

راهنمای محاسبه فشار مبنای انفجار و مدت زمان دوام

علیرضا فاروقی

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران شرق

بر مبنای مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان و
نشریه ک ۷۲۲ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مقدمه :

همانطور که در جدول ۲۱-۱-۳ مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان بدان اشاره شده است، فشار مبنای انفجار و فشار ناشی از انفجار درون زمینی و زمانهای دوام آن برای سطوح خطر متفاوت ارائه شده است. حال در این ضمیمه روشهای محاسبه این مقادیر برحسب خرج و فواصل انفجار ارائه می گردد:

۱- فشار مبنای هوایی (سطحی) P_{so}

این فشار متناسب با خرج انفجار و فاصله از یکی از روابط زیر محاسبه می گردد:

روابط براد

فشار مبنای انفجار P_{so} در حوزه نزدیک (وقتی P_{so} بزرگتر از ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع است) و در حوزه‌های میانی و یا دور (P_{so} بین ۰/۱ و ۱۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع) طبق روابط زیر می‌باشد:

$$p_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (p_{so} > 10 \text{ kg/cm}^2)$$

$$p_{so} = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad (0.1 < p_{so} < 10 \text{ kg/cm}^2)$$

در رابطه فوق:

Z = فاصله مقیاس شده مطابق رابطه زیر است.

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

R : فاصله خرج انفجار تا محل مورد نظر (متر)

W : وزن معادل خرج انفجار بر حسب وزن TNT معادل (کیلوگرم)

توضیح: مقدار فشار مبنا در رابطه براد بر اساس سعی و خطا تعیین می شود، یعنی ابتدا با حدس محدوده P_{so} از یکی از ۲ رابطه فوق محاسبه شده و چنانچه با محدوده مورد نظر تطابق نداشت به سراغ رابطه بعدی می رویم.

روابط هنریش

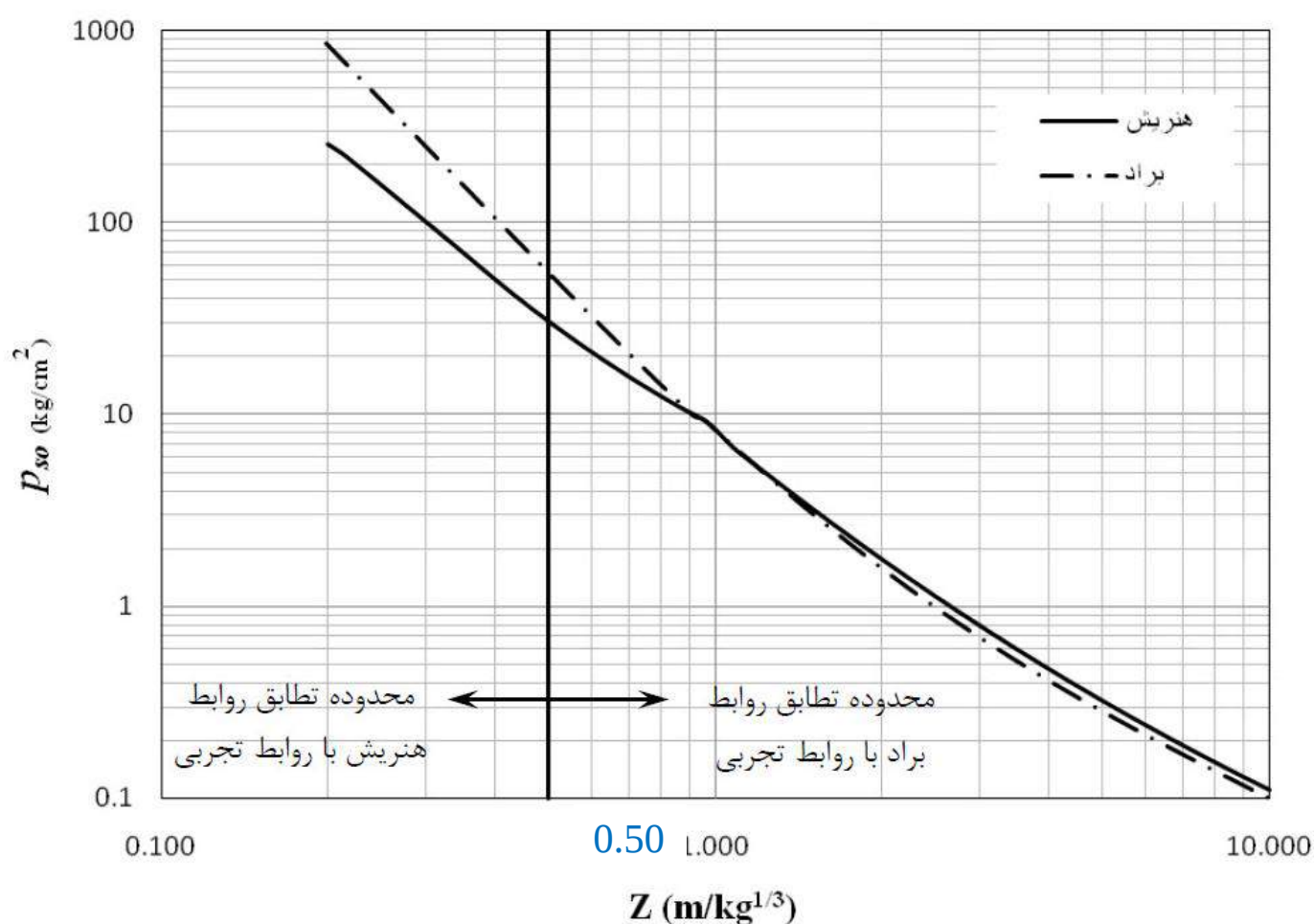
$$p_{so} = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.54}{Z^2} + \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \quad (0.05 \leq Z < 0.3)$$

