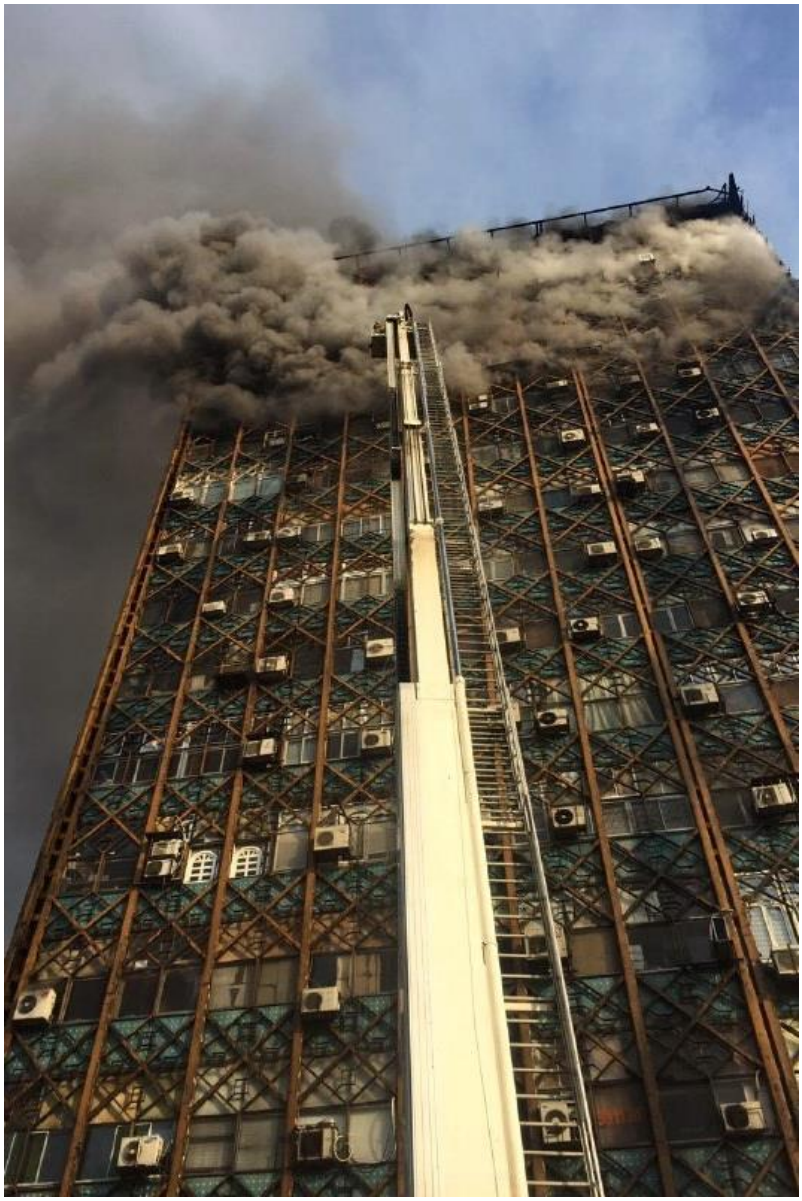

تخریب پیشرونده

علیرضا فاروقی

استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

عضو اصلی و مدرس انجمن مهندسی زلزله ایران (IEEA)

عضو شبکه جهانی شبیه سازی مهندسی زلزله (NEES)

عضو انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE)

عضو کارگروه نرم افزار مقررات ملی ساختمان

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

تعریف تخریب پیشرونده

تخریب پیش‌رونده عبارت است از شکست کل سازه و یا بخش نسبتاً وسیع یا مهمی از آن، ناشی از حوادث محلی مانند شکست در یک یا چند عضو باربر ثقلی و یا جانبی و عدم توانایی اعضای مجاور برای باز توزیع اضافه بار از طریق مسیری که بتواند پایداری و پیوستگی کلی را حفظ کند. مطابق تعریف ASCE 7 تخریب پیشرونده عبارت است از پخش شدن شکست اولیه محلی از المانی به المان دیگر که نتیجه آن تخریب کل سازه و یا بخش وسیع نامتناسبی از آن است.

تخریب پیشرونده شاخه‌ای از تحقیقات است که در چند سال اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. حملات تروریستی به برج‌های دوقلوی مرکز تجارت جهانی در سپتامبر ۲۰۰۱ و تخریب پیشرونده در این ساختمان‌ها باعث توجه بسیاری از محققان و دولتمردان به این موضوع شده است. اهمیت این موضوع تا این حد می‌باشد که ظرف ده سال گذشته ضمن وارد شدن موضوع طراحی در برابر تخریب پیشرونده در بسیاری از آیین نامه‌های طراحی، دستورالعمل‌های ویژه‌ای نیز تهیه و تدوین شده است که در همین مدت چند بار مورد ویرایش و بازبینی قرار گرفته است.

