

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



فصل مقدمه

زلزله یک لرزش ناگهانی و گذرای سطح زمین است که در اثر آزاد شدن انرژی ذخیره شده در سنگ‌های پوسته زمین به وجود می‌آید. این انرژی معمولاً در نتیجه‌ی حرکت صفحات تکتونیکی، فعالیت آتشفشانی، یا فعالیت‌های انسانی مانند معدن کاری یا انفجارها آزاد می‌شود. ساختمان‌ها باید برای نیرویی که آیین‌نامه برای آن مشخص کرده طراحی شوند تا در اثر وقوع زلزله‌های شدید پایداری خود را حفظ کنند.

علل اصلی وقوع زلزله

- اندرکنش صفحات زمین ساخت (۹۰٪)
- فعالیت های آتشفشانی (۵٪)
- تغییر حالت سنگ‌ها در اعماق پوسته (۲٪)
- فروریزش غارهای زیرزمینی (۱-۲٪)
- علل ناشناخته (۱-۲٪)

زلزله بیشینه مورد نظر: شدیدترین سطح جنبش زمین مورد استفاده در آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰ که احتمال رخداد آن در طول عمر سازه بسیار اندک است. عموماً دوره بازگشت این سطح جنبش حدود ۲۴۷۵ سال است. به این زلزله، زلزله سطح خطر ۲ نیز گفته می‌شود و رابطه بین دوره بازگشت زلزله و احتمال وقوع آن در طول عمر مفید سازه به صورت زیر است:

$$R_t = 1 - e^{\frac{-t}{T_R}}$$

در رابطه فوق:

R_t : احتمال وقوع زلزله

t : عمر مفید سازه

T_R : دوره بازگشت زلزله

مثال: احتمال وقوع زلزله‌ای با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله برای یک سازه با عمر مفید ۵۰ سال چقدر است؟

$$R_t = 1 - e^{\left(\frac{-50}{2475}\right)} = 0.01999 \cong 2\%$$

زلزله طرح: زلزله‌ای که احتمال فراگذشت آن در ۵۰ سال ۱۰ درصد باشد، دوره بازگشت این زلزله ۴۷۵ سال است. مقدار جنبش زمین در این زلزله دو سوم مقادیر جنبش زمین در زلزله بیشینه مورد نظر است.

$$S_{\text{طرح}} = \frac{2}{3} S_{\text{بیشینه}}$$

زلزله بهره‌برداری: زلزله‌ای است که احتمال فراگذشت آن در ۵۰ سال ۹۹/۵ درصد باشد. دوره بازگشت این زلزله حدوداً ۱۰ سال است. مقدار جنبش زمین در این زلزله یک نهم مقادیر جنبش زمین در زلزله بیشینه مورد نظر و یا یک ششم مقادیر جنبش در زلزله طرح است.

$$S_{\text{بهره‌برداری}} = \frac{1}{6} S_{\text{طرح}} = \frac{1}{9} S_{\text{بیشینه}}$$

انواع امواج زلزله

امواج لرزه‌ای براساس اینکه درون زمین منتشر می‌شوند یا بر روی زمین به دو دسته اصلی امواج حجمی و امواج سطحی تقسیم می‌شوند. امواج حجمی در فضای درون زمین منتشر می‌شوند و با رسیدن به سطح زمین، امواج سطحی به وجود می‌آیند. هر کدام از این امواج ویژگی‌های متفاوتی دارند و تأثیرات مختلفی بر زمین می‌گذارند.

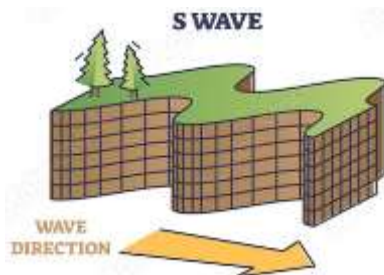
الف) امواج درونی (حجمی): این امواج از درون حجم زمین عبور می‌کنند و براساس این که باعث ایجاد چه نوع حرکتی در ذرات مسیر عبور خود می‌شوند دارای انواع زیر می‌باشند:

۱- امواج اولیه یا فشاری (P): این امواج باعث کشش‌ها و انقباض‌های متوالی در امتداد حرکت موج می‌شود. سرعت انتشار این امواج زیادتر از امواج دیگر است و اولین امواجی است که به ایستگاه لرزه‌نگار می‌رسد. امواج تراکمی از همه محیط‌هایی که توان تحمل فشار را دارند از جمله گازها، جامدات و مایعات عبور می‌کنند. دلیل نام‌گذاری این امواج به نام امواج اولیه، سرعت بالای آنهاست و اولین موجی که از زلزله احساس می‌شود امواج P است. این امواج با وجود سرعت بالای بسیار سریع، انرژی خود را از دست می‌دهند و باعث ایجاد خرابی زیادی نمی‌شود. سرعت انتشار این نوع امواج در حدود ۶ الی ۸ کیلومتر بر ثانیه است. این امواج هنگام رسیدن به سطح زمین باعث تولید ارتعاشات عمود بر سطح زمین می‌گردند و به همین دلیل در لرزه‌نگارهایی که حرکات قائم زمین را ثبت می‌کنند به عنوان امواج اصلی و غالب محسوب می‌شوند. سرعت این امواج از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

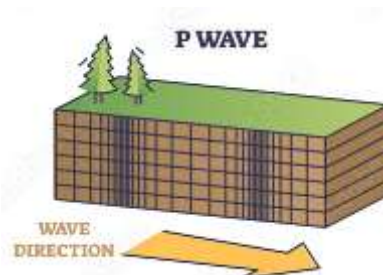
$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

۲- امواج ثانویه یا برشی (S): ارتعاش این امواج عمود بر امتداد انتشار موج، به مانند حرکت طنابی که در آن موج ایجاد می‌شود است. موج S دارای سرعت کمتری از موج P است و چند ثانیه پس از آن دریافت می‌شود. این امواج سبب حرکت ذرات فضای انتشار موج به صورت زیگزاگی و عمود بر امتداد انتشار موج می‌شوند. با توجه به اینکه انتشار موج ثانویه درون یک فضا باعث حرکت ذرات در چه راستایی می‌شود این امواج به دو دسته برشی افقی (SH) و برشی قائم (SV) تقسیم می‌شوند. سرعت امواج برشی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$



موج برشی



موج فشاری

ب) امواج سطحی: امواج حجمی هنگام عبور از لایه‌های زیر سطحی زمین و با تحریک سطح زمین با یکدیگر تداخل می‌کنند و امواج سطحی را به وجود می‌آورند. دامنه نوسان این امواج با افزایش عمق به صورت نمایی کاهش می‌یابد. امواج سطحی به ۳ دسته کلی ریلی، لائو و استونلی تقسیم می‌شوند.

فصل ۱

انواع نامنظمی‌ها در سازه



منظم یا نامنظم بودن سازه یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در طراحی و تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌ها است. وجود نامنظمی در سازه می‌تواند موجب افزایش نیروهای طراحی، تغییر در رفتار لرزه‌ای و در برخی موارد، محدودیت در استفاده از برخی سیستم‌های سازه‌ای یا روش‌های تحلیل شود. از این‌رو، شناسایی و تشخیص صحیح انواع نامنظمی‌ها از مراحل اساسی در فرآیند طراحی سازه به شمار می‌رود. مطابق ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰، نامنظمی‌های سازه به دو گروه کلی شامل نامنظمی در پلان و نامنظمی در ارتفاع تقسیم می‌شوند. هر یک از این نامنظمی‌ها دارای ضوابط، محدودیت‌ها و الزامات خاصی هستند که رعایت آن‌ها نقش مهمی در تأمین عملکرد مناسب ساختمان در برابر زلزله دارد. در این فصل، انواع نامنظمی‌های سازه بر اساس ضوابط ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ به همراه توضیحات و مثال‌های کاربردی بررسی می‌شوند.

