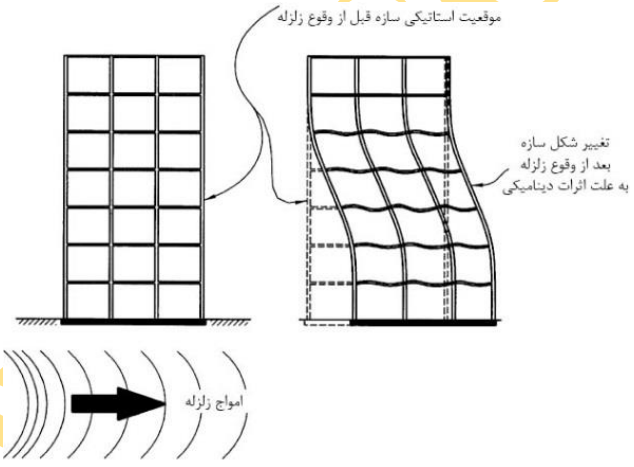
تحلیل استاتیکی در برابر تحلیل دینامیکی به صورت ساده

تهیه و تنظیم: مهدی علیرضایی

M.Alirezaei@iiees.ac.ir www.M-Alirezaei.com

۱-۱- کلیات

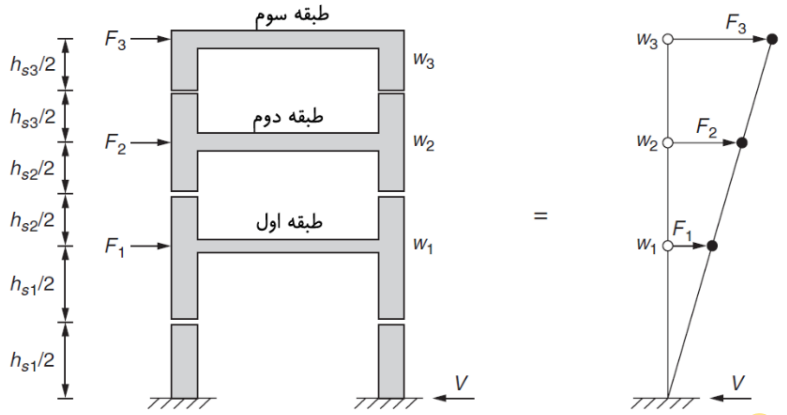
یک زمین‌لرزه توسط لرزش۱ زمین، در اثر رها شدن انرژی[1] از پوسته زمین[2] آشکار می‌شود. این انرژی ممکن است از منابع مختلفی مانند جابجایی پوسته زمین[3]، فوران آتشفشانی[4]، انفجارهای ایجاد شده به دست بشر و یا ریزش تونل‌های زیرزمینی سرچشمه گیرد. طراحی سازه‌ها در برابر زلزله بر این اساس می‌باشد که در زلزله‌های شدید جان ساکنین حفظ شود ولی اجازه داده می‌شود سازه دچار خرابی‌هایی (به صورت محدود) گردد. به عبارت دیگر در زلزله‌های شدید مقداری خرابی برای سازه پذیرفته شده می‌باشد. زیرا که اگر بخواهیم سازه‌ها را طوری طراحی نماییم که در شدیدترین زلزله‌ها بدون خرابی باقی بمانند از نظر اقتصادی به هیچ وجه توجیه پذیر نمی‌باشد. بایستی بین نیروهای ایجاد شده توسط باد و زلزله تمایز گذاشت. زیرا که نیروهای موثر بر سازه در اثر باد به جوانب سازه (به صورت یک نیروی خارجی) اثر کرده در حالی که نیروهای زلزله باعث حرکت در پی[5] سازه و در نهایت ایجاد نیروهای لختی در جرم سازه می‌شوند. یک رفتار ساده در حین ایجاد نیروهای دینامیکی زلزله بر یک سازه در شکل-۱ نمایش داده شده است.



شکل-۱ رفتار سازه در حین زلزله.

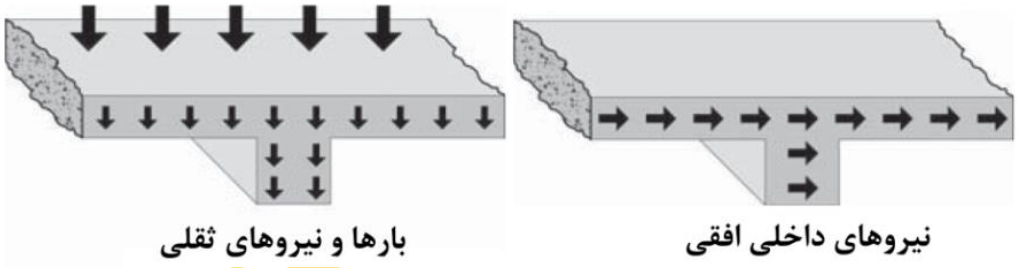
[1] Release of energy
[2] Earth's crust
[3] Dislocations of the crust
[4] Volcanic eruptions
[5] Foundation

در حین وقوع زلزله نیروهای اینرسی در هر طبقه بسته به جرم و سختی آن طبقه ایجاد می‌شود. در شکل-۲ سهمیه نیروی جانبی هر طبقه از کل نیروی جانبی سازه نشان داده شده است. مطابق این شکل، نیروی جانبی هر طبقه تناسب مستقیم با میزان سهمیه جرمی آن طبقه دارد. سهمیه جرمی هر طبقه برابر با کل بارهای مرده و درصدی از بارهای زنده آن طبقه به همراه نصف دیوارهای بالا و پایین آن طبقه می‌باشند.



