning Town. London: Her Majesty's Stationery Office.
- NIST (National Institute of Standards and Technology). 2007. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. Gaithersburg, MD: NIST, Technology Administration, U.S. Department of Commerce.
- NIST (National Institute of Standards and Technology) NCSTAR (National Construction Safety Team). 2005. Federal building and fire safety investigation of the World Trade Center disaster. Final report of the National Construction Safety Team on the Collapses of the World Trade Center towers. Gaithersburg, MD: NIST, December.

طراحی خرابی پیش‌رونده و تحلیل ساختمان‌های چند طبقه

۱,۲ مقدمه

امروزه با رشد طراحی ساختمان‌های چند طبقه و به خصوص پروژه‌های ساختمان‌های بلند نیاز است توجه بیش‌تر به جلوگیری از خرابی پیش‌رونده گردد. در انگلستان، الزامات ملی برای طراحی ساختمان‌های بلندتر از یک ارتفاع مشخص تبیین شده است و یک گزارش تحلیل خرابی پیش‌رونده‌ی جداگانه به منظور تحویل به دپارتمان کنترل ساختمان به منظور بررسی نیاز است. این کار به دلیل آسیب‌پذیرتر بودن ساختمان‌های بلند در حمله‌های تروریستی است. همانطور که در فصل ۱ بیان شد، راهنماهای طراحی در انگلستان و ایالات متحده و نیز آیین‌نامه‌ی اروپا، همگی الزامات دقیق برای محافظت سازه در مقابل خرابی پیش‌رونده را در هنگام طراحی آن ارائه می‌کنند. بنابراین، در این فصل تحلیل دقیق خرابی پیش‌رونده و روش طراحی ساختمان‌های چند طبقه معرفی می‌شوند.

برای مهندسان، انجام تحلیل خرابی پیش‌رونده با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود مانند آباکوس و سپ ۲۰۰۰، آسان‌تر از محاسبات دستی است. بنابراین برای یک مهندس آگاهی از روش مدل‌سازی تحلیل خرابی پیش‌رونده، ضروری می‌باشد. لذا در این فصل، مدل‌سازی دقیق و روش تحلیل ساختمان‌ها با استفاده از آباکوس نشان داده شده است.

۲,۲ حوادث خرابی پیش‌رونده‌ی ساختمان‌ها در سراسر دنیا

در این بخش، چند حادثه‌ی خرابی پیش‌رونده در سراسر دنیا معرفی و دلایل فروریزش و مکانیزم‌های خرابی هر کدام بررسی شده است.

۱,۲,۲ خرابی ساختمان رونان پوینت

رونان پوینت (وزارت مسکن و فرمانداری محلی، ۱۹۶۸) یک برج ۲۲ طبقه در نیوهم، در شرق لندن بود. در سال ۱۹۶۸، یک انفجار گاز سبب خرابی یک دیوار باربر^۱ شد که همین اتفاق منجر به خرابی تمام قسمت گوشه‌ی ساختمان شد (شکل ۱,۲).

1 Load-bearing wall

یکی از دلایل اصلی وقوع خرابی پیش‌رونده، سیستم سازه‌ای ساختمان می‌باشد. برج رونان پوینت با استفاده از یک روش قدیمی که به نام سیستم پنل بزرگ^۱ شناخته می‌شود، ساخته شده است. در این سیستم، تمامی دیوارها، طبقات و راه‌پله‌ها پیش‌ساخته^۲ بودند. مقاطع بزرگ پیش‌ساخته‌ی بتنی از کارگاه به حمل و در محل اجرای ساختمان با بولت^۳ به هم متصل می‌شوند. مهارهای بیش‌تری برای سازه طراحی نمی‌گردد. در طول فرآیند طراحی، به غیر از بار ثقلی، تنها فعالیت بار باد در نظر گرفته می‌شود. بارهای تصادفی مانند انفجار در نظر گرفته نمی‌شود (پیرسون^۴ و دلاته^۵، ۲۰۰۵).

بررسی نشان داد که انفجار با توجه به فشار کم‌تر از ۶۸/۹ کیلونیوتن بر متر مربع، شدید نبوده است (لوی^۶ و سالوادوری^۷، ۱۹۹۲). اگر چه بر اساس کمبود فراوانی سازه‌ای، الگوی بار جایگزین برای طبقات بالایی طراحی نشده است. این ساختمان، در آن زمان با توجه به آیین‌نامه‌های ساختمان بدون در نظر گرفتن پتانسیل خرابی پیش‌رونده طراحی شده است. دلیل دیگر ضعف اجرای صفحات کششی متصل به دیوار بود که در آن کاگران مهره‌های گل‌میخ‌های اتصال را سفت نکرده بودند.