$$p_{so} = \frac{6.194}{Z} + \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \quad (0.3 \leq Z < 1)$$

$$p_{so} = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \quad (1 \leq Z \leq 10)$$

روابط براد انطباق خوبی با نتایج تجربی برای فواصل میانی و دور از چشمه انفجار دارد، در حالیکه روابط هنریش برای انفجار حوزه نزدیک انطباق خوبی با نتایج تجربی از خود نشان می دهند به همین دلیل در این مبحث برای فواصل نزدیک ($Z \leq 0.5$) از رابطه هنریش و در فواصل میانی و دور ($Z > 0.5$) از نتایج رابطه براد استفاده می شود. فشار مبنا انفجار بر اساس فاصله مقیاس شده در شکل زیر نشان داده شده است.

مقایسه روابط براد و هنریش

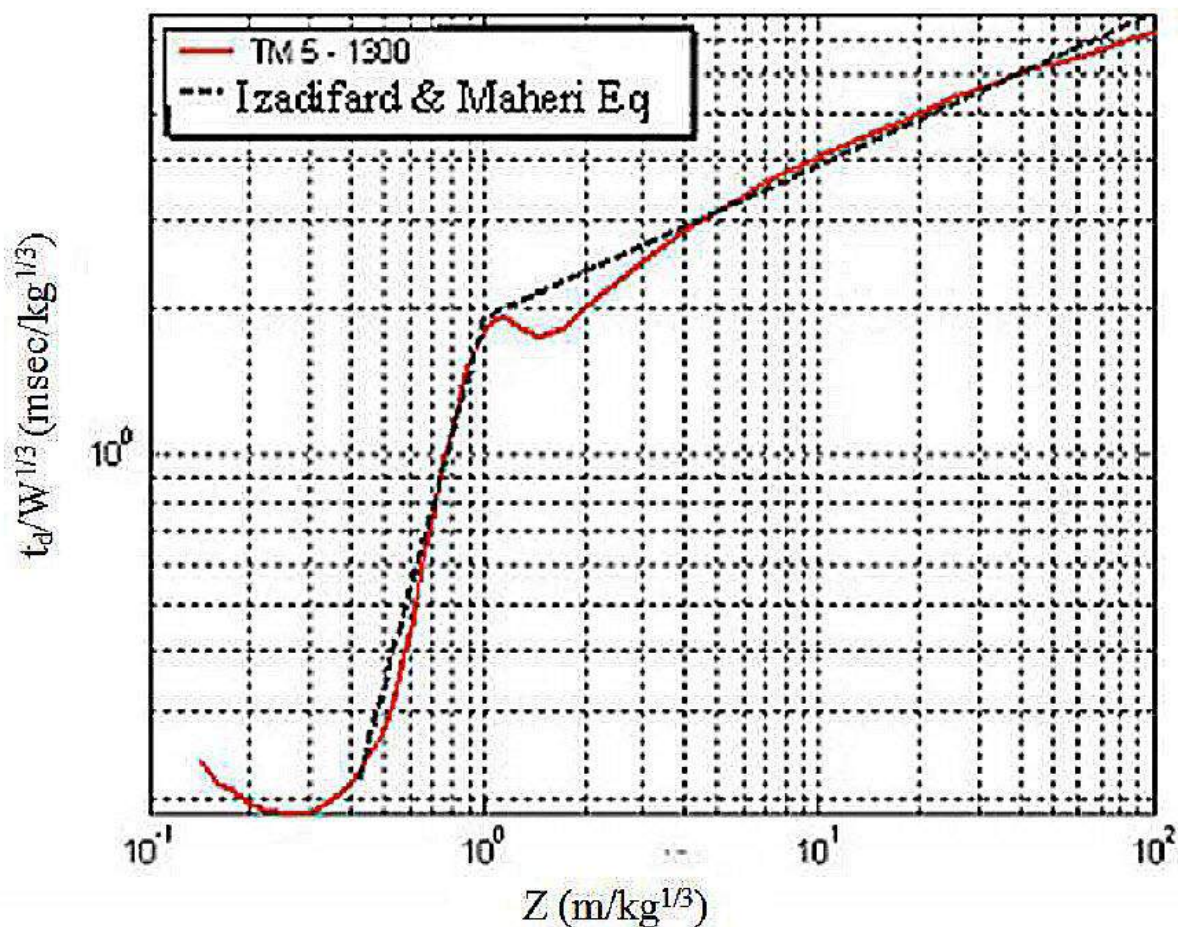


۲- مدت زمان دوام t_d

بدیهی است که مدت زمان اعمال بار، پارامتر مهمی در محاسبه پاسخ سازه است. از آنجا که در کارهای انفجاری از اثر فاز منفی صرف نظر می‌شود، لذا می‌توان مدت زمان فاز مثبت (t_d) را زمان تداوم انفجار فرض نمود. در آیین‌نامه TM۵-۱۳۰۰ نموداری برای محاسبه مدت زمان فاز مثبت (t_d) ارائه شده است. این نمودار توسط ایزدی فرد و ماهری با رابطه زیر ساده‌سازی شده است. در شکل زیر مقایسه رابطه ایزدی فرد و ماهری با TM۵-۱۳۰۰ ارائه شده است.

$$\log_{10}(t_d / W^{1/3}) = 2.5 \log_{10}(Z) + 0.28 ; \quad Z < 1$$

$$\log_{10}(t_d / W^{1/3}) = 0.3 \log_{10}(Z) + 0.28 ; \quad Z \geq 1$$



۳- محاسبه فشار وارد بر سازه

الف : فشار وارد بر دیوار مقابل انفجار برابر است با : (رابطه دقیق ۲-۳-۲۱)