شکل-۲ سهمیه نیروی هر طبقه در اثر زلزله.

این نیروی داخلی ایجاد شده نیروی اینرسی یا نیروی ماند نیز نامیده می‌شود. در اثر جنبش زمین و شتاب افقی اعمال شده و در نهایت حرکت روسازه، این نیروی داخلی در جرم آن ایجاد می‌شود. این نیرو در تمام اجزای سازه ایجاد می‌گردد. در صورتی که یک متر مربع از سطح سقف را مانند شکل-۳ در نظر بگیریم، در آن علاوه بر نیروهای ثقلی که ناشی از بارهای مرده و زنده سازه هستند، نیروهایی افقی که ناشی از حاصل ضرب جرم این قسمت در شتاب اعمالی می‌باشد، ایجاد می‌گردد. همانطور که دیده می‌شود نیروهای قائم دارای ماهیتی خارجی بوده ولیکن نیروهای افقی ایجاد شده، ماهیتی داخلی دارند.



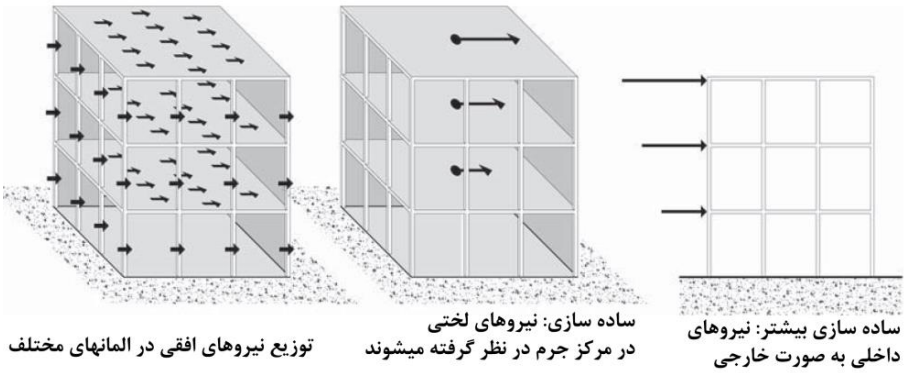
شکل-۳ تفاوت بین ماهیت بارهای افقی و قائم

با بررسی نیروهای ثقلی و افقی می‌توان تمام نیروهای ثقلی و افقی را به صورت همزمان در مرکز جرم[۶](CoM)، به صورت متمرکز در نظر گرفت. در یک ساختمان معمولی بیشتر وزن یک سازه ناشی از وزن سقف طبقات و بام می‌باشد. بنابراین بیشتر طراحان برای ساده سازی، مانند شکل **Error! No text of specified style in document.**-۴، به جای در نظر گرفتن نیروی داخلی ایجاد شده در هر المان، تمام نیروهای جانبی ایجاد شده در هر طبقه را در مرکز جرم آن طبقه در نظر می‌گیرند. برای سازه‌هایی که توزیع نیروهای ثقلی بر روی آن یکنواخت است، مرکز جرم سازه تقریباً متناظر با مرکز سطح پلان است. نیروهای ناشی از باد به

[۶] Centre of Mass

www.QSCE.ir

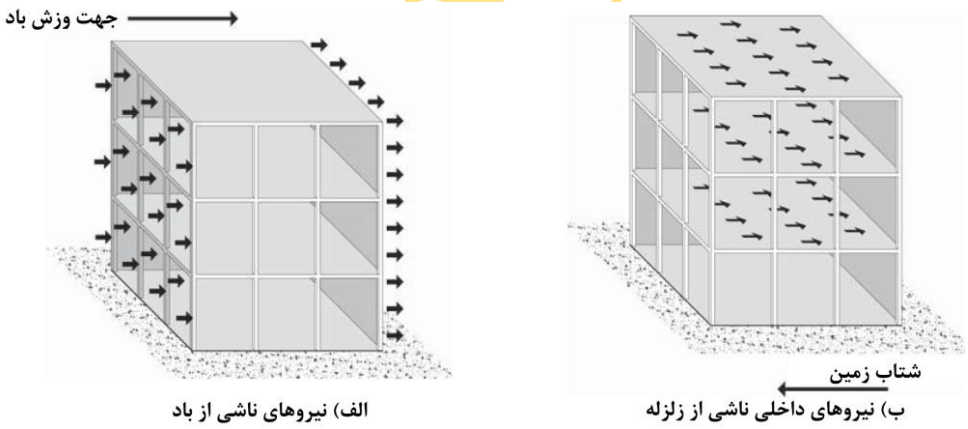
سبب جهت اعمال شبیه به نیروهای ناشی از زلزله می‌باشند ولیکن به سبب ماهیت خارجی بودن‌شان با نیروهای لختی ناشی از زلزله تفاوت عمده دارند.