تخریب پیش‌رونده عکس العمل‌های زنجیروار از شکست می‌باشد که توسط از دست رفتن یک و یا تعدادی از اجزای باربر آغاز می‌شود. عامل شروع تخریب پیش‌رونده می‌تواند عامل‌هایی انسانی مانند انفجار، آتش‌سوزی و برخورد وسایل نقلیه و یا خطرهای طبیعی مانند زلزله باشد. وقتی که یک عضو باربر سازه‌ای دچار شکست یا از دست دادن مقاومت می‌شود، بار عضو از طریق مسیری جایگزین به اعضای مجاور منتقل می‌شود. آزاد شدن انرژی داخلی به دلیل حذف عضو سازه‌ای منجر به افزایش نیروهای داخلی دینامیکی در اعضای مجاور می‌شود. باز توزیع نیروهای داخلی سازه از طریق مسیرهای انتقال بار منجر به حمل بار اضافی ناشی از حذف عضو سازه‌ای توسط سایر اعضای سازه‌ای می‌شود. اگر اضافه بار توزیع شده از ظرفیت تحمل اعضای صدمه دیده مجاور تجاوز کند، ممکن است شکست محلی دیگری را به وجود آورد. چنین شکست‌های پیاپی ممکن است از المانی به المان دیگر پخش شود و سرانجام به تخریب کل سازه و یا بخش وسیعی از آن منجر شود.

بعضی از محققین بین عبارت تخریب پیشرونده و تخریب نامتناسب تمایز قائل می‌شوند. تخریب پیش‌رونده، تخریب کل و یا قسمتی از یک سازه است که به وسیله صدمه و یا شکست قسمت به نسبت کوچکی از آن شروع

faroughi@gmail.com

و تسریع شده است و تخریب نامتناسب تخریب سازه‌ای است که نسبت به عامل اولیه نامتناسب می‌باشد [Nair, 2006].

تاریخچه تخریب پیشرونده

موضوع تخریب پیش‌رونده اولین بار در سال ۱۹۶۸ و بعد از تخریب بخشی از ساختمان رونان در نیوهام انگلستان مطرح شد [Griffiths et al.,1968]. این موضوع برای اولین بار باعث گردید تا برخی کشورها نظیر بریتانیا و کانادا استانداردهایی برای جلوگیری از خرابی پیشرونده تنظیم نمودند. در ۱۹۷۶ دستورالعملهای ساختمانی بریتانیا الزام نمود ساختمان‌ها طوری طراحی شوند که خرابیهای نامتناسب را با یکپارچه کردن اعضای سازه‌ای، افزودن درجه نامعینی و فراهم کردن مقاومت کافی برای مقابله با بارهای غیرعادی، تحمل کرده و در برابر آن مقاومت کنند. این الزامات به منظور ساخت سازه‌های مقاوم، شکل‌پذیر و با توانایی باز توزیع بارهای وارده تنظیم گردید. به مدت سه دهه و پیشرفت‌های نسبتاً کم در موضوع تخریب پیش‌رونده، تخریب ساختمان مورا در شهر اوکلاهما در سال ۱۹۹۵ باعث توجه دوباره محققین به این موضوع شد [FEMA 427,1996].

مهم‌ترین و معروف‌ترین نمونه، تخریب پیش‌رونده برج‌های تجارت جهانی WTC است که به وسیله حملات هوایی در سپتامبر ۲۰۰۱ مورد اصابت قرار گرفتند و به صورت زنجیری کاملاً منهدم شدند [NIST,2005]. این سه نمونه از تخریب پیش‌رونده مراحل مهمی را در توسعه تحقیقات و توصیه‌های دستورالعمل‌ها و الزامات آیین‌نامه‌ها و استانداردها برای جلوگیری از تخریب پیش‌رونده رقم زدند.

نمونه‌هایی از تخریب پیشرونده

تخریب برج رونان پوینت[1]

در ۱۶ می۱۹۶۸، نشت گاز از فر خوراک پزی در گوشه آشپزخانه طبقه ۱۸ در ساختمان ۲۲ طبقه با سیستم پیش ساخته و دیوارهای باربری بتنی در نیوهام انگلستان منجر به شکست نامتناسب در این ساختمان شد. فشار انفجار گاز باعث پرتاب دیوارهای خارجی به طرف بیرون شده و پانل پیش ساخته باربر گوشه ساختمان را جا به جا کرده بود. شکست چشمه گوشه به سمت بالا و پایین گسترش یافته و کل ارتفاع ساختمان را در برگرفته و

[1] Ronan Point

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

شکست نامتناسب به وجود آورده است. در این حادثه چهار نفر کشته و هفده نفر زخمی شدند. [Griffiths et al., 1968] (شکل شماره۱)

شکل ۱ خرابی پیشرونده در ساختمان رونان انگلستان -en.wikipedia.org/wki/Ronan-Point

همانطور که ذکر شد، به صورت خاص شکست در این ساختمان منجر به تغییراتی در آیین نامه‌های انگلستان و کانادا شد.

ساختمان تجاری خط آسمان [۲]

در ۲ مارچ ۱۹۷۳ در ساختمان خط آسمان و در هنگام بتن ریزی در طبقه ۲۴ یک خرابی پیشرونده رخ می‌دهد همچنین در اثر ضربه‌های مخروبه‌ها، خرابی پیشرونده افقی در کل گاراژ پارکینگ کنار برج اتفاق می‌افتد (شکل شماره ۲).