$$P_{r\alpha} = C_{r\alpha} \times P_{so}$$

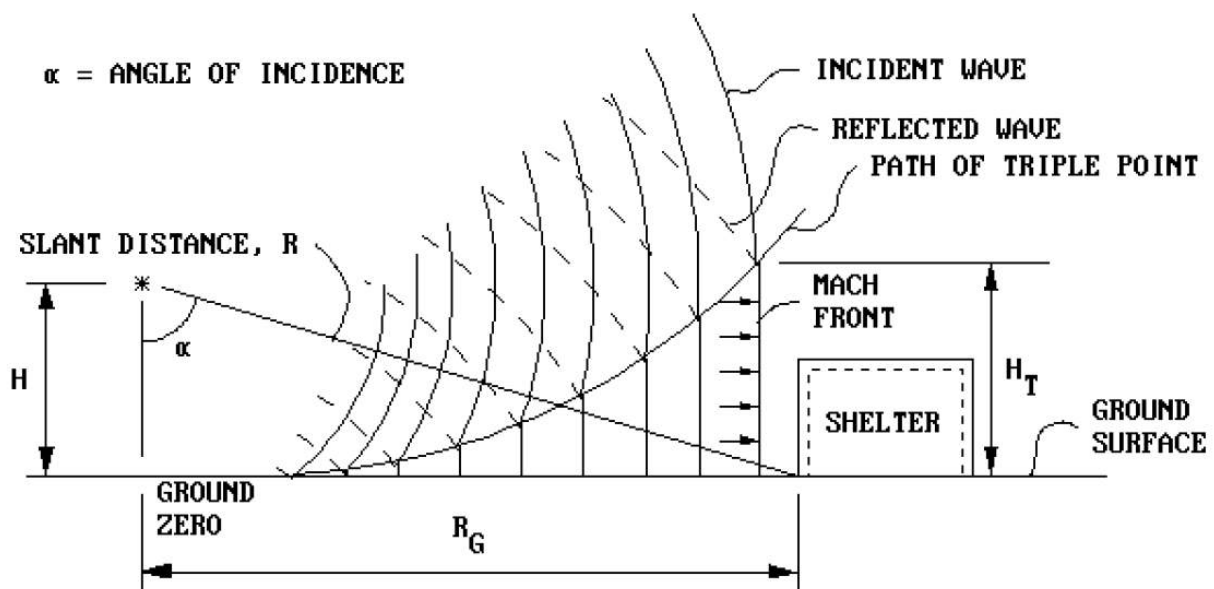
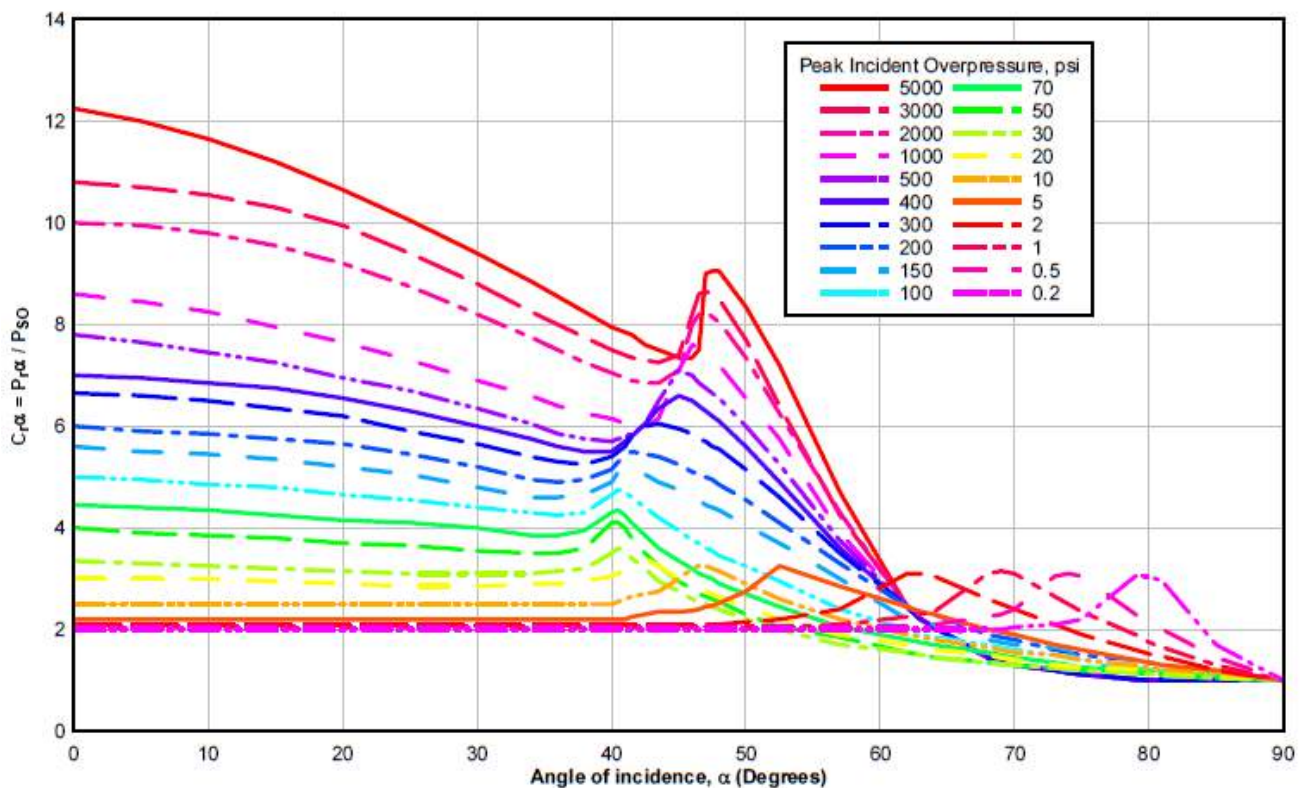
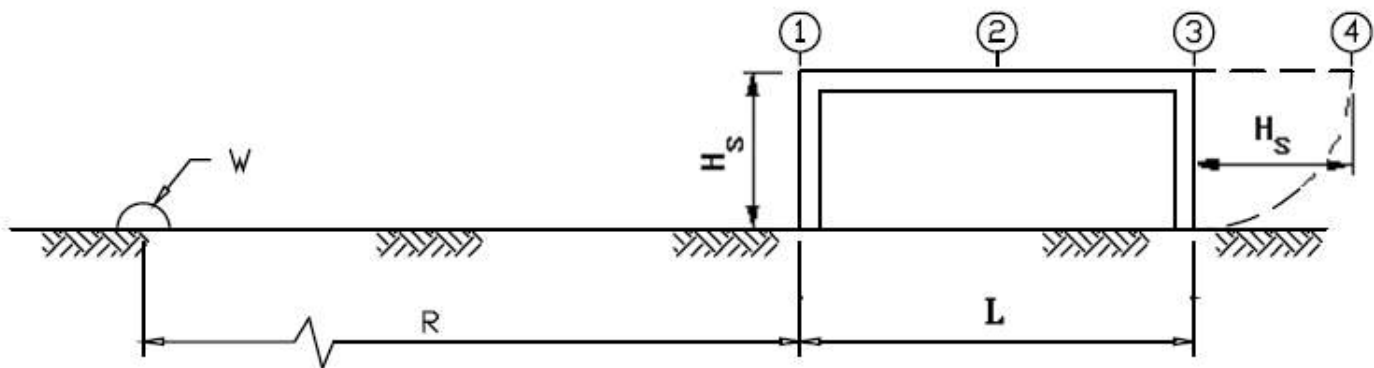


Figure 2-193 Reflected Pressure Coefficient versus Angle of Incidence



ب: نکات ضرایب محاسبه فشار بر روی سازه

برای محاسبه فشارهای وارد بر سازه ابتدا باید نقاط مختلف برای محاسبه فشار مبنای انفجار P_{so} را مطابق شکل زیر مشخص نمود.



سپس برای محاسبه فشار بر روی وجوه مختلف ساختمان، برای محاسبه حداکثر فشار دیوار روبرویی از P_r و R نقطه ۱ و برای فشار روی سقف، دیوار جانبی و دیوار پشت از رابطه ۲۱-۳-۹ (رابطه زیر) استفاده می گردد:

$$P_R = C_E P_{so} + C_D q_s$$

در این رابطه P_{so} و C_E به قرار زیر محاسبه می شود:

	دیوار مجاور	سقف	دیوار پشتی
P_{so}	$R + L/2$ = نقطه ۲ R	R = نقطه ۱ R	$R + L$ = نقطه ۳ R
C_E	$L = L/2$	$L = L$	$L = H_s$