شکل**Error! No text of specified style in document.**-۴ ساده سازی نیروهای لختی ایجاد شده در اثر زلزله

همانند شکل-۵، نیروهای خارجی ناشی از باد در سطح جانبی ساختمان اثر کرده و موجب فشردگی آن وجه از سازه می‌شوند. این نیروها را می‌توان به صورت متمرکز در مرکز سطح بادخور در نظر گرفت. همچنین نیروهای ناشی از زلزله به صورت رفت و برگشت می‌باشند ولی نیروهای ناشی از باد در یک جهت اعمال می‌شوند. هر دو نیروی ناشی از باد و زلزله دارای ماهیتی کاملاً دینامیکی می‌باشند.

مهمترین عامل ایجاد نیروهای لختی در جرم سازه، جرم آنها می‌باشد. براساس قانون دوم نیوتن، نیروی ایجاد شده متناسب با جرم آنها است. با سبک سازی ساختمان‌ها می‌توان، نیروهای ایجاد شده در آنها را در اثر زلزله به مقدار قابل توجهی کاهش داد. این مهم با بکارگیری اجزاء سبک در ساختمان تحقق می‌یابد. متاسفانه در بسیاری از کشورها برای ساخت ساختمان‌ها معمولاً این اصل مهم نادیده گرفته می‌شود.



شکل-۵ مقایسه بین نیروهای ناشی از باد و زلزله

در یک مدل سازه‌ای قاب، اعضای قاب توسط المان‌های قاب در محل نقاط گرهی[7] به یکدیگر مرتبط می‌شوند. موقعیت هر یک از این گره‌ها توسط یک سیستم مختصات کلی[8] تعریف می‌شود. در صورتی که بتوان از اثر دینامیکی نیروها و وابستگی آنها به زمان صرف نظر نمود، می‌توان از یک تحلیل استاتیکی بهره جست تا زمان تحلیل، به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد.

۱-۲- روش استاتیکی معادل[9] (بر اساس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰)

در اکثر آیین‌نامه‌ها روش استاتیکی معادل به عنوان اصلی‌ترین روش بارگذاری لرزه‌ای مطرح است. ارکان اصلی این روش عبارتند از:

۱- تعیین دوره تناوب سازه
۲- تعیین برش پایه
۳- توزیع برش پایه در ارتفاع سازه
۴- وارسی‌ها

این روش بارگذاری نیروی زلزله را معادل یک نیروی افقی می‌پندارد. بنابراین ابتدا نیروی برش پایه براساس دوره تناوب سازه محاسبه سپس در ارتفاع سازه توزیع می‌شود، آنگاه سهم عناصر لرزه‌بر به نسبت سختی مشخص می‌گردد و اعضای سازه براساس نیروی حاصل طرح می‌گردند. در این میان وارسی‌های مختلفی نظیر کنترل جابجایی، پیچش و مانند اینها صورت می‌گیرد. در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران روش استاتیکی معادل براساس معادل‌سازی سازه بصورت یک سیستم یک درجه آزادی و با در نظر گرفتن دوره تناوب طبیعی اول آن برای ساختمان‌ها ارائه شده. در آیین‌نامه حداقل نیروی برشی پایه یا مجموع نیروی جانبی زلزله در هر یک از امتدادهای ساختمان با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$V = CW \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق، V، نیروی برشی در تراز پایه ساختمان، W، وزن کل ساختمان شامل وزن مرده و درصدی از بار زنده و بار برف و همچنین C، ضریب بار زلزله طبق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{ABI}{R_u} \qquad (۲)$$

که A، نسبت شتاب مبنای طرح که برای مناطق مختلف معین شده است و B، ضریب بازتاب ساختمان که با استفاده از طیف بازتاب طرح بدست آمده، I، ضریب اهمیت ساختمان و R_u، ضریب رفتار ساختمان می‌باشد. رابطه (۱) در بسیاری از آیین‌نامه‌ها ثابت می‌باشد ولی برای تعیین ضریب C از روابط مختلفی استفاده می‌کنند. بر طبق استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم مقدار برش V نبایستی کمتر از مقدار زیر در نظر گرفته شود:

$$V_{\min} = 0.12\,AIW \qquad (۳)$$

[7] Nodal points
[8] Global coordinate system
[9] Equivalent Static Force Procedure

www.QSCE.ir

نسبت شتاب مبنای طرحA: برای مناطق مختلف کشور براساس میزان خطر لرزه‌خیزی آنها و با توجه به جدول-۱ تعیین شده است. در استاندارد ۲۸۰۰ گستره ایران به چهار ناحیه تقسیم شده است.

جدول-۱ شتاب مبنای طرح طبق استاندارد ۲۸۰۰.