[2] Skyline plaza

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

شکل ۲ خرابی پیشرونده در ساختمان تجاری خط آسمان- matdl.org/failureccases

بمب‌گذاری ساختان مرا در شهر اوکلاهما[3]

نمونه عینی از خرابی پیشرونده در اثر بمب‌گذاری در تاریخ ۱۹۹۵، ۱۹ آپریل در ساختمان فدرال مورا در اوکلاهما سیتی اتفاق افتاد. انفجار بمب باعث تخریب سه ستون پیرامونی شده که نتیجه آن تخریب‌های پی در پی بوده است. تیر حمالی که روی ستون‌های آسیب دیده حمل می‌شد، منهدم شده و کف‌های بالایی و پانل‌های بام در یک مدل پیشرونده منهدم شدند[Nair, 2004].

خسارت عمده سازه‌ای در طرف شمالی ساختمان که روبروی انفجار بوده متمرکز شده بود. انفجار در حدود نیمی از فضای قابل سکونت ۹ طبقه ساختمان فدرال را تخریب کرده در نتیجه انفجار عظیم که فروریزش ساختمان را نیز به دنبال داشت، ۱۶۸ نفر کشته و ۸۰۰ نفر زخمی شدند.

[3] Murrah Federal Building

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

شکل ۳ خرابی پیشرونده در ساختمان فدرال مورا–media-3web.britannica.com/eb-media

تخریب مرکز تجارت جهانی WTC

تخریب برج‌های مرکز تجارت جهانی در ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱، باعث توجه بسیار بیشتری به موضوع تخریب پیشرونده شد [NIST, 2005]. هرکدام از برج‌های WTC در شهر نیویورک بوسیله یک بویینگ ۷۶۷ خطوط هوایی مورد حمله قرار گرفتند و در مدت زمان کوتاهی به دلیل وزن بسیار زیاد قسمت‌های بالایی محل برخورد به طور کل منهدم شدند. از آنجا که تخریب ساختمان به وسیله یک ضربه خیلی بزرگ و آتش ایجاد شده بود، این مورد تخریب پیش‌رونده بود نه تخریب نامتناسب. تخریب باعث مرگ ۳۰۰ نفر و صدمات بسیار وسیع به مجموعه مجاور شد [Dusenberry et al., 2004]. در هر دو برج توالی تخریب مشابهی رخ داد. قسمت صدمه دیده ساختمان منهدم شد و منجر شد قسمت‌های بالایی آن بر روی قسمت پایینی بیفتند و باعث یک خرابی پیشرونده در جهت پایین شوند (شکل۴). این تخریب نشان داد که ساختمان‌های خوب طراحی شده و پایدار مدرن در برابر تخریب پیشرونده آسیب‌پذیر می‌باشند.

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

شکل ۴ خرابی پیشرونده در برجهای تجارت جهانی–www.nrc.nl/inbeeld/2011/09/11

در ادامه بحث به تاریخچه تحقیقاتی که در خصوص تخریب پیشرونده مورد مطالعه قرار گرفته اند، اشاره خواهد شد.

تحقیقات کلی و بنیادی اخیر پژوهشگران

اولین تحقیقات درباره تخریب پیشرونده بعد از فروریختن قسمتی از ساختمان رونان توسط گریفیث و همکاران ارائه شد [Griffith et.,1968]. در این گزارش مؤلفان به بررسی تخریب پیشرونده در ساختمان رونان پرداختند. اما موثرترین پدیده، بمب‌گذاری در ساختمان فدرال مورا در الکلاهماسیتی در سال ۱۹۹۵ بود باعث کشته و زخمی شدن نزدیک به ۱۰۰۰ نفر از ایجاد خسارت در بیش از ۳۰۰ ساختمان شد. ارزیابی‌ها نشان داد که بیشتر از ۸۰ درصد تلفات وارده به دلیل تخریب ساختمان بوده است نه خود انفجار. این ساختمان یک تیر حمال در جبهه روبرویی انفجار داشته که بار ۱۰ ستون فوقانی را به پنج ستون تحتانی منتقل می‌کرد.

انفجار یکی از ستون‌های خارجی طبقه اول را منهدم کرده و به چند ستون دیگر آسیب رسانده بود. حذف یک ستون در طبقه اول به معنی شکست در سه ستون بالای آن بوده و فقدان مسیر بار جایگزین باعث شروع تخریب پیش‌رونده نیمه جلویی ساختمان شده است[Nair,2004],[FEMA277,1996].

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

کاملترین طبقه‌بندی تخریب پیشرونده براساس مکانیسم تخریب توسط استاروسک انجام شده است. در این تحقیق مؤلف چهار دسته و شش نوع تخریب پیشرونده معرفی کرده است که برای هر کدام مشخصه‌هایی ذکر شده است. بر طبق این تحقیق انواع تخریب پیشرونده عبارتند از[Starossek,2007]:

۱- تخریب یا تخریب فروریزشی[4]، که بارزترین مثال آن برج‌های مرکز تجارت جهانی می‌باشند. مشخصه این نوع تخریب از دست رفتن کامل سیستم باربری ثقلی می‌باشد. از دیگر موارد مشخصه این نوع خرابی می‌توان موارد زیر را برشمرد:

الف) خرابی اولیه در المان‌های باربر عمودی اتفاق می‌افتد.

ب) جداشدگی جزئی و کامل و سقوط به صورت آوار.

ج) تغییر انرژی پتانسیل به جنبشی و ضربه اجزای سقوط کرده به سایر اجزا.