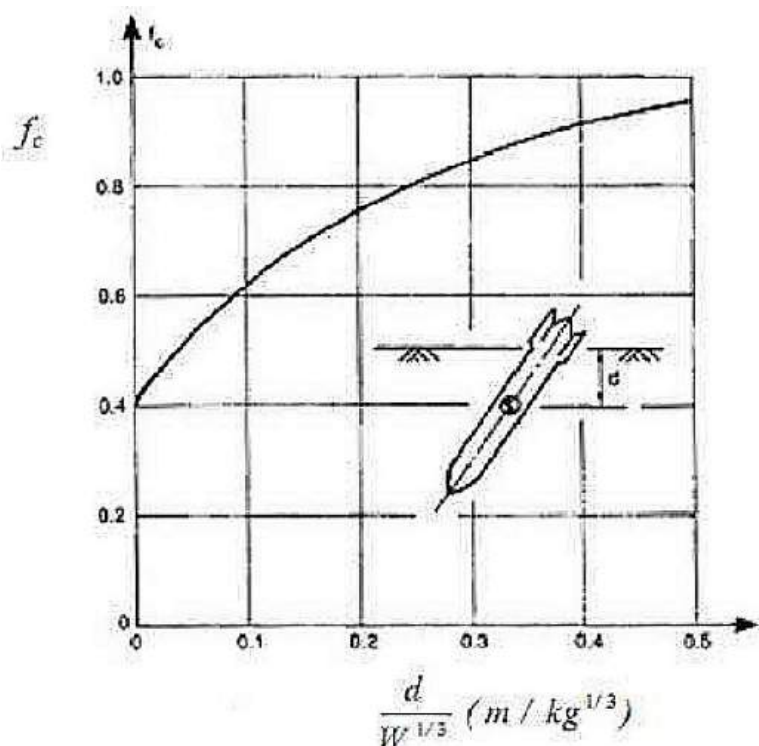
۴- انفجار درون زمینی

مدل سازی عددی انفجار

برای مدلسازی اثر موج انفجاری بر سازه های مدفون روش های متفاوتی در ادبیات فنی موجود است . این اثرات به صورت موج های تغییر مکان ، شتاب و یا فشار می باشد . البته سرچشمه همه روش ها یکسان است و از حل معادلات انتشار امواج ضربه در محیط خاکی حاصل می شوند. البته همان گونه گونه که بعداً نشان داده می شود. این روابط قابل تبدیل به یکدیگر نیز می باشند. مقدار بیشینه مکان (X) بر حسب متر ، که در فاصله R (متر) از منبع انفجار قرار دارند ، هم در حالت مدفون و یا نیمه مدفون را می توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$\frac{x}{w^{1/3}} = 60 \times \frac{f_c}{c} \left(\frac{2.52R}{w^{1/3}} \right)^{1-n}$$

که در آن W مقدار ماده منفجره بر حسب کیلوگرم ، c سرعت لرزه ای (m/s) ، f_c ضریب بی بعد اتصال می باشد که از شکل زیر محاسبه می شود و n ضریب بی بعد کاهندگی می باشد که از جدول بعدی بدست می آید.



جدول میزان ضریب کاهندگی n و مدول بالک خاک k برای برخی از انواع خاک‌ها

نوع خاک	ضریب کاهندگی n	مدول بالک خاک k
رس اشباع	۱/۵	۳۰.۰۰۰
لای و رس نیمه‌اشباع	۲/۵	۲۰.۰۰۰
ماسه خیلی متراکم، خشک و مرطوب	۲/۵	۱۰.۰۰۰
ماسه متراکم، خشک و مرطوب	۲/۷۵	۵.۰۰۰
ماسه سست، خشک و مرطوب	۳/۰	۲.۰۰۰
ماسه خیلی سست، خشک و مرطوب	۳/۲۵	۱.۰۰۰

سرعت لرزه ای یا سرعت موج در خاک را می توان به طور محافظه کارانه از رابطه زیر برحسب ضریب ارتجاعی و دانسیته خاک بدست آورد:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

با کمی تقریب می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه جابه‌جایی ذرات استفاده نمود:

$$x = 0.032 \times \left(\frac{W^{4/3}}{R^3} \right)$$

جدول ضریب ارتجاعی برخی از انواع خاک‌ها

ماسه	
سیلت‌دار	۵-۲۰
غیرمتراکم	۱۰-۲۵
متراکم	۵۰-۸۱
شن و ماسه	
غیرمتراکم	۵۰-۱۵۰
متراکم	۱۰۰-۲۰۰
رس سیلت‌دار	۱۵-۶۰
سنگ رسی	۱۵۰-۵۰۰۰
سیلت	۲-۲۰

نوع خاک	E (MPa)
رس	
خیلی نرم	۲-۱۵
نرم	۵-۲۵
متوسط	۱۵-۵۰
سخت	۵۰-۱۰۰
ماسه‌ای	۲۵-۲۵۰
خاک نباتی	
غیرمتراکم	۱۰-۱۵۰
متراکم	۱۵۰-۷۲۰
کاملاً متراکم	۷۲۰-۱۴۴۰