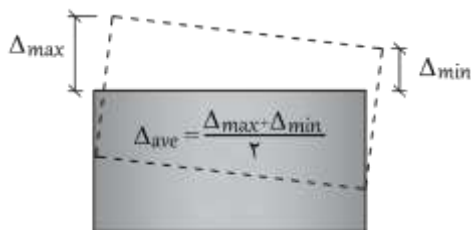
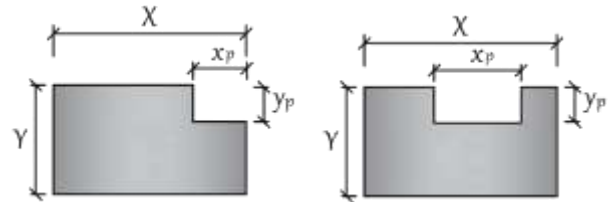
۱- نامنظمی‌ها در پلان

الف- نامنظمی هندسی: میزان پس‌رفتگی هم‌زمان در دو امتداد، بیش از ۲۰ درصد طول پلان در آن امتداد باشد.

$$\frac{x_p}{X} > 0.2$$

و هم‌زمان

$$\left(\frac{y_p}{Y}\right) > 0.2$$



$$TIR = \left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta_{ave}}\right)_{نسبی}$$

نامنظمی پیچشی زیاد $\Rightarrow TIR > 1/2$

نامنظمی پیچشی شدید $\Rightarrow TIR > 1/4$

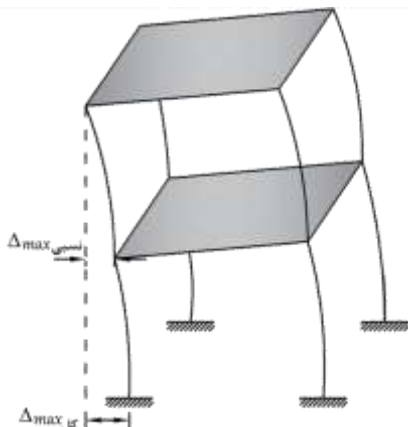
ب- نامنظمی پیچشی: در مواردی که در طبقه‌ای از ساختمان، تغییر شکل پیچشی نسبت به تغییر شکل جانبی (تغییر شکل‌های طبقه نسبت به طبقه پایین) قابل ملاحظه باشد. این موضوع با استفاده از نسبت نامنظمی پیچشی ساختمان (TIR) بررسی می‌شود. در هر امتداد، TIR ، نسبت حداکثر تغییر مکان نسبی در یک انتهای ساختمان در یک طبقه به متوسط تغییر مکان نسبی دو انتهای ساختمان در همان طبقه است که بر مبنای روش تحلیل استاتیکی معادل، با احتساب پیش‌تصادفی و منظور نمودن $A_j = 1/0$ محاسبه می‌شود. برای محاسبه TIR می‌توان دیافراگم‌ها را صلب در نظر گرفت. چنانچه نسبت TIR بیش از ۱/۲ باشد، نامنظمی پیچشی "زیاد" و در مواردی که TIR بیش از ۱/۴ باشد نامنظمی پیچشی "شدید" محسوب می‌شود.

بررسی نامنظمی‌های پیچشی صرفاً در مواردی که دیافراگم‌ها صلب یا نیمه صلب هستند موضوعیت دارد.

ضریب A_j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$1 \leq A_j = \left(\frac{\Delta_{max \text{ کل}}}{1/2 \Delta_{ave \text{ کل}}}\right)^2 \leq 3, \quad \Delta_{ave} = \left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta_{min}}\right)_{\text{کل}}$$

در رابطه فوق Δ_{max} کل و Δ_{ave} به ترتیب تغییر مکان حداکثر و تغییر مکان متوسط کل طبقه مورد نظر است (تغییر مکان نسبی نیست)



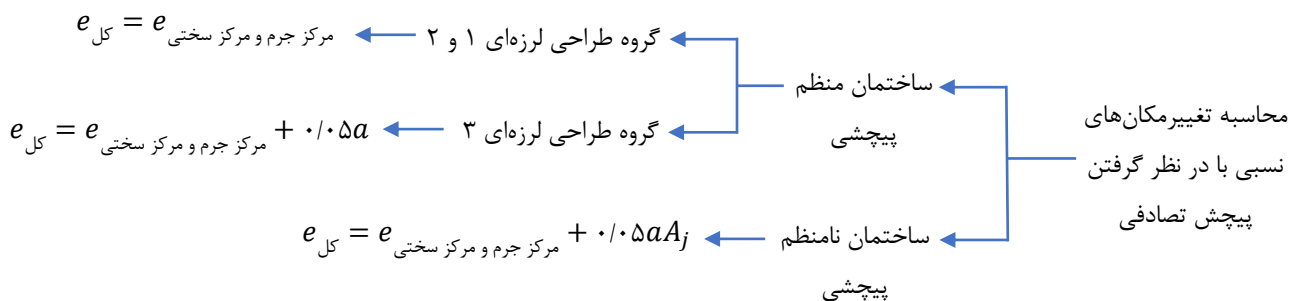
نکته: ضریب A_j برای هر طبقه و هر دو جهت سازه جداگانه محاسبه می‌شود و در صورتی که در تمامی طبقات مقدار TIR کوچکتر از $1/2$ باشد برای کل سازه مقدار ضریب A_j برابر ۱ خواهد بود. این ضریب می‌تواند برای طبقات، متفاوت باشد.

۱-۱- حداکثر خروج از مرکزیت

حداکثر خروج از مرکزیت کل ساختمان برابر فاصله بین مرکزسختی و مرکز جرم سازه به اضافه خروج از مرکزیت اتفاقی (۵ درصد بعد ساختمان در جهت عمود بر زلزله) خواهد بود که برای ساختمان‌های دارای نامنظمی پیچشی (زیاد و شدید) مقدار خروج از مرکزیت اتفاقی با ضریب A_j تشدید خواهد شد یعنی:

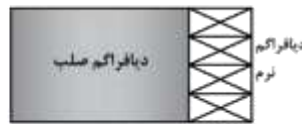
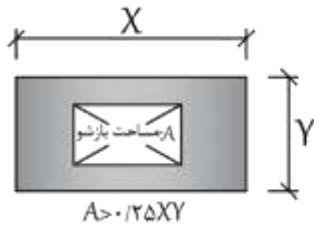
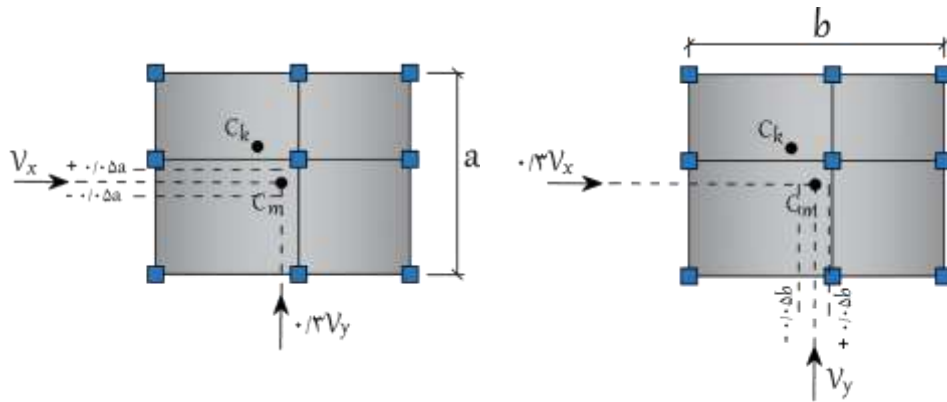
$$e_{\text{کل}} = e_{\text{مرکز جرم و مرکز سختی}} + 0.05aA_j$$

نکته: اثر پیچش اتفاقی باید در طراحی تمامی ساختمان‌های گروه طراحی لرزه‌ای ۳ در نظر گرفته شود، لیکن در گروه‌های طراحی لرزه‌ای ۱ و ۲ لحاظ نمودن اثر پیچش اتفاقی صرفاً در ساختمان‌های دارای نامنظمی پیچشی زیاد و شدید ضرورت داشته و در سایر ساختمان‌ها می‌توان از اثر آن صرف‌نظر نمود.