د) شکست در اعضا در اثر ضربه و تخریب پیشرونده به صورت عمودی.

Fig. 2.1 Pancake-type collapse of a ten-storey building triggered by an earthquake (Islamabad, 2005)

شکل ۵ خرابی پنکیکی یا فروریزشی

[4] Pancake-type

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

۲- تخریب زیپی [5]، مشخصه این نوع تخریب این است که نیروهای اصلی عامل تخریب، در جهت عمود بر جهت گسترش تخریب می‌باشند. تخریب پل‌های کابلی مانند پل Tacoma Narrows در اثر باد و تخریب تیرهای سراسری چند دهانه نمونه‌های این نوع تخریب می‌باشند. فرآیند در این نوع خرابی عبارتست از:

الف) شکست در یک یا چند المان سازه‌ای.

ب) باز توزیع نیروهای این المان‌ها در سایر المان‌های سازه‌ای.

ج) بارگذاری ضربه‌ای به دلیل شکست ناگهانی و پاسخ دینامیکی سازه.

د) تخریب پیشرونده در جهت عمود بر نیروهای اصلی عامل شکست اعضا.

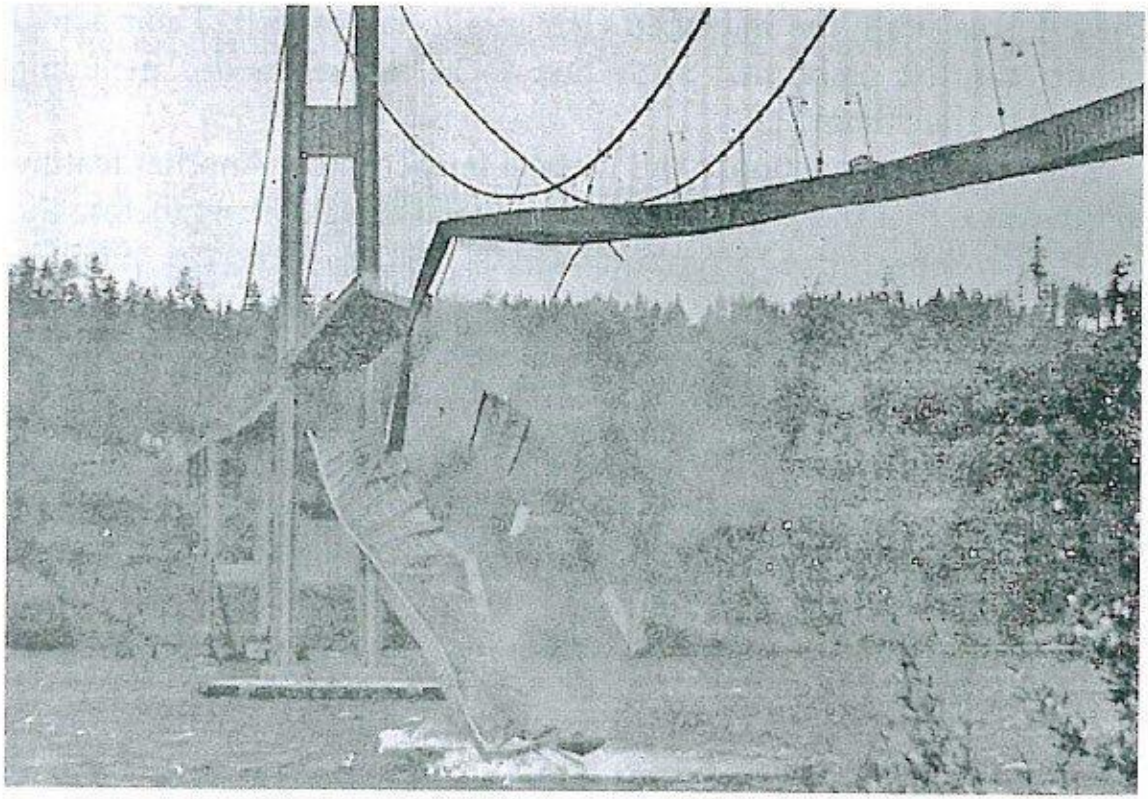

Fig. 2.2 Zipper-type collapse of the Tacoma Narrows Bridge, triggered by wind-induced vibrations (Washington, 1940)

شکل ۶ خرابی زیپی

[5] Zipper-type

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

۳- تخریب دومینویی [۶]، این نوع تخریب از نظر فرآیند و اهمیت شبیه تخریب فروریزشی (Pancake) می‌باشد. در این نوع تخریب نیروهای اصلی در المان‌های خراب شده، عمود بر جهت تخریب می‌باشد. این نوع تخریب در گروهی از ساختمان‌های مجاور لاغر در زلزله‌های پیشین مشاهده شده است. فرآیند این نوع تخریب به ترتیب زیر است:

الف) واژگونی اولیه یک المان.

ب) سقوط المان به صورت چرخش حول یک نقطه.

ج) تولید انرژی جنبشی و برخورد المان به اعضای مجاور.

د) واژگونی اعضای مجاور و شروع تخریب پیشرونده.