منطقه	توصیف	نسبت شتاب مبنای طرح (A)
۱	پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد	۰/۳۵
۲	پهنه با خطر نسبی زیاد	۰/۳
۳	پهنه با خطر نسبی متوسط	۰/۲۵
٤	پهنه با خطر نسبی کم	۰/۲

ضریب بازتاب B: که بیانگر نحوه پاسخ ساختمان به حرکات زمین است طبق ویرایش چهارم ۲۸۰۰ با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود:

$$B = B_1 N \qquad (۴)$$

$$B_1 = \begin{cases} S_0 + (S - S_0 + 1)\left(\dfrac{T}{T_0}\right) & 0 < T < T_0 \\ S + 1 & T_0 < T < T_s \\ (S+1)\left(\dfrac{T_s}{T}\right) & T > T_s \end{cases} \qquad (۵)$$

که در آن B_1 ضریب شکل طیف و N ضریب اصلاح طیف (مربوط به حوزه نزدیک گسل) است. مقدار ضریب شکل از روابط زیر استفاده می‌شود. برای پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد و زیاد:

Error! No) text of specified style in document.(۶

$$\begin{aligned} N &= 1 && T < T_s \\ N &= \frac{0.7}{4 - T_s}(T - T_s) + 1 && T_s < T < 4 \\ N &= 1.7 && T > 4\,\text{sec} \end{aligned}$$

برای پهنه‌های با خطر نسبی متوسط و کم:

$$\begin{aligned} N &= 1 && T < T_s \\ N &= \frac{0.4}{4 - T_s}(T - T_s) + 1 && T_s < T < 4 \\ N &= 1.4 && T > 4\,\text{sec} \end{aligned} \qquad (۷)$$

که در آن T دوره تناوب اصلی ساختمان بر حسب ثانیه می‌باشد. تناوب سازه را می‌توان به دو طریق تجربی و تحلیلی محاسبه کرد. آیین‌نامه‌ها بطور سنتی روابط تجربی را برای محاسبه تناوب مد پایه سازه ارائه کرده‌اند که به جنس سازه (فولادی، بتنی) ارتفاع و

www.QSCE.ir

طول سازه و میزان مهاربندی جانبی (قاب‌های بدون بادبند در مقابل قاب‌های که دارای بادبند یا دیوار برشی هستند) بستگی دارد. همچنین T_0,T_s,S و S_0، پارامترهایی هستند که به نوع زمین و میزان خطر لرزه‌خیزی منطقه وابسطه‌اند که با استفاده از جدول ۲- تعیین می‌شوند. زمان تناوب اصلی نوسان بسته به مشخصات ساختمان و ارتفاع آن از تراز پایه با استفاده از روابط تجربی زیر تعیین می‌گردد.

الف -برای ساختمان‌های با سیستم قاب خمشی

۱- چنانچه جداگرهای میانقابی مانعی برای حرکت قاب‌ها ایجاد ننمایند:

در قاب‌های فولادی

$$T = 0.08H^{3/4} \quad (۸)$$

در قاب خمشی بتنی

$$T = 0.05H^{0.9} \quad (۹)$$

۲- چنانچه جداگرهای میانقابی مانعی برای حرکت قاب‌ها ایجاد نمایند: مقدار T برابر با ۸۰ درصد مقادیر عنوان شده در بالا در نظر گرفته می‌شود.

ب -برای ساختمان‌های با سیستم قاب مهاربندی شده واگرا، مشابه قاب خمشی.

پ- در سایر سیستم‌ها به غیر از سیستم‌های کنسولی، با و یا بدون جداگرهای میانقابی:

$$T = 0.05H^{0.75} \quad (۱۰)$$

توجه در روابط فوق: H ارتفاع سازه از تراز پایه بوده و در صورتی که وزن خرپشته بیش از ۲۵٪ وزن بام باشد، باید منظور گردد

تبصره: میتوان دوره تناوب را از تحلیل دینامیکی بدست آورد و در تعیین نیروها مورد استفاده قرار داد ولی بهرحال نباید از ۱/۲۵ برابر دوره تناوب تجربی بیشتر شود. این مقدار اخیر در ASCE7-10 برابر 1.4 و بیشتر در نظر گرفته شده است.

جدول -۲ پارامترهای مربوط به روابط ضریب بازتاب.

نوع زمین	T_0	T_s	خطر نسبی کم و متوسط		خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد	
			S	S_0	S	S_0
I	۰/۱	۰/۴	۱/۵	۱	۱/۵	۱
II	۰/۱	۰/۵	۱/۵	۱	۱/۵	۱
III	۰/۱۵	۰/۷	۱/۷۵	۱/۱	۱/۷۵	۱/۱
IV	۰/۱۵	۱	۲/۲۵	۱/۳	۱/۷۵	۱/۱

www.QSCE.ir

تعیین دوره تناوب ساختمان‌های غیرمتعارف:

در این سازه‌ها توزیع جرم و سختی متناسب نیست. مانند مساجد، آمفی تئاترها، سالن‌های ورزشی، گنبدها و غیره. در این سازه‌ها، دوره تناوب بایستی با استفاده از تحلیل دینامیکی بدست آید.