نتیجه‌گیری: در هیچ نقطه‌ای از کشور ایران، مقدار شتاب طیفی زلزله بیشینه مورد نظر بر روی سنگ بستر برای زمان تناوب ۱ ثانیه (S_1) بزرگتر از 0.6 نیست و همچنین برای سازه‌های مسکونی کوچکتر یا مساوی ۱۵ طبقه و کمتر از ۵۰ متر ضریب اهمیت برابر ۱ است، بنابراین گروه طراحی لرزه‌ای این نوع ساختمان‌ها بسته به منطقه ۲ یا ۱ خواهد بود. پس در نظر گرفتن برون مرکزی اتفاقی برای ساختمان‌های مسکونی منظم از نظر پیچشی در ایران که کوچکتر یا مساوی ۱۵ طبقه و کمتر از ۵۰ متر باشند ضروری نیست.

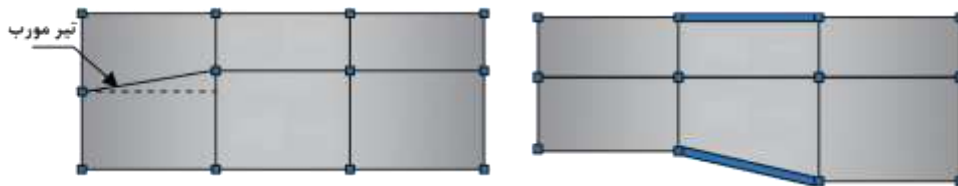
پیچش اتفاقی به منظور لحاظ نمودن احتمال تغییرات اتفاقی توزیع جرم و سختی و نیز آثار ناشی از مولفه پیچشی حرکت زمین در نظر گرفته می‌شود. مقدار این پیچش در هر طبقه را می‌توان از حاصل ضرب نیروی جانبی زلزله آن طبقه در ۵ درصد بعد ساختمان در آن طبقه و در امتداد عمود بر نیروی جانبی زلزله تعیین نمود. به عنوان یک روش دیگر برای منظور نمودن پیچش اتفاقی می‌توان مرکز جرم هر طبقه را به میزان ۵ درصد بعد ساختمان در آن طبقه، در امتداد عمود بر نیروی جانبی زلزله جابه‌جا نمود. برای هر امتداد لازم است این جابه‌جایی در هر دو طرف مرکز جرم انجام شود. اثرات پیچش اتفاقی باید برای هر یک از دو امتداد افقی سازه در نظر گرفته شود. در مواردی که لازم باشد سازه تحت اثر هم‌زمان نیروهای زلزله دو امتداد افقی عمود برهم محاسبه شود لازم نیست اثر پیچش اتفاقی در امتدادی که ۳۰ درصد نیروی زلزله اعمال می‌شود در نظر گرفته شود.



پ- نامنظمی در دیافراگم: تغییر ناگهانی در سختی دیافراگم به میزان بیش از ۵۰ درصد در یک دهانه نسبت به دهانه مجاور اتفاق افتاده باشد، یا در مواردی که بازشویی با مساحت بیش از ۲۵ درصد مساحت دیافراگم وجود داشته باشد.

ت- نامنظمی جابه‌جایی خارج از صفحه: در مواردی که انقطاعی در مسیر انتقال نیروهای جانبی به دلیل تغییر صفحه حداقل یکی از عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای ایجاد شده باشد.

ث- نامنظمی سیستم‌های غیرموازی: در مواردی که بعضی از عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای به موازات محورهای متعامد اصلی سیستم مقاوم لرزه‌ای نباشند.



نکته: در آیین‌نامه مقدار دقیقی برای این موضوع که حداکثر زاویه انحراف از محورهای اصلی چقدر باشد اشاره‌ای نشده است ولی در راهنمای نظام مهندسی تهران برای طراحی سازه و کنترل آن در صورتی که زاویه تیر یا ستون کمتر از ۱۵ درجه باشد آن‌را می‌توان به عنوان سازه منظم در نظر گرفت.



تبصره: در توزیع برش پایه در ارتفاع ساختمان، لازم است خرپشته نیز همواره به عنوان یک طبقه مستقل در نظر گرفته شود. (حتی برای حالتی که وزن آن کمتر از ۲۵ درصد وزن بام بوده و در محاسبه ارتفاع ساختمان در نظر گرفته نشده باشد)

مثال ۷: در یک ساختمان ۸ طبقه از روی تراز پایه با ارتفاع و وزن یکسان در کلیه طبقات، مقدار زمان تناوب تجربی 0.8 ثانیه و زمان تناوب تحلیلی برابر 0.9 ثانیه برآورد شده است. مقدار نیروی جانبی طبقه بام در تحلیل به روش استاتیکی معادل بر حسب مقدار برش پایه به کدامیک از مقادیر زیر نزدیکتر است؟ (V_u برش پایه است).

محاسبات ۹۵

$$(۱) 0.18V_u \quad (۲) 0.22V_u \quad (۳) 0.24V_u \quad (۴) 0.28V_u$$

حل:

دوره تناوب اصلی باید کمترین مقدار زیر در نظر گرفته شود:

$$T_{\text{اصلی}} = \min \left\{ T_{\text{تحلیلی}}, \frac{1}{4} T_{\text{تجربی}} \right\} = \min(0.9, 0.2 \times 0.8) = 0.2 \text{ sec}$$

$$k = 0.5T + 0.75 = 0.5 \times 0.2 + 0.75 = 0.85$$

$$F_u = \frac{W \times (0.18h)^{1/2}}{Wh^{1/2} \times (1^{1/2} + 2^{1/2} + 3^{1/2} + 4^{1/2} + 5^{1/2} + 6^{1/2} + 7^{1/2} + 8^{1/2})} \times V_u = 0.24V_u$$

گزینه ۳ صحیح است.

۳-۵- نیروی قائم ناشی از زلزله

حرکت زمین در هنگام زلزله تنها به راستای افقی محدود نمی‌شود و همواره دارای مؤلفه قائم نیز هست. این مؤلفه باعث ایجاد نیروهای قائم در سازه شده و بر رفتار کلی ساختمان تأثیر می‌گذارد، هرچند میزان تأثیر آن در اعضای مختلف سازه یکسان نبوده و در برخی اعضا می‌تواند قابل توجه باشد. در این بخش، نحوه محاسبه و اعمال بار قائم زلزله بر اساس ضوابط ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ بررسی می‌شود.