Fig. 2.3 Domino-type collapse of overhead transmission line towers triggered by ice accretion (Germany, 2005). (Source: picture-alliance/dpa/dpaweb. Photograph: Franz-Peter Tschauner, © dpa)

شکل ۷ خرابی دومینویی

[6] Domino-type

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

۴- تخریب مقطعی [۷]، این نوع تخریب مشابه تخریب زیپی می‌باشد با این تفاوت که در این حالت، تخریب در مقطع المان اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال گسیختگی تیر بتن آرمه تحت اثر ممان خمشی، هنگامیکه تعدادی از میلگردهای تیر تحت کشش گسیخته می‌شود بارها بین قسمت‌های باقی مانده مقطع باز توزیع می‌شوند. اضافه بار و ضربه ناشی از ان باعث گسترش خرابی به کل مقطع می‌شود.

۵- تخریب ناپایداری [۸]، این نوع تخریب بیشتر شامل تخریب کمانش فشاری می‌باشد. مانند کمانش فشاری مهاربند که منجر به ناپایداری کل سیستم می‌شود. در این نوع تخریب شکست اولیه در اعضایی که پایداری اعضای باربر را تأمین می‌کنند منجر به ناپایداری فشاری عضو شده و با شکست ناگهانی این عضو تخریب پیشرونده اتفاق می‌افتد. نمونه این نوع تخریب کمانش سخت کننده‌های ورق‌های فولادی و در نتیجه کمانش خود ورق می‌باشد.

۶- تخریب مرکب [۹]، در این نوع تخریب ترکیبی از انواع تخریب اتفاق می‌افتد مانند تخریب ساختمان فدرال مورا که ترکیبی از تخریب فروریزشی و دومینویی بود (Pancake-Domino type). همچنین تخریب پل Haeng-Ju Grand در سئول کره جنوبی در سال ۱۹۹۲ ترکیبی از تخریب زیپی–دومینویی بود. مؤلف در این تحقیق شش نوع انهدام پیشرونده را در چهارطبقه براساس مکانیسم تخریب قرار داده است. در طبقه اول تخریب‌های پیش‌رونده ناشی از باز توزیع نیروها قرار داده شده‌اند که تخریب‌های مقطعی و زیپی جزو این طبقه می‌باشند. طبقه دوم شامل تخریب ضربه‌ای می‌باشد که تخریب‌های فروریزشی و ضربه‌ای از این دسته می‌باشند. تخریب‌های ناپایداری و مرکب نیز جزو طبقه‌های سوم و چهارم این دسته‌بندی می‌باشند.

تخریب ساختمان مورا باعث شد تا موضوع تخریب پیشرونده دوباره در بحث و بررسی‌های مهندسان و دولت مردان قرار بگیرد و بسیاری از مطالعات بعد از این حادثه توسط آژانس‌های دولتی انجام شده زیرا اینگونه تصور می‌شد که ساختمان‌های دولتی بیشتر در معرض چنین خطرهایی هستند.

[7] Section-type
[8] Instability-type
[9] Mixed-type

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

رویکردهای طراحی در برابر تخریب پیشرونده

ضوابط دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌ها

تخریب پیشرونده از این نظر دارای اهمیت است که صدمات محلی ممکن است باعث تخریب وسیع و تخریب سیستم سازه‌ای شود. اولین حادثه تخریب پیشرونده در سال ۱۹۶۸ منجر به تدوین ضوابطی برای جلوگیری از تخریب پیشرونده در آیین‌نامه‌های بریتانیا و کانادا شد. در سال‌های اخیر گسترش حملات تروریستی، نیاز مبرمی را برای کمیته‌های تدوین‌کننده آیین‌نامه‌ها و آژانس‌های دولتی در ایالات متحده و سایر کشورها به وجود آورد تا دستورالعمل‌های طراحی و معیارهایی را که برای جلوگیری و یا به حداقل رساندن پتانسیل تخریب پیشرونده تهیه کنند.

آیین‌نامه ها، استانداردها و دستورالعمل‌های طراحی متعددی برای جلوگیری از تخریب پیش‌رونده وجود دارد:

American Society of civil Engineering (ASCE 7–05, 10), American concrete Institute (ACI 318 – 08, 11), National Building Code of Canada (NBCC, 2005), British Standards (BS, 2002,2005), New York City Building code (NYCBC, 1998), Interagency Security Committee (ISC, 2001), General Service administration (GSA, 2003), Department of Defense (DOD, 2005, 2013)

انجمن مهندسین عمران آمریکا ASCE 7

دو رویکرد کلی طراحی برای به حداقل رساندن پتانسیل تخریب پیشرونده در ASCE 7 – 10 تعریف شده است که عبارتند از: رویکرد طراحی غیر مستقیم و رویکرد طراحی مستقیم.

رویکرد طراحی غیر مستقیم

در رویکرد طراحی غیر مستقیم تلاش است تا از طریق فراهم کردن سطح حداقلی از مقاومت، پیوستگی و شکل‌پذیری، از تخریب پیشرونده سازه جلوگیری شود. بهبود جزئیات اتصالات، ارتقاء نامعینی و شکل‌پذیر کردن سازه نمونه‌هایی از این تلاش‌ها می‌باشد. پارامترهای مختلفی در طرح سازه و آرایش المان‌های آن می‌توانند اثرات مهمی بر مقاومت در برابر تخریب داشته باشند. مهم‌ترین پارامترها عبارتند از:

نیرومندی [10]، قابلیت سازه برای تحمل شکست‌های محلی

[10] Robustness

faroughi@gmail.com

یکپارچگی [11] ، شرایطی که در آن المان‌های سازه‌ای حتی در صورت اعمال بارهای غیرعادی متصل به همدیگر باقی می‌مانند.