الف) در مواردی که جداگرهای میانقابی در مدل تحلیلی منظور شده باشد:

$$T = T_D \qquad (۱۱)$$

ب) در مواردی که جداگرهای میانقابی در مدل تحلیلی منظور نشده باشد:

$$T = 0.8T_D \qquad (۱۲)$$

که در روابط فوق T_D دوره تناوب تحلیلی است.

ضریب اهمیت سازه I: در استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) ساختمان‌ها به چهار گروه با اهمیت‌های مختلف گنجانده شده‌اند. با استفاده از جدول-۳ مقدار ضریب اهمیت تعیین می‌شود.

جدول-۳ مقدار ضریب اهمیت.

طبقه بندی ساختمان	ضریب اهمیت
گروه ۱	۱/۴
گروه ۲	۱/۲
گروه ۳	۱
گروه ۴	۰/۸

گروه اول (ساختمان با اهمیت خیلی زیاد): شامل ساختمان‌هایی است که قابل استفاده بودن آنها بعد از زلزله اهمیت خاص دارد و وقفه در بهره‌برداری به طور غیر مستقیم باعث افزایش تلفات می‌گردد، مانند بیمارستان‌ها و درمانگاه‌ها، مراکز آتش‌نشانی، مراکز و تاسیسات آبرسانی، نیروگاه‌ها و تاسیسات برق رسانی، برجهای مراقبت فرودگاه‌ها، مراکز مخابرات، رادیو و تلویزیون، تاسیسات انتظامی، مراکز کمک رسانی و ساختمان‌هایی که خرابی آنها موجب انتشار مواد سمی و مضر در کوتاه مدت و دراز مدت برای محیط زیست می‌شوند، جزو این گروه‌اند.

گروه دوم (ساختمان با اهمیت زیاد): این گروه شامل سه دسته زیر است:

- ✓ ساختمان‌هایی که خرابی آنها موجب تلفات زیاد می‌شود، مانند مدارس، مساجد، استادیوم‌ها، سینما و تئاتر، سالن‌های اجتماعات، فروشگاه‌های بزرگ، ترمینال‌های مسافری و یا هر فضای سرپوشیده که محل تجمع بیش از ۳۰۰ نفر در زیر یک سقف باشد.

www.QSCE.ir

- ✓ ساختمان‌هایی که خرابی آنها موجب از دست رفتن ثروت ملی می‌گردد، مانند موزه‌ها، کتابخانه‌ها و بطور کلی مراکزی که در آنها اسناد و مدارک ملی و یا آثار پر ارزش نگهداری می‌شود.
- ✓ ساختمان‌ها و تاسیسات صنعتی که خرابی آنها موجب آلودگی محیط زیست و یا آتش سوزی وسیع می‌شود، مانند پالایشگاه‌ها، انبارهای سوخت و مراکز گازرسانی.

گروه سوم (ساختمان با اهمیت متوسط): این گروه شامل کلیه ساختمان‌های مشمول استاندارد ۲۸۰۰ به جز ساختمان‌های عنوان شده در سه گروه دیگر است، مانند ساختمان‌های مسکونی و اداری و تجاری، هتل‌ها، پارکینگ‌های چند طبقه، انبارها، کارگاه‌ها، ساختمان‌های صنعتی و غیره.

گروه چهارم (ساختمان با اهمیت کم): این گروه شامل دو دسته زیر است:

- ✓ ساختمان‌هایی که خسارات نسبتاً کمی از خرابی آنها حادث می‌شود و احتمال بروز تلفات در آنها بسیار کم است، مانند انبارهای کشاورزی و سالن‌های مرغداری.
- ✓ ساختمان‌های موقت که مدت بهره برداری از آنها کمتر از ۲ سال است.

ضریب رفتار R: که در برگیرنده آثار و عواملی از قبیل شکل‌پذیری، درجه نامعینی و اضافه مقاومت موجود در سازه است.

طبق ویرایش چهارم ۲۸۰۰، طراح در صورتی که قصد طراحی سازه به روش تنش مجاز داشته باشد، بایستی نیروی زلزله را در ترکیب‌بارها در ضریب ۰/۷ ضرب کند (زیرا ضریب رفتار ویرایش چهارم براساس حالات حدی داده شده) و در صورتی که قصد طراحی سازه به روش حالات حدی را داشته باشد، نیروهای زلزله بدون ضریب بایستی در ترکیب بارها بکار برده شوند. بنابراین در صورتی از نرم‌افزارهای طراحی استفاده می‌نمایید یک راه حل مناسب جهت اعمال ضوابط آیین‌نامه در طراحی به روش تنش مجاز، ساختن ترکیب‌بارهای طراحی (با ضریب ۰/۷ برای نیروهای زلزله) و محاسبه ضریب زلزله C طبق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ است. در این حالت نیروهای طراحی در ترکیب‌بارها در سطح نیروهای سرویس قرار خواهند گرفت.