شکل ۱،۲ خرابی رونان پوینت

1 Large Panel System (LPS)

2 Precast

3 Bolt

4 Pearson

5 Delatte

6 Levy

7 Salvadori

۲,۲,۲ خرابی مرکز تجارت جهانی

در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، برج‌های دوقلو (به نام‌های مرکز تجارت جهانی (WTC1) و مرکز تجارت جهانی ۲ (WTC2)) در اثر برخورد دو هواپیمای ربوده شده به آن‌ها تخریب شدند (NIST NCSTAR^۱، ۲۰۰۵). این اتفاق یکی از حوادث خرابی پیش‌رونده‌ی معروف آتش ناشی از واریزه‌های سقوط کرده از برج‌های دوقلو فروریخت (شکل ۲,۲). در مورد WTC7 در فصل ۵ بحث خواهد شد.



شکل ۲,۲ خرابی مرکز تجارت جهانی

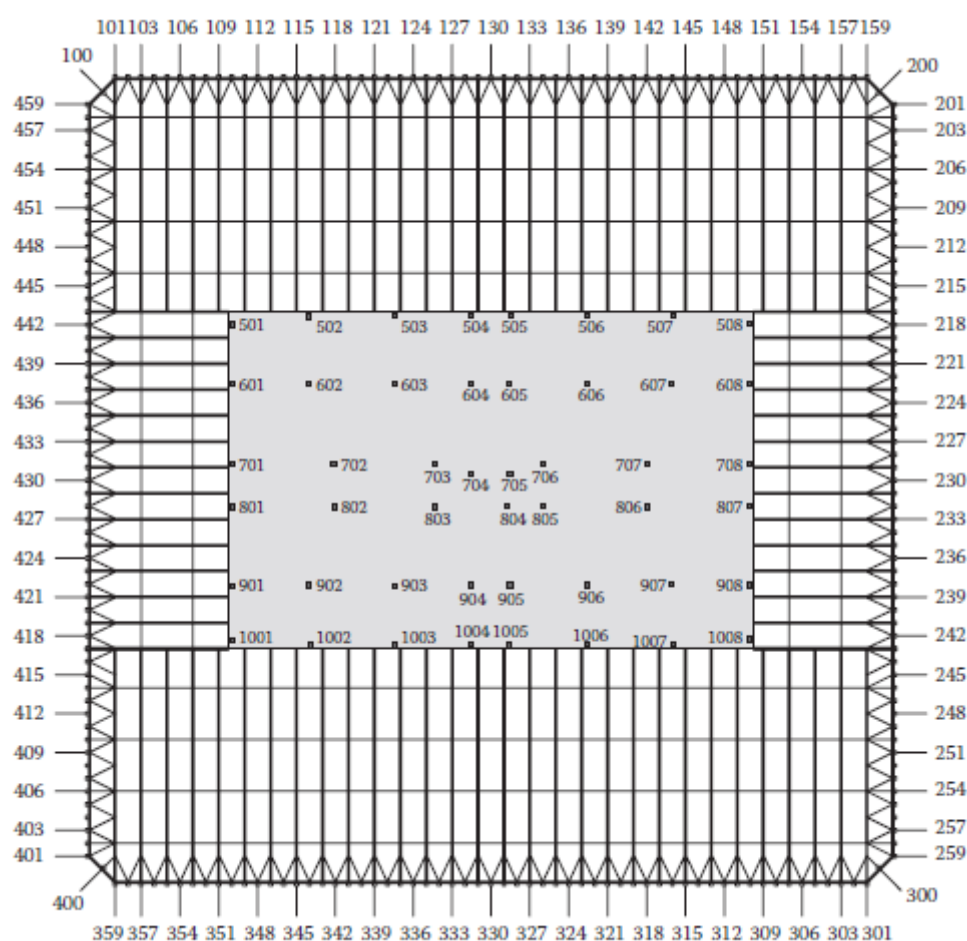
برج‌های WTC1 و WTC2 به عنوان سازه‌های با سیستم لوله‌ای^۲ مطابق شکل ۳,۲ طراحی شده‌اند. این روش یکی از سیستم‌های مقاوم جانبی برای ساختمان‌های بلند است که در آن از ستون‌های پیرامونی نزدیک به هم در اطراف هسته‌هایی در مرکز استفاده می‌شود. بالاتر از طبقه‌ی دهم مطابق شکل، ۵۹ ستون پیرامونی در هر طرف ساختمان و ۴۷ ستون سنگین‌تر در مرکز وجود داشتند. یک منطقه‌ی بزرگ بدون ستون بین هسته و

^۱ National Construction Safety Team Act Reports (NCSTAR)