فشار انفجار بر سازه‌های مدفون P_{go}

انفجار داخل زمین باعث اعمال فشار بر سازه‌های مدفون نظیر تأسیسات مدفون ابنیه حمل و نقل شهری و شالوده ساختمان‌ها خواهد شد. در صورتی که سازه مدفون شامل دیواره‌های قائم باشد، برای دیوار جلویی سازه مدفون توصیه می‌شود جهت محاسبه فشار بازتاب P_r سازه، مقدار فشار انفجار در فضای آزاد $1/5$ برابر گردد. برای محاسبه مدت زمانی که فشار بازتابی بر ذره‌ای از سازه اثر می‌کند، رابطه‌ای پیشنهاد نشده ولی با استفاده از رابطه تجربی (۲) می‌توان زمان تداوم انفجار را محاسبه نمود. رابطه (۱) جهت محاسبه فشار انفجار بر سازه‌های مدفون پیشنهاد می‌گردد.

$$P_{go} = 36.71 \times \left(\frac{k}{4060} \right)^{1/3} \times Z^{-3} \quad (1)$$

که در آن:

Z : فاصله مقیاس شده بر حسب $m/kg^{1/3}$ است.

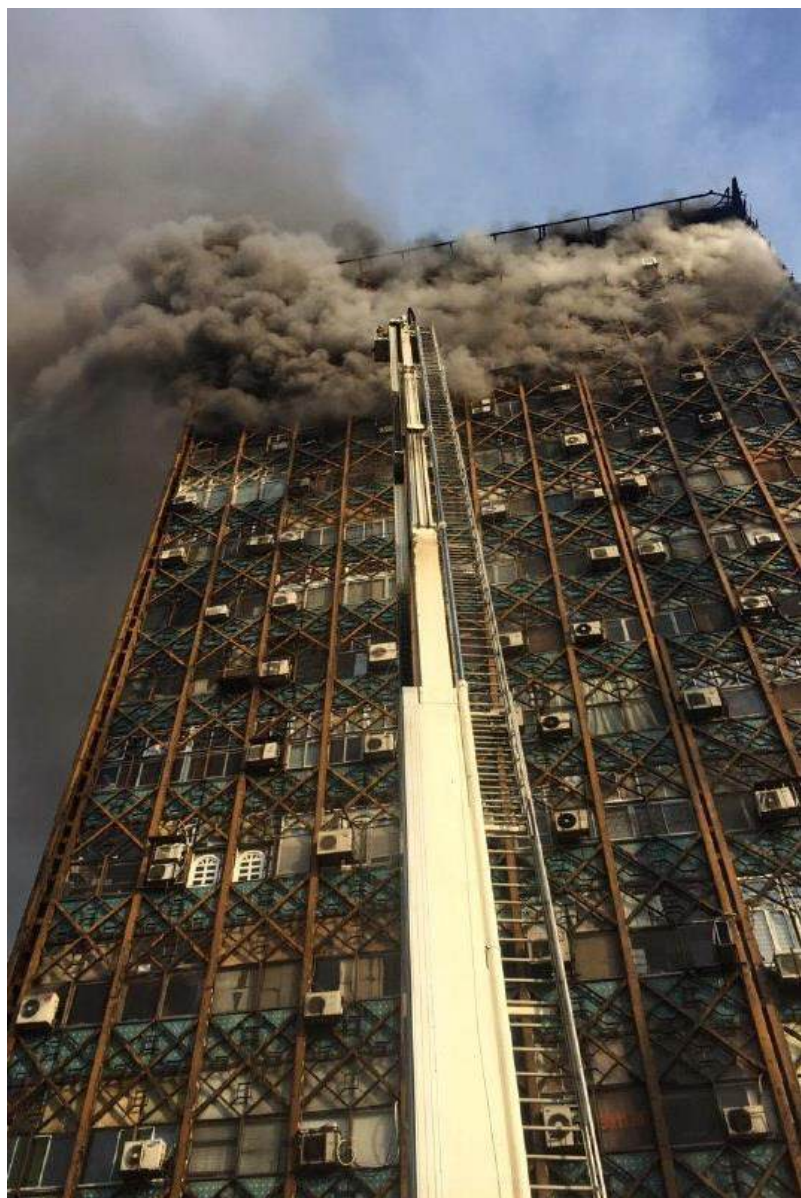
k : ضریبی بر حسب نوع خاک که از جدول صفحه ۶ به دست می‌آید.

زمان تداوم انفجار از رابطه زیر بر حسب ثانیه محاسبه می‌گردد:

$$t_d = 3.22 \times 10^{-3} \times W^{0.1} \times R^{1/3} \times Z^{-3} \quad (2)$$

W : جرم خرج معادل TNT بر حسب کیلوگرم

R : فاصله بر حسب متر است.



تخریب پیشرونده

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

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 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 نیوهم 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^۱

در ۱۶ می ۱۹۶۸، نشت گاز از فر خوراک پزی در گوشه آشپزخانه طبقه ۱۸ در ساختمان ۲۲ طبقه با سیستم پیش ساخته و دیوارهای باربری بتنی در نیوهم انگلستان منجر به شکست نامتناسب در این ساختمان شد. فشار انفجار گاز باعث

^۱ Ronan Point

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 بر گرفته و شکست نامتناسب به وجود آورده است. در این حادثه چهار نفر کشته و هفده نفر زخمی شدند. [Griffiths et al., 1968]. (شکل شماره ۱)



شکل ۱ خرابی پیشرونده در ساختمان رونان انگلستان - en.wikipedia.org/wiki/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 می دهد همچنین در اثر ضربه های مخروبه ها، خرابی پیشرونده افقی در کل گاراژ پارکینگ کنار برج اتفاق می افتد (شکل شماره ۲).