پیوستگی [12] ، عبارت است از به هم پیوستگی المان‌های سازه‌ای در یک سیستم سازه‌ای. در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتن مسلح، پیوستگی به صورت جزئیات میلگردگذاری سراسری اشاره شده است.

شکل‌پذیری [13] ، قابلیت سازه‌ای برای تحمل تغییر شکل‌های اضافی بعد از رخ دادن خرابی اولیه و یا شرایط جاری شدن است به نحوی که ظرفیت باربری یکسانی در اعضای سازه‌ای و یا سیستم باقی می‌ماند.

نامعینی (افزونگی) [14] ، قابلیت المان‌های سازه ای برای تحمل بارهای اضافی ناشی از شکست در تعدادی از المان‌های دیگر می‌باشد. بدین معنی که در صورت شکست در یک یا چند المان، سایر المان‌ها و سیستم سازه باقی مانده به عنوان یک مجموعه بتوانند بار را تحمل کنند. همانطور که در بند ۲-۱-۱-۲ ذکر شد این قابلیت مهمترین اثر در پایداری هم در بارهای فوق العاده مانند زلزله و هم اینجا در بحث تخریب پیشرونده دارد و موضوع اصلی این پژوهش است.

روش طراحی غیر مستقیم در بیشتر آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی وارد شده است، اما باید توجه داشت که هدف از این الزامات بهبود عملکرد کلی سازه‌ها خصوصاً در برابر بارهای لرزه‌ای است. در هرصورت این روش برای طراحی در برابر تخریب پیشرونده روش کاملاً دقیقی نیست و هیچگونه التزامی در این روش برای حذف المان‌ها و یا بارهای ویژه در نظر گرفته نمی‌شود.

رویکرد طراحی مستقیم

رویکرد طراحی مستقیم صریحاً ضوابطی را در برابر تخریب پیشرونده در حین فرآیند طراحی را در نظر می‌گیرد. ASCE 7 دو روش برای طراحی مستقیم پیشنهاد کرده است، روش مقاومت محلی ویژه و روش مسیر بار جایگزین.

[11] Integrity
[12] Continuity
[13] Ductility
[14] Redundancy

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

روش مقاومت محلی ویژه

روش مقاومت محلی ویژه ملزم می‌کند که المان‌های سازه‌ای بحرانی باید قادر باشند که بارهای غیر عادی را تحمل کنند. در این روش، مقاومت و شکل‌پذیری المان بحرانی در حین فرآیند طراحی تعیین می‌شود.

آیین‌نامه بتن آمریکا ACI 318

ACI 318 شامل ضوابطی برای بهبود یکپارچگی سیستم سازه‌ای سازه‌های بتنی می‌باشد اما نامی به صورت ویژه از تخریب پیشرونده نبرده است.

آیین‌نامه کانادا NBCC

این آیین‌نامه توصیه‌هایی را برای کاهش خرابی پیشرونده با ایجاد طرح سازه‌ای مناسب، پیوستگی، فولادگذاری و مکانیزم‌های سازه‌ای ارائه می‌دهد:

الف) کم‌کردن ریسک پیش‌آمدها: جلوگیری از استفاده از مخازن گاز یا مواد انفجاری دیگر، ایجاد ضربه‌گیرها در برابر وسایق نقلیه.

ب) ایجاد شکل‌پذیری: توسط اتصالات شکل‌پذیر و قادر به تحمل تغییر شکل‌های زیاد و جذب انرژی تحت بارگذاری غیرعادی.

ج) طراحی در برابر بارهای غیرعادی برای اعضای کلیدی

د) مسیر جایگزین انتقال بار: اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین روش طراحی

استانداردهای انگلیسی BS

استانداردهای انگلیسی بر یکپارچه بودن اعضای سازه‌ای مختلف یک ساختمان با یکدیگر تاکید دارد همچنین اعضای کلیدی باید قادر به تحمل بار تصادفی به میزان 34 kpa باشند. برای سازه‌های بتنی، حذف فرضی دیوار در نظر گرفته می‌شود علاوه بر این، ساختمان‌ها باید برای بارهای افقی نیز طراحی گردند. برای سازه‌های بنائی بیش از ۵ طبقه، استانداردها گزینه‌های مسیر جایگزین انتقال بار، فقط کلاف‌های افقی، کلاف‌های افقی و عمودی را پیشنهاد می‌دهند.