نیروی قائم ناشی از مؤلفه قائم شتاب زلزله باید در تحلیل کل سازه ساختمان منظور شود. مقدار این نیرو از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_{vut} = 0.2 S_{DS} \cdot W_D \quad (۱۶-۳)$$

در رابطه فوق:

F_{vut} = نیروی قائم ناشی از زلزله وارد بر کل سازه ساختمان

S_{DS} = پارامتر شتاب طیفی زلزله در زمان تناوبهای کوتاه روی سنگ بستر

W_D = مجموع بارهای مرده، وزن تاسیسات ثابت، وزن دیوارها، تیغه‌ها و جداکننده‌ها (صرف نظر از آنکه به عنوان بار مرده یا زنده محسوب می‌شوند)

این نیروی قائم باید در هر جهت رو به بالا و رو به پایین، به طور جداگانه به سازه اعمال گردد. زمانی که این نیرو به پایین در نظر گرفته می‌شود باعث افزایش بار وارد به سازه می‌شود و ترکیب بار زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$1/2 D + L + (E_h + E_v) + 0.2 S$$

اما در صورتی که این نیرو به سمت بالا باشد ترکیب بار زیر استفاده می‌شود:

$$0.9 D + (E_h - E_v)$$

در واقع این ترکیب بار حالتی را نشان می‌دهد که هنوز ساخت سازه به اتمام نرسیده و تمامی بارهای مرده (مثل بار کف‌سازی و...) به آن اعمال نشده و هیچ بار زنده‌ای روی آن قرار ندارد. در این حالت ممکن است برخی از المان‌ها به کشش بیفتند که این کنترل در این ترکیب بار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در مناطقی که در آن‌ها $S_s > 0.5$ یا $S_1 > 0.15$ باشد، به منظور تحلیل و طراحی اعضای زیر علاوه بر کنترل کل سازه با بار قائم زلزله، یک‌بار هم جداگانه نیروی قائم زلزله از طریق رابطه (۳-۱۷) محاسبه و صرفاً در ترکیب با بارهای ثقیلی (با ضرایب باری که در ترکیب با بارهای زلزله مقرر شده است) در طراحی این اعضا در نظر گرفته شود.

الف- تیرهای با طول دهانه بیش از ۱۵ متر

ب- تیرهایی که به عنوان تکیه‌گاه ستون عمل می‌کنند

پ- طره‌های با طول بیش از ۲ متر

ت- دال‌های بتنی تخت با طول دهانه بیش از ۱۰ متر

ث- اعضای که جزئی از سیستم مقاوم جانبی نیستند ولی از طریق دیافراگم کف‌ها با سیستم مقاوم لرزه‌ای مرتبط هستند.

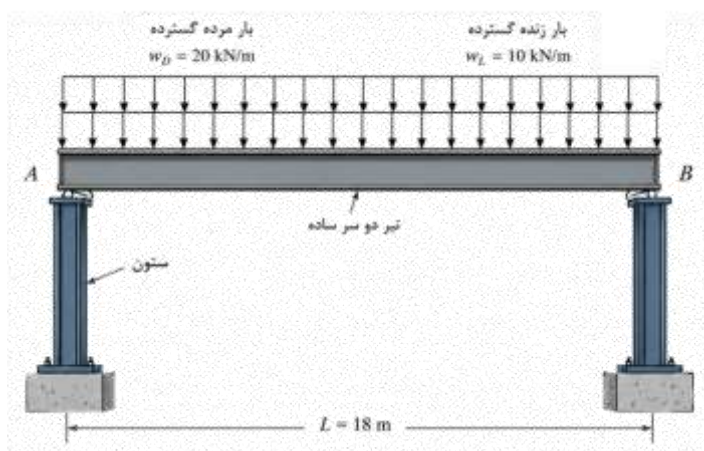
$$F_{vut} = 0.65 S_{DS} \cdot W_D \quad (3-17)$$

تبصره: عکس‌العمل حاصل از ترکیب بار مشروح در قسمت بالا باید در طراحی اجزائی که بار اعضای فوق‌الذکر را تحمل می‌کنند نیز در نظر گرفته شود.

نکته: در طراحی عناصر مذکور نیروی قائم زلزله محاسبه شده صرفاً با بارهای ثقیلی ترکیب شده و نیازی به ترکیب این نیرو با اثر نیروهای جانبی نیست یعنی:

$$1/2 D + L + E_v, \quad E_v = 0.65 S_{DS} \cdot W_D$$

کلیه تیرهای طره‌ای (حتی با طول کمتر از ۲ متر) باید یک‌بار هم به طور جداگانه برای نیروی زلزله قائم رو به بالا برابر با $0.2 W_D$ بدون حضور بارهای مرده، زنده و برف طراحی شوند.



مثال ۸: در سازه نشان داده شده در شکل مقابل ستون‌ها برای

چه مقدار بار محوری باید طراحی شوند؟ فرض کنید سازه در

شهر تبریز و بر روی خاک نوع I هست.

(۱) ۳۹۰ kN

(۲) ۴۴۰ kN

(۳) ۴۱۵ kN

(۴) ۳۸۵ kN

کلیه تیرهای طره باید یک‌بار هم به طور جداگانه برای نیروی زلزله قائم رو به بالا برابر با $0.2W_D$ بدون حضور بارهای مرده، زنده و برف طراحی شوند بنابراین با داشتن مقدار لنگر مثبت می‌توان مقدار بار مرده را حساب کرد:

$$0.2W_D \times 1/5 = 31/5 \Rightarrow W_D = 10.5 \text{ kN}$$

محاسبه بار قائم زلزله:

$$F_{vut} = 0.2S_{DS} \cdot W_D, \quad S_{DS} = \frac{2}{3} \times F_s \times S_s = \frac{2}{3} \times 1/0 \times 1/4 = 0.933$$

$$F_{vut} = 0.2 \times 0.933 \times 10.5 = 19/6 \text{ kN}$$

محاسبه لنگر خمشی منفی با دو ترکیب بار زیر:

$$1/2D + 1/6L, \quad 1/2D + L + E_v$$

$$1/2 \times 10.5 + 1/6L = 22.5 \Rightarrow L = 61/9 \text{ kN}$$

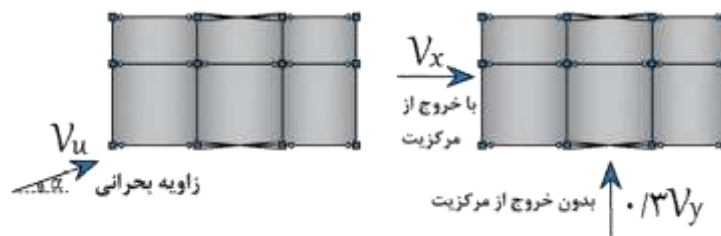
$$1/2 \times 10.5 + L + 19/6 = 22.5 \Rightarrow L = 79/4 \text{ kN}$$

نکته: در صورتی که مقدار بار زنده تقریباً از 33 kN کمتر باشد ترکیب بار $1/2D + L + E_v$ حاکم می‌شود.

گزینه ۱ صحیح است.

۳-۶- امتداد اثر نیروهای زلزله

ساختمان‌ها باید در دوام‌تداد عمود بر هم، تحت اثر نیروهای زلزله ناشی از مولفه‌های افقی شتاب حرکت زمین محاسبه شود. این محاسبه می‌تواند در هر یک از این دو امتداد، به طور مجزا و بدون در نظر گرفتن نیروی زلزله در امتداد دیگر انجام شود، لیکن در موارد زیر لازم است امتداد اعمال نیروی زلزله با زاویه مناسبی که حتی‌المقدور بیشترین اثر را ایجاد می‌کند انتخاب شود یا از جمع آثار ۱۰۰ درصد نیروی زلزله هر امتداد با ۳۰ درصد نیروی زلزله در امتداد عمود بر آن استفاده گردد یعنی:



الف- سازه و شالوده ساختمان‌های دارای نامنظمی در پلان از نوع نامنظمی پیچشی زیاد، پیچشی شدید و سیستم‌های غیر موازی.