جهت مقایسه مقادیر ضریب رفتار داده توسط آیین‌نامه‌های مختلف، در جدول-۴، مقادیر ضریب رفتار به نقل از چهار آیین‌نامه مختلف آورده شده است. توجه شود که در بین این مقادیر ضریب رفتار، تنها ضریب رفتار ویرایش سوم ۲۸۰۰ براساس روش تنش مجاز بوده و بقیه بر اساس مقاومت نهایی می‌باشند.

جدول-۴ - مقایسه مقادیر ضریب رفتار چند سیستم در آیین‌نامه‌های مختلف.

سیستم سازه	سیستم لرزه‌بر	ویرایش سوم ۲۸۰۰	ویرایش چهارم ۲۸۰۰	UBC 97	ASCE7 2010	$\frac{2800^{V3}}{2800^{V4}}$
سیستم دیوارهای باربر	دیوار برشی بتن مسلح ویژه	7	5	4.5	5	1.4
سیستم قاب ساختمانی ساده	دیوار برشی بتن مسلح ویژه	8	6	5.5	6	1.3
	دیوار برشی با مصالح بنایی مسلح	4	3	5.5	2	1.3
	مهاربندی شده برون محور	7	7 (بشرط رفتار برشی)	7	8	1.0
	مهاربندی شده هم‌محور معمولی	6	3.5	5.6	3.25	1.7
سیستم قاب خمشی	قاب خمشی بتن مسلح ویژه	10	7.5	8.5	8	1.3
	قاب خمشی بتن مسلح متوسط	7	5	5.5	5	1.4
	قاب خمشی بتن مسلح معمولی	4	3	3.5	3	1.3
	قاب خمشی فولادی ویژه	10	7.5	8.5	8	1.3
	قاب خمشی فولادی متوسط	7	5	-	4.5	1.4

www.QSCE.ir

	قاب خمشی فولادی معمولی	5	3.5	4.5	3.5	1.4
سیستم دوگانه	قاب خمشی ویژه (فولادی با بتنی) + دیوار برشی بتن مسلح ویژه	11	7.5	8.5	7	1.5
	قاب خمشی بتنی متوسط+ دیوار برشی بتن مسلح متوسط	8	6.5	6.5	-	1.2
	قاب خمشی فولادی ویژه+ مهاربند برون محور	10	7.5	8.5	8	1.3

همانطور که از مقادیر این جدول دیده می‌شود، نسبت بین ضریب رفتارهای ویرایش سوم و چهارم برای سیستم‌های مختلف بین ۲۰ تا ۷۰ درصد در تغییر است که نسبت بالایی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در قاب‌های مهاربندی شده همگرا ضریب رفتار در ویرایش سوم، ۶ داده شده ولی این مقدار در ویرایش چهارم به ۳/۵ تقلیل داده شده است. این نسبت‌ها در ستون آخر این جدول جهت مقایسه آورده شده است.

۱-۳- توزیع نیروی برش پایه در ارتفاع ساختمان

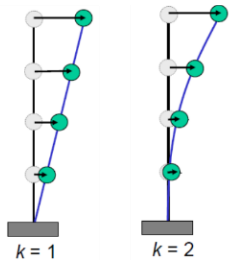
نیروی برش پایه محاسبه شده، مطابق رابطه زیر در ارتفاع ساختمان توزیع می‌شود:

$$F_x = (V)\frac{\left(w_x h_x^k\right)}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k} \qquad (۱۳)$$

که در رابطه فوق، F_x، نیروی جانبی در تراز x، w_i وزن طبقه iام و h_i ارتفاع طبقه iام از تراز پایه است. پارامتر k بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = 0.5T + 0.75 \qquad 0.5 \le T \le 2.5\,\text{sec}$$
$$\text{if } T < 0.5\text{sec} \Rightarrow k = 1 \qquad (۱۴)$$
$$\text{if } T > 2.5\text{sec} \Rightarrow k = 2$$

پارامتر k برای در نظر گرفتن اثر مدهای بالاتر بوده و مقدار k برابر دوره تناوب‌های کمتر از ۰/۵ ثانیه برابر یک و برای دوره تناوب‌های بزرگتر از ۲/۵ ثانیه برابر ۲ و برای دوره تناوب‌های مابین آنها از درون‌یابی خطی استفاده می‌شود. به عبارت دیگر برای دوره تناوب‌های کمتر از ۰/۵ ثانیه توزیع نیروی جانبی در ارتفاع به صورت خطی بوده ولی در دوره تناوب‌های بالا توزیع نیروی جانبی به صورت سهمی خواهد بود و سهم طبقات بالا از نیروی جانبی افزایش خواهد یافت. در ویرایش چهارم ۲۸۰۰، این ضریب برابر 0.5T+0.75 داده شده است (شکل-۶).