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

دستورالعمل ساختمانی شهر نیویورک NYCBC

این دستورالعمل، اکثر مفاد متدولوژی خود را از استاندارد انگلیسی می‌گیرد و روش‌های طراحی ذیل را در برابر خرابی پیشرونده ارائه می‌نماید:

طراحی غیرمستقیم

طراحی مستقیم

روش جایگزین انتقال بار: حذف عضو کلیدی سازه در یک لحظه و تخمین پایداری سازه‌ها تحت ترکیب بار DL + 0.2 LL + 0.2 WL

روش مقاومت موضعی مشخص: مقاوم کردن اعضای کلیدی در برابر بارهای غیرعادی و غیرقابل پیش‌بینی

ISC – Security design criteria

این آیین‌نامه بر روش‌های طراحی مستقیم تاکید می‌کند و هیچ اشاره‌ای به روش غیرمستقیم یا اتصالات سازه‌ای نمی‌کند. همچنین آئین‌نامه ISC رویه‌های زیر را مدنظر قرار می‌دهد:

طراحی اقتصادی در برابر انفجار

استفاده از فولادگذاری متقارن هندسی (برای مقابله با انفجار)

استفاده از جزئیات شکل‌پذیر در اتصالات به خصوص در اتصالات عضو سازه‌ای

فولادگذاری برشی در برابر تغییر شکل‌های بزرگ

حداقل نمودن فواصل بین ستون‌ها (با حد بالای عملی ۹ متر)

حداقل نمودن ارتفاع طبقه (با حد بالای عملی ۵ متر)

جزئیات لرزه‌ای شکل‌پذیر و مسیر جایگزین انتقال بار برای طراحی در برابر خرابی پیشرونده، معمولاً به مقاومت در برابر انفجار کمک می‌کند.

تنها دو سازمان آمریکایی DOD وGSA بصورت صریح کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده را ارائه کرده‌اند. دستورالعمل‌های ارائه شده توسط DOD وGSA جامع‌ترین اطلاعات را در آمریکا در حال حاضر برای کاهش پتانسیل تخریب پیشرونده ارائه می‌کنند که شامل تهیه الزامات قابل سنجش و قابل اجرا می‌باشد.

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

دستورالعمل GSA

مؤسسه GSA آمریکا [15] دستورالعمل GSA را با عنوان «دستورالعمل تحلیل و طراحی تخریب پیشرونده برای ساختمان‌هایی جدید اداری فدرال و پروژه‌های نوسازی بزرگ» به منظور اطمینان از طرح پتانسیل تخریب پیشرونده در طراحی، برنامه‌ریزی و ساخت ساختمان‌های اداری جدید فدرال و پروژه‌های نوسازی بزرگ ارائه کرد [GSA, 2003].

در این دستورالعمل خرابی پیشرونده به این صورت تعریف می‌شود:

«وضعیتی که در آن شکست محلی اعضای سازه‌ای پیرامونی منجر به تخریب اعضای مجاور می‌شود و بنابراین خسارت کلی نامتناسب با علت اولیه آن می‌باشد»

هدف دستورالعمل جلوگیری از انتشار تخریب بعد از رخ دادن شکست محلی است. براساس GSA تحلیل تخریب پیشرونده با به کارگیری روش طراحی مسیر بار جایگزین انجام می‌شود. روش اصلی تحلیل در این دستورالعمل، تحلیل استاتیکی الاستیک خطی می‌باشد. روش خطی برای ساختمان‌های با ارتفاع کم تا متوسط با ۱۰ طبقه و کمتر و پیکربندی معمول انجام می‌شود. راهنمای GSA پیشنهاد می‌کند که برای ساختمان‌های بیشتر از ۱۰ طبقه روش غیرخطی در نظر گرفته شود.

دستورالعمل وزارت دفاع آمریکا DOD [16]

وزارت دفاع آمریکا سندی در قالب (Unified Facilities Criteria) چاپ کرده است. مطابق این سند ساختمان‌های جدید DOD با سه طبقه و بیشتر باید تخریب پیشرونده را در نظر بگیرند. دستورالعمل DOD (UFC 4-023-03) قابل اعمال به ساختمان‌های بتن مسلح، فولادی، بنایی، چوبی و ساختمان‌های فولادی سرد نورد شده می‌باشد.

[15] U.S General service Administration
[16] Department of Defense (UFC4-023)

faroughi@gmail.com

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

خلاصه روال طراحی مقاوم در برابر تخریب پیشرونده (UFC)

در طراحی و بهسازی ساختمانهای جدید و موجود، سطح طراحی در برابر تخریب پیشرونده وابسته به سطح کاربری ساختمان می‌باشد. سطح کاربری ساختمان یا بر اساس ضوابط سطوح عملکرد دستورالعمل و یا با توجه به خواست مالکین ساختمان تعیین می‌گردد.

مقررات طراحی این مجموعه ضوابط به شکلی تدوین شده است که با توجه به سطوح مختلف کاربری، امکان ایجاد سطوح مختلف مقاومت در برابر تخریب پیشرونده فراهم گردد. این سطوح مختلف طراحی در برابر تخریب پیشرونده از روشهای زیر استفاده می‌کنند:

الف) نیروهای کلافی: در این روش ظرفیت کششی برای سیستم کف و سقف تجویز میگردد، که امکان انتقال بارهای وارده از قسمت‌های تخریب شده را فراهم می‌کنند.

ب) روش مسیر جایگزین: در این روش سازه باید توانایی پل زدن بر بخش‌های تخریب شده را دارا باشد.

ج) مقاومت افزایش یافته: در این روش ظرفیت خمشی و برشی ستونها و دیوارها افزایش می‌یابند تا با کاهش احتمال گسترش خسارات، میزان حفاظت ساختمان را افزایش دهند.