ب- تمامی ستون‌هایی که در محل تقاطع دو یا چند سیستم مقاوم لرزه‌ای قرار دارند و نیز شالوده این اعضا. در این حالت، چنانچه بار محوری ناشی از نیروی زلزله نظیر با مولفه‌های افقی حرکت زمین در ستون، در هر دو امتداد متعامد ساختمان کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت بار محوری آن ستون باشد، رعایت این ضابطه برای آن ستون ضرورت ندارد. یعنی:

$$P_{u-\text{earthquake}} < 0.2\phi P_n$$

که در آن $P_{u-\text{earthquake}}$ نیروی محوری ایجاد شده در ستون فقط ناشی از بار زلزله بوده و P_n کمترین دو مقدار مقاومت کششی و فشاری اسمی عضو می‌باشد.



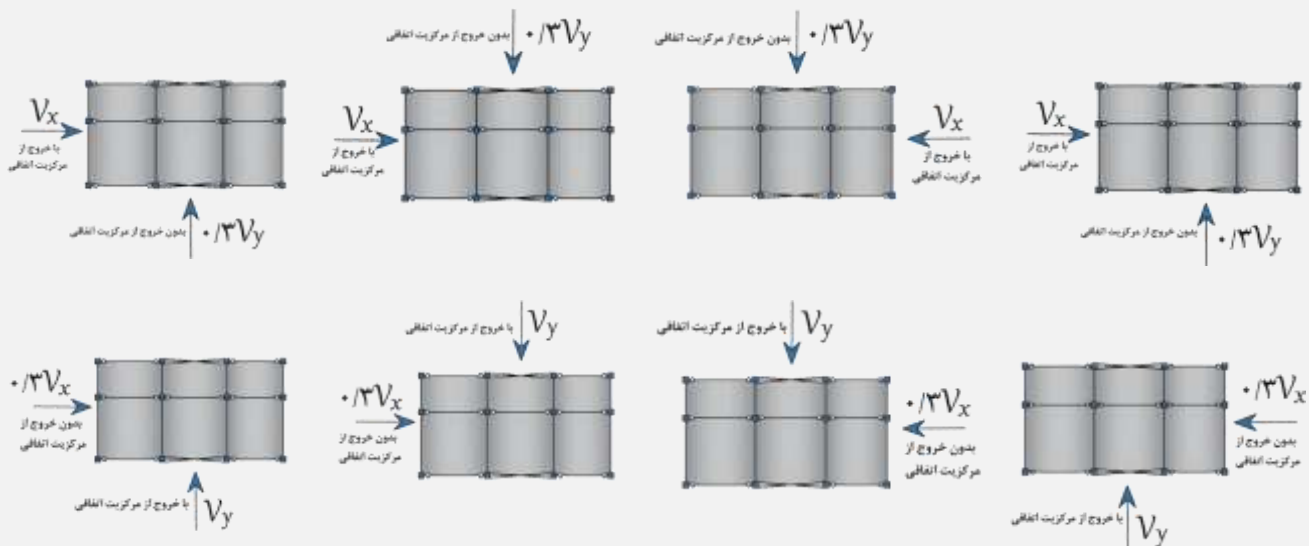
نکته: در ستون‌های فولادی مقاومت کششی بیشتر از مقاومت فشاری بوده (به دلیل کماتش در فشار در اعضای فولادی) و در ستون‌های بتنی مقاومت فشاری اسمی بیشتر از مقاومت کششی می‌باشد (صرف نظر از مقاومت کششی ستون)

پ- تمامی دیوارهای متشکل از قاب سبک فولادی سردنورد و مهارهای تسمه‌ای فولادی، دیوارهای برشی بتن‌آرمه و بنایی که از تلاقی چند دیوار متقاطع تشکیل شده‌اند و نیز شالوده این اعضا. در این حالت، چنانچه بار محوری ناشی از اثرات زلزله در کلیه قطعات این دیوارها، در هر دو امتداد متعامد ساختمان، کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت بار محوری آن‌ها باشد رعایت این ضابطه برای آن دیوار ضرورت ندارد.

ت- سیستم ستون کنسولی و نیز شالوده آن.

تبصره: در حالتی که از جمع آثار ۱۰۰ درصد نیروی زلزله یک امتداد با ۳۰ درصد نیروی زلزله در امتداد عمود بر آن استفاده می‌شود، منظور نمودن برون مرکزی اتفاقی، برای امتدادی که ۳۰ درصد نیروی زلزله اعمال می‌شود الزامی نیست.

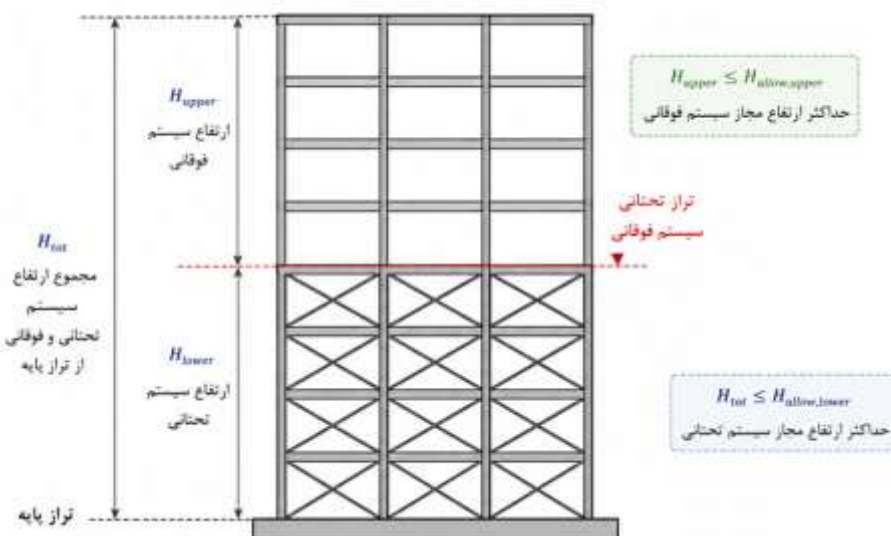
نکته: در هر یک از امتدادهای متعامد ساختمان، نیروی افقی زلزله باید در هر دو جهت آن امتداد یعنی به صورت رفت و برگشت در نظر گرفته شود. یعنی ۸ حالت زیر:



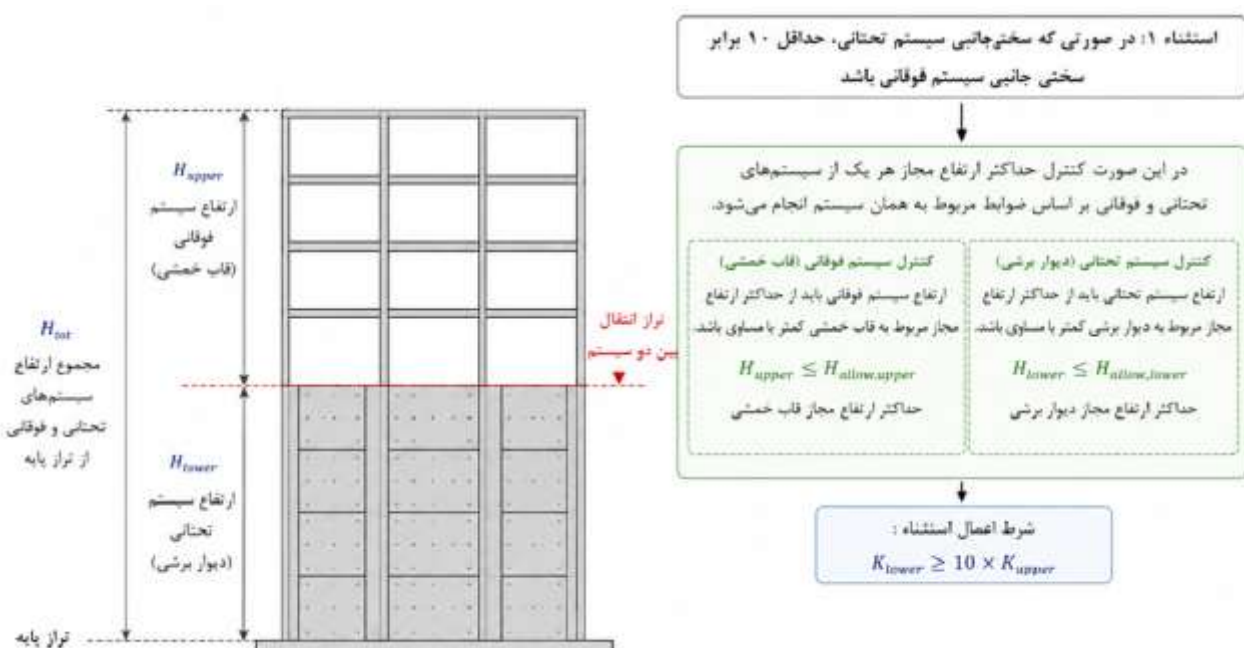
۳-۴ ترکیب سیستم‌ها در ارتفاع از روی تراز پایه