شکل-۶ اثر ضریب k بر توزیع نیرو در ارتفاع.

www.QSCE.ir

۱-۴- تحلیل دینامیکی سازه‌ها

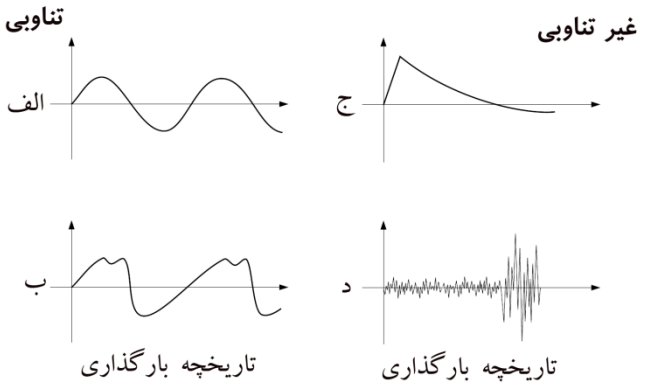
در اوایل قرن بیستم با پیشرفت علم و شناخت بیشتر از زلزله و رفتار سازه‌ها در برابر آن، امکان ساخت و طراحی سازه‌های مقاوم و ایمن در مقابل نیروهای وارده میسّر گردید به طوری که با طراحی و ساخت سازه‌هایی با سطح ایمنی بالا، احتمال وقوع خسارات جانی و مالی به حداقل رسید. نیروهای وارد بر سازه‌ها را می‌توان به دو دسته ثقلی و جانبی تقسیم بندی نمود. از نیروهای جانبی می‌توان نیروی مربوط به زمین لرزه را نام برد که در طراحی اکثر سازه‌ها تأثیر به سزایی دارد. در علم مهندسی سازه هدف از طراحی سازه‌های ایمن و مقاوم در برابر نیروهای وارده، طراحی و ساخت سازه‌هایی می‌باشد که ضمن رعایت مسائل اقتصادی توانائی تحمل نیروهای وارده را داشته باشند. در حال حاضر اکثر سازه‌ها بر اساس آیین نامه‌های مربوطه طرح می‌شوند. آیین‌نامه‌های ساختمانی، صورت‌های ساده شده‌ای از معیارهای محاسبه نیروی وارد به سازه را ارائه می‌دهند که می‌توان بر اساس آنها پایداری مورد نیاز سازه‌ها را محاسبه نمود. تا قبل از ابداع و نصب شتاب‌نگاشت‌ها، علم دینامیک سازه‌ها نقش چندانی در مهندسی زلزله نداشت. لیکن با نصب اولین شتاب‌نگاشت‌ها، دینامیک سازه‌ها به عرصه مهندسی زلزله وارد شد.

بارهای وارد بر سازه در بعضی از موارد ممکن است از نظر مقدار، جهت و موقعیت، تغییراتی نسبت به زمان داشته باشند. علمی که به بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها می‌پردازد «دینامیک سازه‌ها» نامیده می‌شود. این نوع بارها را اصطلاحاً بارهای دینامیکی گویند. تمام سازه‌های واقعی، وقتی تحت بارگذاری یا جابجایی قرار می‌گیرند، رفتار دینامیکی از خود نشان می‌دهند. نیروهای اینرسی، از قانون دوم نیوتن، معادل جرم در شتاب است. در صورتی که بارها و جابجایی‌های اعمال شده خیلی آرام وارد شوند می‌توان از نیروهای اینرسی صرف نظر کرد و نیرو را به صورت یک نیروی استاتیکی در نظر گرفت. از اینرو تحلیل دینامیکی بسط تحلیل استاتیکی است. سازه‌های واقعی دارای بینهایت درجه آزادی هستند. لیکن برای مقاصد عملی بایستی تعداد درجات آزادی، محدود نمود. تعداد مولفه‌های مستقل تغییرمکانی لازم برای تعریف وضعیت تغییرمکانی تمام جرم‌ها نسبت به وضعیت اولیه‌شان را تعداد درجات آزادی (DOF) می‌گویند.

برای سادگی بارگذاری‌های معین را، به دو دسته تناوبی و غیر تناوبی[10] تقسیم می‌کنیم. در شکل -۷ چند مثال از انواع حالت‌های بارگذاری معین نشان داده شده است.

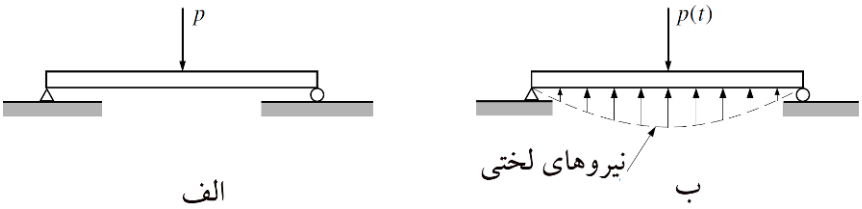
[10] Periodic and nonperiodic

www.QSCE.ir



شکل -۷ انواع بارگذاری‌های دینامیکی- الف)پریودیک ساده ب) پریودیک پیچیده ج)ضربه‌ای د) تصادفی