الف- تعاریف سطوح کاربری (سطوح بهره برداری) مطابق UFC-4

الف) سطح کاربری(بهره برداری)۲ گزینه ۱: در این سطح طراح می‌بایست مقررات نیروهای کلافی را برای کل سازه بکار برده و مقاومت ستونها و دیوارهای گوشه و یکی مانده به آخر را با روش مقاومت بهبود یافته اصلاح نماید (ستون و دیوار یکی مانده به آخر نزدیکترین ستون و دیوار به ستون و دیوار گوشه می‌باشد).

ب) سطح کاربری(بهره برداری)۲ گزینه ۲: در صورتیکه مقررات مسیر جایگزین در این سطح کاربری انتخاب گردند، سازه می‌بایست توانایی پل زدن در صورت حذف یک به یک المانهای مشخص شده در پلان و در طبقات را دارا باشد. در صورتیکه مشخص گردد سازه قابلیت پل زدن در هنگام حذف یکی از المانها را دارا نمی باشد، می‌بایست سازه طراحی مجدد و یا بهسازی شده تا بتواند بصورت ایمن بارهای وارده را به سایر بخشهای سازه منتقل نماید. در صورتیکه نتایج تحلیل حذف المانها، بعلت نامعینی سازه مشابه باشند، در این صورت انجام تحلیل برای همه المانها ضروری نمی باشد اما می‌بایست تحلیل عادی در سازه انجام گرفته و بررسی انجام گرفته در

faroughi@gmail.com

مدارک فنی تشریح گردد. لازم به ذکر است که در سازه‌های دیوار باربر روش مسیر جایگزین مناسب ترین روش می‌باشد.

ج) سطح کاربری(بهره برداری)۳: برای سازه‌های دارای این سطح کاربری می‌بایست دو روش بکار گرفته شود. روش‌های مسیر جایگزین و روش بهبود ظرفیت باربری برای این سطح مناسب خواهند بود.

د) سطح کاربری(بهره برداری)۴: برای سازه‌ای دارای این سطح کاربری می‌بایست هر سه روش نیروهای کلافی، مسیر جایگزین و بهبود ظرفیت باربری بکار گرفته شود. برخی از سازه‌های سطح بهره برداری ۴ بعنوان سازه‌های محافظ طراحی می‌گردند و این سازه‌ها می‌توانند از تمامی استانداردهای حداقل مانند استاندار طراحی در برابر تخریب پیشرونده مستثنی گردند.

ب- روش مسیر بار جایگزین

روش مسیر جایگزین در دو حالت بکار برده می‌شود:

۱. برای گزینه ۱ از سطح بهره برداری ۲ و برای سطح بهره برداری ۴ زمانیکه یک المان باربر قائم نمی تواند مقررات مقاومت کلافی را تامین نماید، در این صورت طراح می‌تواند با استفاده از روش جایگزین تعیین نماید که آیا سازه پس از حذف اسمی المان قادر به پل زدن می‌باشد یا خیر.
۲. برای سطح برداری ۲ حالت۲، سطح بهره برداری ۳ و سطح بهره برداری ۴ برای حذف المانهای قائم بکارگرفته شود.

این روشها از فلسفه روش LRFD (ASCE 7) با بکاربردن ضرایب ترکیب بارنهایی در حالت فوق العاده و ضرایب مقاومت برای تعیین مقاومت استفاده می‌کند. سه روش تحلیل مجاز به استفاده می‌باشند:

الف) روش تحلیل استاتیکی خطی

ب) روش تحلیل استاتیکی غیرخطی

ج) روش تحلیل دینامیکی غیرخطی

این روشها بطور کلی از روش متداول ASCE 41 با تغییراتی جهت همخوانی با مسائل خاص تخریب پیشرونده پیروی می‌کنند.

علیرضا فاروقی
استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق

ج - تحلیل منطقی جایگزین

برای عملکرد طراحی و تحلیل مسیر جایگزین هیچ بخشی از این نوشتار نمی بایست به شکلی تفسیر گردد که استفاده از هر نوع روال تحلیل جایگزین که منطقی و بر اساس اصول و مقررات مهندسی مکانیک و دینامیک می‌باشد را ممنوع نماید. به عنوان مثال روشهای ساده‌ای که بر اساس تحلیل‌های دستی و یا برنامه صفحات گسترده تهیه می‌گردند در بعضی از انواع ساختمان نظیر ساختمانهای بنایی بسیار کارآمد می‌باشند و نتایج تمامی روش‌های منطقی تحلیل می‌بایست معیارهای پذیرش این مجموعه ظوابط که در بخش‌های مختلف آیین نامه UFC4-023 ارائه شده را تامین نمایند. تحلیلها می‌بایست با در نظر گرفتن بخش مناسب برای حذف ستونها و دیوارهای باربر مطابق آیین نامه UFC4-023 و ASCE 7 و حداکثر بار اضطراری با ضرایب افزایش UFC4-023 برای تحلیلهای استاتیکی خطی و غیرخطی بکار گرفته شوند. همچنین می‌بایست که معیارها قابل کاربرد و اجرا در تحلیل منطقی جایگزین باشند. تمامی پروژه هایی که با روش منطقی جایگزین انجام گرفته اند می‌بایست توسط مهندس یا شخص صاحب صلاحیت مستقل مورد قبول کارفرما مورد تائید قرار گیرد.

faroughi@gmail.com