^۲ Tube-in-tube

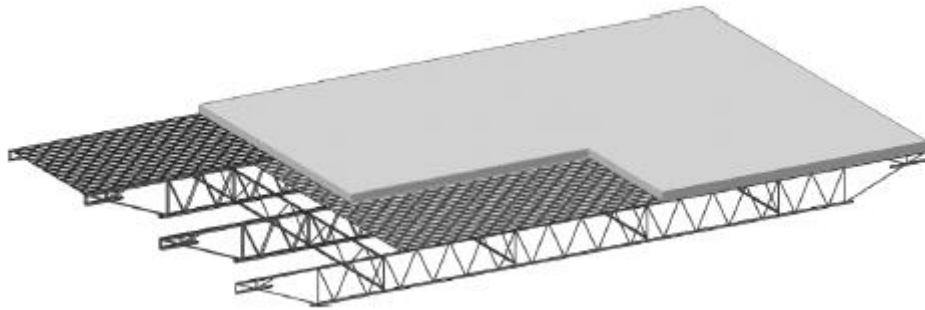
پیرامون وجود داشت که مطابق شکل ۴,۲ با خرپاهای سقف پیش ساخته پوشانده شده بود. همچنین به منظور مقاوم‌تر کردن هسته، بین طبقات ۱۰۷ تا ۱۱۰ از شمع^۱های خرپایی مرسوم مورد استفاده قرار گرفته بود.

همانطور که دوباره در شکل ۴,۲ می‌توان مشاهده کرد، سیستم سقف از دال‌های بتنی سبک با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با یک عرشه‌ی فولادی^۲ که روی پل‌های خرپایی و خرپاهای اصلی قرار گرفته است، تشکیل می‌یابد که یک نمونه از سیستم سقف کامپوزیت^۳ است.



شکل ۳,۲ نمونه‌ی طرح سقف مرکز تجارت جهانی ۱. (از NIST NCSTAR، ساختمان فدرال و بررسی ایمنی آتش‌سوزی فاجعه‌ی مرکز تجارت جهانی، گزارش نهایی تیم ملی ایمنی ساخت در مورد خرابی برج‌های مرکز تجارت جهانی، گایسبرگ، ماریلند: NIST، دسامبر ۲۰۰۵، شکل ۳,۱، با اجازه)

¹ Outrigger
² Steel deck
³ Composite
⁴ Gaithersburg, MD



شکل ۴،۲ نمونه‌ی سیستم سقف مرکز تجارت جهانی. (از NIST NCSTAR، ساختمان فدرال و بررسی ایمنی آتش‌سوزی فاجعه‌ی مرکز تجارت جهانی، گزارش نهایی تیم ملی ایمنی ساخت در مورد خرابی برج‌های مرکز تجارت جهانی، گایسبرگ، ماریلند^۱: NIST، دسامبر ۲۰۰۵، شکل ۱-۶، با اجازه)

خرپاها به وسیله‌ی ستون‌های یک در میان در پیرامون قرار گرفته‌اند. سقف‌ها به همراه میراگرهای ویسکوالاستیک^۲ به ورق‌های سه‌گوش^۳ پیرامونی متصل شده بودند.

تمام سیستم قاب فولادی شامل هسته‌ی فلزی و ستون‌های پیرامونی، با استفاده از اسپری مواد مقاوم در برابر آتش محافظت شده‌اند.

یک بررسی دقیق توسط موسسه‌ی ملی استانداردها و تکنولوژی انجام شده است (NIST NCSTAR، ۲۰۰۵). نقش آتش‌سوزی‌ها ذکر شده است و مشخص شده است که سقف‌های شکم داده به سمت ستون‌های پیرامونی کشیده می‌شوند: "این اتفاق سبب خم شدن داخلی ستون‌های پیرامونی و خرابی قسمت جنوبی مرکز تجارت جهانی ۱ و قسمت شرقی مرکز تجارت جهانی ۲ شد که آغازگر خرابی هر کدام از برج‌ها بود" (NIST NCSTAR، ۲۰۰۵).

۳،۲ کمینه کردن تهدید یا خطر برای پتانسیل خرابی

با توجه به حوادث بالا می‌توان مشاهده کرد که کاهش تهدید حمله‌ی تروریستی از ابتدا یک ایده‌آل بوده است؛ اگرچه پیش بینی زمان و روش وقوع یک حمله‌ی تروریستی دشوار است.

1 Gaithersburg, MD
2 Viscoelastic dampers
3 Spandrel

۱,۳,۲ ارزیابی تهدید و آسیب‌پذیری

بر اساس ۴۲۶ FEMA (DHS, ۲۰۰۳)، یک مهندس در حالتی که تهدید و خطر یک نوع مشخص از ساختمان شناسایی شود، می‌تواند ارزیابی آن‌ها را انجام دهد. پس از این‌که تهدید یا خطر موردانتظار مشخص شد، ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان می‌تواند