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

بمب گذاری ساختان مرا در شهر اوکلاهما^۳

نمونه عینی از خرابی پیشرونده در اثر بمب گذاری در تاریخ ۱۹۹۵، ۱۹ آوریل در ساختمان فدرال مورا در اوکلاهما سیتی اتفاق افتاد. انفجار بمب باعث تخریب سه ستون پیرامونی شده که نتیجه آن تخریب های پی در پی بوده است.

^۲ Skyline plaza

^۳ Murrah Federal Building

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.



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 بوبینگ 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 (شکل ۴). این تخریب نشان داد که ساختمان‌های خوب طراحی شده و پایدار مدرن در برابر تخریب پیشرونده آسیب‌پذیر می‌باشند.



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 فرو ریختن 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 الکلاهاسیتی 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 حمل 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 [FEMA277,1996],[Nair,2004].

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 فروریزی^۴؛ 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 فروریزی

- ۲- تخریب زیپی^۵، 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.

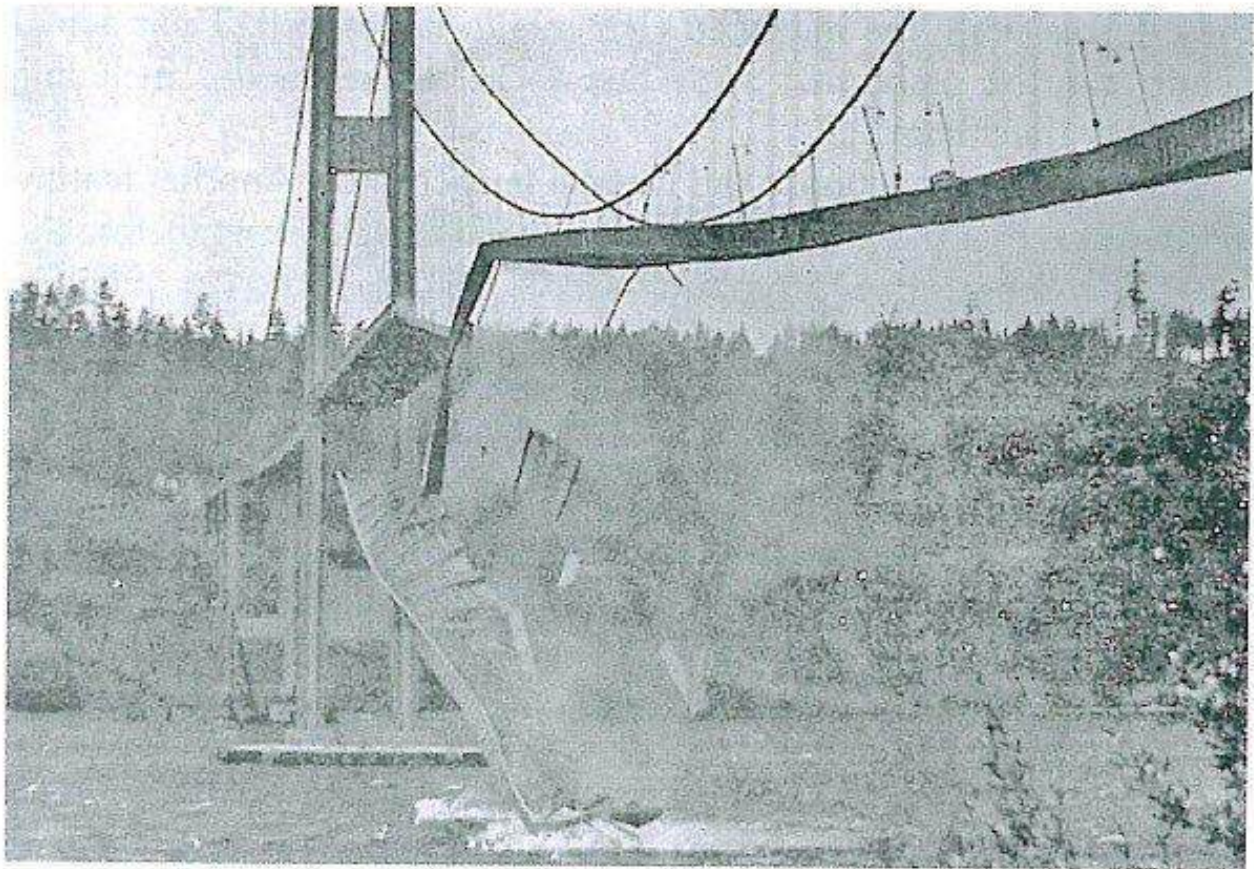


Fig. 2.2 Zipper-type collapse of the Tacoma Narrows Bridge, triggered by wind-induced vibrations (Washington, 1940)

شکل ۶ خرابی زیپی

⁵ Zipper-type

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

^۶ Domino-type

۴- تخریب مقطعی^۷، این نوع تخریب مشابه تخریب زیپی می باشد با این تفاوت که در این حالت، تخریب در مقطع المان اتفاق می افتد. به عنوان مثال گسیختگی تیر بتن آرمه تحت اثر ممان خمشی، هنگامیکه تعدادی از میلگردهای تیر تحت کشش گسیخته می شود بارها بین قسمت های باقی مانده مقطع باز توزیع می شوند. اضافه بار و ضربه ناشی از آن باعث گسترش خرابی به کل مقطع می شود.