در ساختمان‌هایی که در یک امتداد، در ارتفاع از دو سیستم مقاوم لرزه‌ای مختلف استفاده شده باشد، نیروی جانبی زلزله در امتداد موردنظر در حالت کلی می‌تواند مطابق الزامات بند ۳-۱۱-۲ و در حالت خاص مطابق الزامات بند ۳-۱۱-۲-۲ تعیین شود. در ادامه انواع حالت‌های ترکیب سیستم‌ها در ارتفاع توضیح داده شده است.

ارتفاع سیستم فوقانی روی تراز تحتانی این سیستم نباید از حداکثر ارتفاع مجاز مربوط به این سیستم بیشتر باشد. همچنین مجموع ارتفاع سیستم‌های فوقانی و تحتانی از روی تراز پایه نباید از حداکثر ارتفاع مجاز مربوط به سیستم تحتانی بیشتر باشد.



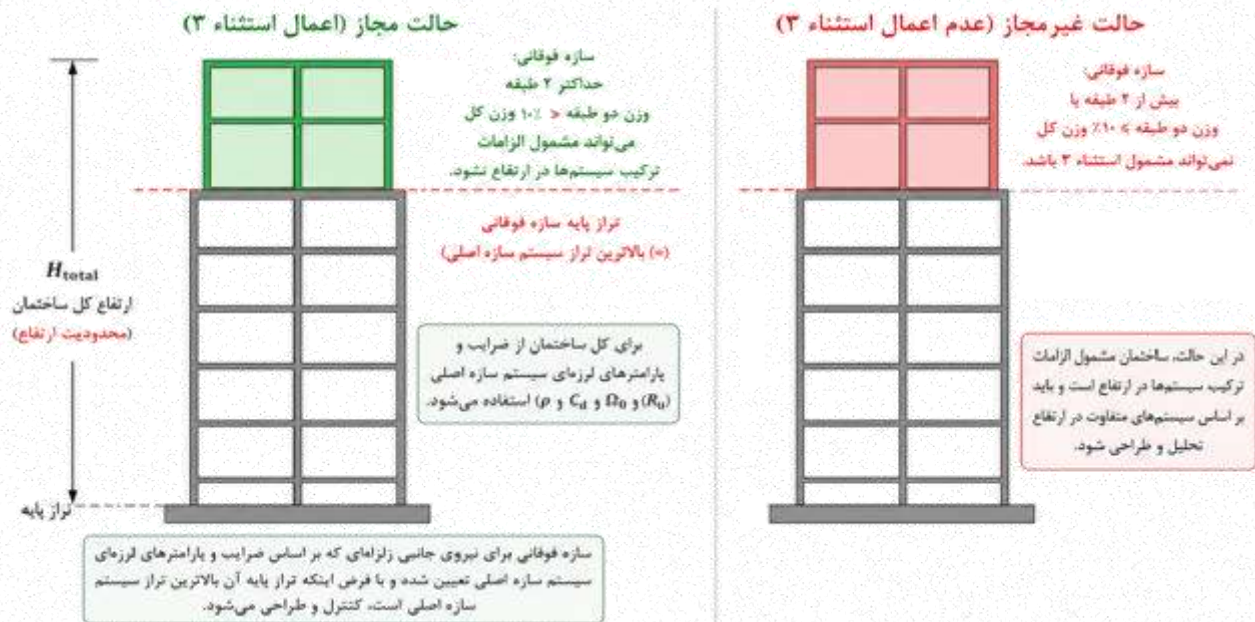
استثناء ۱: در صورتی که سختی جانبی سیستم تحتانی، حداقل ۱۰ برابر سختی جانبی سیستم فوقانی باشد، کنترل حداکثر ارتفاع مجاز هر یک از سیستم‌های تحتانی و فوقانی بر اساس ضوابط مربوط به همان سیستم انجام می‌شود. نحوه تعیین سختی سازه فوقانی و تحتانی در بخش بعدی همین فصل ارائه شده است.





استثناء ۲: در صورتی که سیستم ترکیبی در ارتفاع شرایط استفاده از تحلیل دو مرحله‌ای مطابق بند ۲-۱۱-۳ را نداشته باشد، رفتار سیستم فوقانی و تحتانی به اندازه کافی از یکدیگر مستقل نیست و هر دو سیستم در پاسخ لرزه‌ای کل ساختمان به طور همزمان مشارکت می‌کنند. در این حالت، اگر سیستم فوقانی از قاب خمشی ویژه یا سیستم دوگانه با قاب خمشی ویژه تشکیل شده باشد، قطع شدن قاب خمشی در محل تغییر سیستم موجب ناپیوستگی مسیر انتقال نیروهای جانبی، تغییر ناگهانی سختی و کاهش ظرفیت شکل‌پذیری سازه خواهد شد. از این‌رو، آیین‌نامه الزام می‌کند که قاب خمشی ویژه بدون انقطاع تا تراز پایه ادامه یابد تا مسیر انتقال نیرو، پیوستگی سختی و عملکرد لرزه‌ای مناسب سازه حفظ شود.

استثناء ۳: در مواردی که در بام ساختمان، سازه‌ای حداکثر دو طبقه با وزن کمتر از ۱۰ درصد وزن کل ساختمان وجود داشته باشد، ساختمان در امتداد موردنظر می‌تواند مشمول الزامات ترکیب سیستم‌ها در ارتفاع نشود و به‌عنوان یک سیستم سازه‌ای واحد با ضریب نامعینی ρ و پارامترهای لرزه‌ای R_u ، Ω_o و C_d سیستم سازه اصلی در نظر گرفته شود؛ لیکن محدودیت ارتفاعی باید بر اساس ارتفاع کل ساختمان کنترل شود. همچنین لازم است سازه فوقانی برای نیروی جانبی زلزله‌ای که باید بر اساس ضریب نامعینی ρ و پارامترهای لرزه‌ای R_u ، Ω_o و C_d همین قسمت تعیین شده و تراز پایه آن بالاترین تراز سیستم سازه اصلی فرض می‌شود، کنترل و طراحی گردد.