همانطور که از شکل پیداست، بارگذاری تناوبی یک نوع بارگذاری تکرار شونده است. اگر بارگذاری به صورت تابعی سینوسی یا کسینوسی بیان شود به این نوع بارگذاری، هارمونیکی ساده[11] گفته می‌شود. بارگذاری نشان داده شده در شکل -۷ب به صورت تناوبی بوده لیکن چون به صورت تابعی سینوسی یا کسینوسی بیان نمی‌شود، بنابراین هارمونیک نبوده ولی تناوبی هست. بارگذاری‌های غیر تناوبی ممکن است به صورت بارگذاری‌های کوتاه مدت ضربه‌ای و یا به شکل کلی بارگذاری تصادفی باشد. مسائل دینامیکی دو وجه تمایز اساسی با مسائل مشابه استاتیکی دارند. اختلاف نخست مسئله تغییرات بارگذاری نسبت به زمان است که باعث می‌شود سیستم برای هر زمانی یک پاسخ داشته باشد. لیکن در مسائل استاتیکی تنها یک پاسخ ساده وجود دارد. از اینرو مسائل دینامیکی بسیار پیچیده‌تر و زمان‌برتر از تحلیل استاتیکی هستند. اختلاف دوم و مهمتری را که بین مسائل دینامیکی و استاتیکی وجود دارد در شکل -۸ نشان داده شده است. اگر تیر دو سر ساده، همانند شکل -۸الف تحت نیروی استاتیکی p قرار گیرد، عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی، لنگرها و نیروی برشی داخلی در هر مقطعی از تیر را می‌توان به سادگی با استفاده از اصول تحلیل سازه‌ها بدست آورد و مقادیر بدست آمده تنها به مقدار بار بستگی دارند.



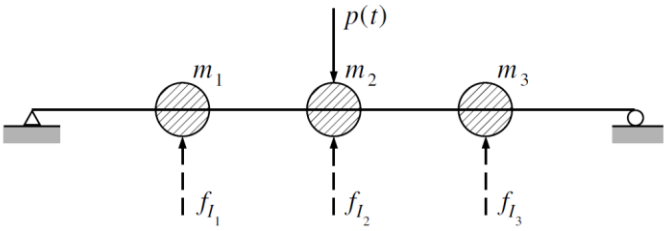
شکل -۸ اختلاف اساسی بین بارهای استاتیکی و دینامیکی

لیکن اگر همانند شکل -۸ب یک نیرویی که وابسته به زمان می‌باشد به تیر اعمال شود، تغییرمکان‌های تیر علاوه بر مقدار بارگذاری، به نیروی لختی ایجاد شده نیز بستگی دارد. در صورتی که بارگذاری چنان آرام صورت گیرد که نیروهای لختی ناچیز شوند، می‌توان مسئله را به صورت استاتیکی در نظر گرفت.

تحلیل تیر نشان داده شده در شکل -۸ب به سبب نیروهای لختی[12] ناشی از تغییرمکان‌های وابسته به زمان که خود نیز متاثر از بزرگی نیروهای لختی هستند، بسیار پیچیده است. تنها راه مقابله با این چرخه، فرمول بندی مسئله به صورت معادلات دیفرانسیل

[11] Simple harmonic
[12] Inertial forces

می‌باشد. به دلیل توزیع پیوسته جرم تیر در طول آن برای تعیین کامل نیروهای لختی، تغییرمکان‌ها و شتاب‌های هر نقطه از تیر در راستای آن باید تعیین گردند. در این حالت تحلیل را بر حسب معادلات دیفرانسیل جزئی بایستی فرمول‌بندی نمود. زیرا افزون بر عامل زمان، موقعیت نقاط را در طول دهانه به عنوان یک متغییر مستقل بایستی در نظر گرفت. اما در صورتی که جرم را مانند شکل -۹ در نقاطی گسسته متمرکز کنیم، تحلیل مسئله بسیار آسان می‌شود. زیرا نیروهای لختی تنها در این نقاط می‌توانند بوجود آیند. در این حالت لازم است تغییرمکان‌ها و شتاب‌ها را تنها در این نقاط گسسته تعریف نماییم.



شکل -۹ ایده‌آل سازی تیر ساده به صورت جرم متمرکز

در صورتی که سه جرم نشان داده شده در شکل -۹ تنها قادر به حرکت در امتداد قائم باشند، هر یک از جرم‌ها به عنوان یک درجه آزادی به حساب آمده و کل سازه دارای سه درجه آزادی است. لیکن در صورتی که جرم‌های نشان داده شده مقید نشده باشند و حرکت دورانی برای آنها امکان‌پذیر باشد، بایستی درجه آزادی دورانی نیز برای آنها در نظر گرفته شود، که در این حالت سیستم دارای ۶ درجه آزادی خواهد بود. همچنین در صورتی که سختی محوری تیر کم باشد و جرم‌ها بتوانند در امتداد محور طولی تیر نیز حرکت کنند بنابراین تعداد کل درجات آزادی[۱۳] ۹ می‌باشد. در صورتی که سازه را به صورت سه بعدی در نظر بگیریم، هر یک از جرم‌ها ۶ درجه آزادی (سه تا انتقالی و سه تا دورانی) خواهند داشت و تعداد درجات آزادی کل سیستم برابر ۱۸ می‌باشد.

www.QSCE.ir

[13] Degree Of Freedom