۵- تخریب ناپایداری^۸، این نوع تخریب بیشتر شامل تخریب کمانش فشاری می باشد. مانند کمانش فشاری مهاربند که منجر به ناپایداری کل سیستم می شود. در این نوع تخریب شکست اولیه در اعضای که پایداری اعضای باربر را تأمین می کنند منجر به ناپایداری فشاری عضو شده و با شکست ناگهانی این عضو تخریب پیشرونده اتفاق می افتد. نمونه این نوع تخریب کمانش سخت کننده های ورق های فولادی و در نتیجه کمانش خود ورق می باشد.

۶- تخریب مرکب^۹، در این نوع تخریب ترکیبی از انواع تخریب اتفاق می افتد مانند تخریب ساختمان فدرال مورا که ترکیبی از تخریب فروریزی 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 چهار طبقه براساس مکانیسم تخریب قرار داده است. در طبقه اول تخریب های پیشرونده ناشی از باز توزیع نیروها قرار داده شده اند که تخریب های مقطعی و زیپی جزو این طبقه می باشند. طبقه دوم شامل تخریب ضربه ای می باشد که تخریب های فروریزی و ضربه ای از این دسته می باشند. تخریب های ناپایداری و مرکب نیز جزو طبقه های سوم و چهارم این دسته بندی می باشند.

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

⁷ Section-type

⁸ Instability-type

⁹ Mixed-type

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.

آیین‌نامه‌ها، 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 مهندسين 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^{۱۰}، قابلیت سازه برای تحمل شکست‌های محلی

یکپارچگی^{۱۱}، شرایطی که در آن المان‌های سازه‌ای حتی در صورت اعمال بارهای غیرعادی متصل به همدیگر باقی می‌مانند.

پیوستگی^{۱۲}، 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^{۱۳}، 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)^{۱۴}، قابلیت المان‌های سازه‌ای 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 در بحث تخریب پیشرونده دارد.

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 هر صورت 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.

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.

¹¹ Integrity

¹² Continuity

¹³ Ductility

¹⁴ Redundancy

آیین نامه 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.

آیین نامه کانادا NBCC

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

الف) کم کردن ریسک پیش آمدها: جلوگیری از استفاده از مخازن گاز یا مواد انفجاری دیگر، ایجاد ضربه گیرها در برابر وسایق نقلیه.

ب) ایجاد شکل پذیری: توسط اتصالات شکل پذیر 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: اقتصادی ترین و ایمن ترین 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 5 طبقه، استانداردها گزینه‌های مسیر جایگزین انتقال بار، فقط کلاف‌های افقی، کلاف‌های افقی و عمودی را پیشنهاد می‌دهند.

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 و GSA بصورت صریح کاهش پتانسیل خرابی پیش‌رونده را ارائه کرده‌اند.

دستورالعمل‌های ارائه شده توسط DOD و GSA 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.

دستورالعمل GSA

مؤسسه GSA آمریکا^{۱۵} 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:

¹⁵ U.S General service Administration

«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^{۱۶}

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.

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.

¹⁶ Department of Defense (UFC4-023)

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 نمی‌باشد، 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 نمی‌باشد اما می‌بایست تحلیل عادی در سازه انجام گرفته و بررسی انجام گرفته در 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 سازه‌های 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 استاندارد 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 می تواند با استفاده از روش جایگزین تعیین نماید که آیا سازه پس از حذف اسمی المان قادر به پل زدن می باشد یا خیر.
۲. برای سطح برداری ۲ حالت ۲، 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 می کند. سه روش تحلیل مجاز به استفاده می باشند:

(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 می کنند.

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 می باشد را ممنوع نماید. به عنوان مثال روشهای ساده ای که بر اساس تحلیل های دستی و یا برنامه صفحات گسترده تهیه می گردند در بعضی از انواع ساختمان نظیر ساختمانهای بنایی بسیار کارآمد می باشند و نتایج تمامی روش های منطقی تحلیل می بایست معیارهای پذیرش این مجموعه ضوابط که در بخش های مختلف آیین نامه UFC4-023 ارائه شده را تامین نمایند. تحلیلها می بایست 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 تحلیل های استاتیکی خطی و غیرخطی بکار گرفته شوند. همچنین می بایست که معیارها قابل کاربرد و اجرا در تحلیل منطقی جایگزین باشند. تمامی پروژه هایی که با روش منطقی جایگزین انجام گرفته اند می بایست توسط مهندس یا شخص صاحب صلاحیت مستقل مورد قبول کارفرما مورد تأیید قرار گیرد.