مثال ۱: در یک ساختمان ۸ طبقه با ارتفاع هر طبقه برابر ۳ متر سیستم سازه‌ای برای ۶ طبقه تحتانی از نوع قاب خمشی فولادی ویژه با مهاربند واگرای فولادی با تیر پیوند خمشی است و دو طبقه آخر از نوع قاب خمشی فولادی ویژه است. در صورتی که زمان تناوب اصلی سازه برابر ۱ ثانیه بوده و همچنین زمان تناوب اصلی دو طبقه آخر با فرض تکیه‌گاه گیردار برای آن برابر 0.2 ثانیه محاسبه شده است مقدار نیروی وارد به هر طبقه چقدر خواهد بود؟ سازه مسکونی در شهر تبریز واقع بر روی خاک نوع II است و وزن موثر لرزه‌ای طبقات به صورت جدول زیر می‌باشد. (سختی طبقات بالایی تقریباً ۶۰ درصد طبقات تحتانی فرض شود)

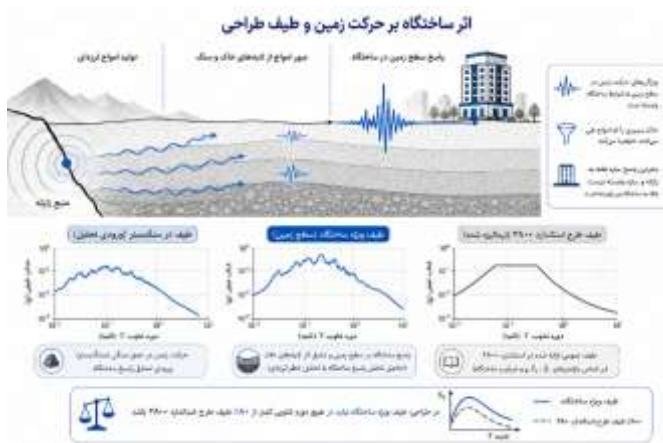
طبقه	وزن موثر لرزه‌ای (kN)	طبقه	وزن موثر لرزه‌ای (kN)
۱	۹۰۰	۵	۸۰۰
۲	۸۵۰	۶	۷۵۰
۳	۸۰۰	۷	۱۷۰
۴	۸۰۰	۸	۱۷۰



فصل ۵

انواع روش‌های تحلیل سازه و طیف ویژه ساختگاه

در تحلیل و طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، یکی از مهم‌ترین مراحل، تعریف صحیح تحریک لرزه‌ای وارد بر سازه است. به بیان ساده‌تر، قبل از اینکه بخواهیم بدانیم سازه چگونه در برابر زلزله رفتار می‌کند، باید بدانیم زلزله‌ای که به سازه وارد می‌شود چگونه تعریف شده است.



زلزله برخلاف بارهای معمول سازه‌ای مانند وزن مرده و زنده، یک بارگذاری ثابت و مستقل از زمان نیست؛ بلکه یک پدیده دینامیکی است که در هر لحظه مقدار شتاب، سرعت و تغییرمکان زمین تغییر می‌کند. بنابراین پاسخ سازه در برابر زلزله تنها به مشخصات خود سازه مانند جرم، سختی، شکل مودهای ارتعاشی و میرایی وابسته نیست، بلکه به ویژگی‌های حرکت زمین در محل احداث ساختمان نیز وابستگی زیادی دارد. به همین دلیل، در طراحی لرزه‌ای نمی‌توان یک حرکت زمین یکسان را برای تمام نقاط کشور و تمام ساختمان‌ها در نظر گرفت. شرایط محل احداث ساختمان می‌تواند باعث شود یک زلزله مشخص در دو محل مختلف، اثر متفاوتی بر سازه ایجاد کند.

اینجاست که مفهوم طیف ویژه ساختمان اهمیت پیدا می‌کند.

۵-۱- مفهوم ساختمان و تأثیر آن بر حرکت زمین

برای درک مفهوم طیف ویژه ساختمان، ابتدا باید بدانیم منظور از ساختمان چیست.

ساختمان به محل مشخصی گفته می‌شود که سازه در آن احداث می‌شود و ویژگی‌های زمین همان محل، مانند:

✍ نوع خاک،

✍ ضخامت لایه‌های خاک،

✍ سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در لایه‌ها،

✍ شرایط زمین‌شناسی،

✍ فاصله از گسل‌های فعال،

بر رفتار لرزه‌ای آن تأثیر می‌گذارند. حرکتی که در هنگام زلزله در سطح زمین مشاهده می‌شود، الزاماً همان حرکتی نیست که در محل ایجاد زلزله یا در سنگ بستر وجود داشته است. امواج لرزه‌ای پس از ایجاد در منبع زلزله، مسیر طولانی را طی می‌کنند و هنگام عبور از لایه‌های مختلف زمین ممکن است تغییر کنند. این تغییر می‌تواند به شکل:

✍ افزایش شدت حرکت زمین،

✍ کاهش شدت حرکت،

✍ تغییر محتوای فرکانسی حرکت،

✍ افزایش مدت زمان لرزش،



ظاهر شود. به عبارت ساده‌تر، زمین زیر ساختمان فقط یک تکیه‌گاه ساده نیست؛ بلکه می‌تواند مانند یک فیلتر دینامیکی عمل کند و ویژگی‌های حرکت زلزله را تغییر دهد.

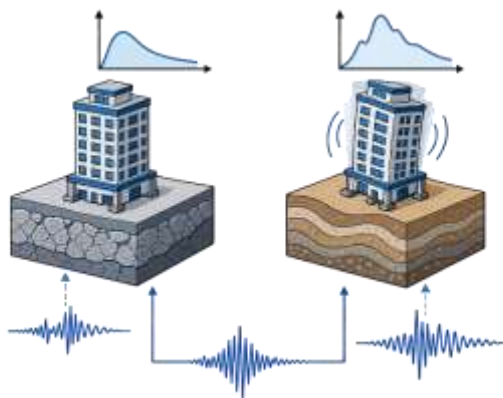
مثال ۱: کدام گزینه جزو تغییرات ذکرشده برای حرکت زمین در اثر عبور امواج لرزه‌ای از لایه‌های مختلف زمین نیست؟

- (۱) افزایش شدت حرکت زمین
- (۲) کاهش شدت حرکت زمین
- (۳) افزایش مدت زمان لرزش
- (۴) کاهش مدت زمان لرزش

تغییرات احتمالی حرکت زمین در اثر عبور امواج از لایه‌های مختلف می‌تواند شامل افزایش یا کاهش شدت حرکت، تغییر محتوای فرکانسی و افزایش مدت زمان لرزش باشد؛ بنابراین «کاهش مدت زمان لرزش» در موارد بیان‌شده قرار ندارد.
با توجه به توضیحات درسنامه گزینه (۴) صحیح است.

یک مثال ساده برای درک اثر ساختگاه

فرض کنید یک زلزله مشخص در یک منطقه رخ دهد و دو ساختمان مشابه در فاصله نزدیک از هم قرار داشته باشند:



- ✍ ساختمان اول روی یک لایه سنگی سخت ساخته شده است.
- ✍ ساختمان دوم روی لایه ضخیمی از خاک نرم قرار دارد.

اگرچه هر دو ساختمان یک زلزله را تجربه می‌کنند، اما حرکتی که به پایه آن‌ها می‌رسد کاملاً یکسان نخواهد بود. در زمین نرم، ممکن است برخی از دوره‌های تناوب حرکت زمین تقویت شوند و باعث افزایش پاسخ ساختمان شوند. در مقابل، در زمین سخت ممکن است این تقویت کمتر اتفاق بیفتد. بنابراین نمی‌توان گفت: یک زلزله مشخص همیشه یک اثر مشخص روی همه سازه‌ها دارد. بلکه باید گفت: اثر زلزله به ویژگی‌های خود زلزله و همچنین شرایط محلی زمین بستگی دارد.

طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ چیست؟

استاندارد ۲۸۰۰ برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، طیف‌های طرحی را ارائه کرده است که نماینده شرایط عمومی لرزه‌ای کشور هستند. این طیف‌ها با در نظر گرفتن عواملی مانند:

✍ خطر لرزه‌ای منطقه،

✍ نوع زمین،

✍ ضرایب اصلاحی مربوط به ساختگاه،

برای استفاده معمول در طراحی ساختمان‌ها تهیه شده‌اند. در اغلب پروژه‌های ساختمانی، استفاده از همین طیف‌های استاندارد کافی است و نیازی به انجام مطالعات پیچیده‌تر وجود ندارد. اما باید توجه داشت که این طیف‌ها یک نمایش عمومی از رفتار لرزه‌ای مناطق مختلف هستند و ممکن است در برخی شرایط خاص، تمام ویژگی‌های واقعی محل پروژه را نشان ندهند.

مثال ۲: کدام گزینه، تفاوت اصلی طیف طرح استاندارد و طیف ویژه ساختگاه را بهتر بیان می‌کند؟

(۱) طیف طرح استاندارد فقط برای ساختمان‌های کوتاه و طیف ویژه ساختگاه فقط برای ساختمان‌های بلند استفاده می‌شود.

(۲) طیف طرح استاندارد برای شرایط عمومی طراحی ارائه شده است، در حالی که طیف ویژه ساختگاه با توجه به ویژگی‌های واقعی یک ساختگاه مشخص تعیین می‌شود.

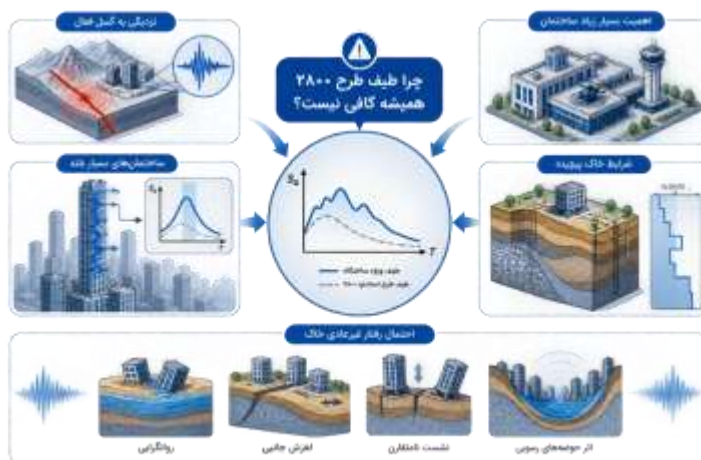
(۳) طیف طرح استاندارد فقط اثر نوع زمین را در نظر می‌گیرد، ولی طیف ویژه ساختگاه فقط اثر گسل را در نظر می‌گیرد.

(۴) طیف ویژه ساختگاه باید در تمام زمان‌های تناوب، مقدار بیشتری از طیف طرح استاندارد داشته باشد.

طیف طرح استاندارد برای استفاده معمول در طراحی ارائه شده است؛ اما طیف ویژه ساختگاه با توجه به ویژگی‌های واقعی ساختگاه و مطالعات اختصاصی آن تعیین می‌شود. همچنین طیف ویژه ساختگاه الزاماً در تمام دوره‌های تناوب بزرگ‌تر از طیف استاندارد نیست.

چرا طیف استاندارد همیشه کافی نیست؟

در بیشتر ساختمان‌ها، استفاده از طیف طرح استاندارد برای طراحی لرزه‌ای کافی است. با این حال، در برخی پروژه‌ها شرایط ساختگاه یا ویژگی‌های ساختمان می‌تواند باعث شود این طیف نتواند تقاضای لرزه‌ای محل را با دقت کافی نشان دهد. برای مثال:



✍ ساختگاه بسیار نزدیک به گسل فعال باشد.

✍ ساختمان اهمیت بسیار زیادی داشته باشد.

✍ ساختمان بسیار بلند باشد و به محدوده خاصی از طیف حساس شود.

✍ شرایط خاک پیچیده باشد.

✍ احتمال رفتار غیرعادی خاک در هنگام زلزله وجود داشته باشد.



در چنین شرایطی، لازم است به جای استفاده مستقیم از طیف عمومی، اثرات واقعی محل بررسی شده و طیف ویژه ساختمان تهیه شود.

مثال ۳: چه زمانی استفاده از طیف عمومی و طرح استاندارد ۲۸۰۰ پاسخ واقعی سازه را با دقت کافی نشان ندهد؟

(۱) سازه اهمیت بسیار زیادی داشته باشد یا بسیار بلند باشد

(۲) ساختمان بسیار نزدیک به گسل فعال باشد

(۳) شرایط خاک محل پیچیده باشد

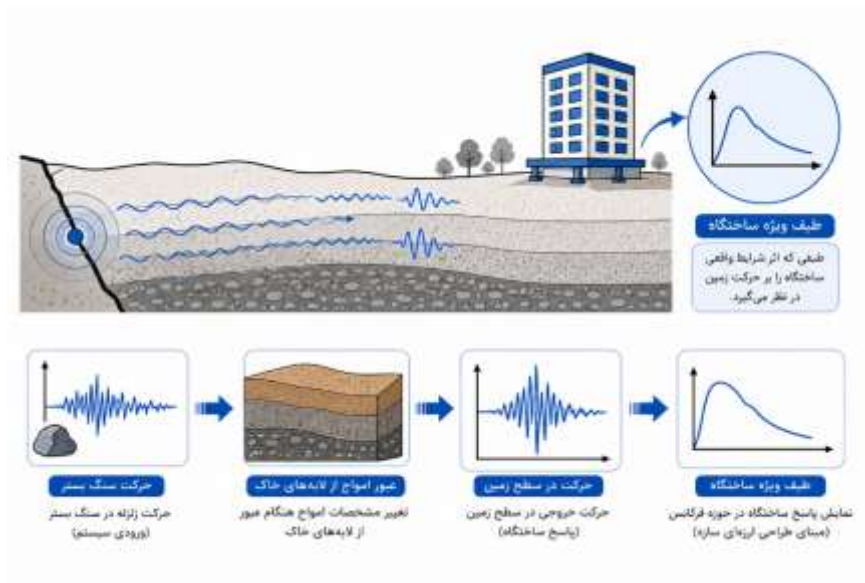
(۴) تمامی موارد

با توجه به توضیحات درسنامه گزینه (۴) صحیح است.

۵-۱-۱- تعریف طیف ویژه ساختمان

طیف ویژه ساختمان، طیفی است که برای یک محل مشخص و با در نظر گرفتن ویژگی‌های واقعی همان محل تهیه می‌شود. در تهیه این طیف، علاوه بر اطلاعات عمومی خطر لرزه‌ای، عواملی مانند:

۹۶



مشخصات چشمه‌های لرزه‌زا

فاصله ساختمان از گسل‌ها

شرایط زمین‌شناسی

مشخصات ژئوتکنیکی خاک

رفتار دینامیکی لایه‌های زمین

در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین تفاوت اصلی بین طیف استاندارد و طیف ویژه ساختمان این است که:

طیف استاندارد، یک طیف عمومی برای شرایط معمول است؛ اما طیف ویژه ساختمان، پاسخ لرزه‌ای یک محل مشخص را با جزئیات بیشتری نمایش می‌دهد.

نکته: تهیه طیف ویژه ساختمان لزوماً به این معنا نیست که مقادیر آن در تمام زمان‌های تناوب از طیف استاندارد بزرگ‌تر باشند. ممکن است طیف ویژه ساختمان در برخی محدوده‌های تناوبی بزرگ‌تر و در برخی محدوده‌ها کوچک‌تر از طیف استاندارد باشد. با این حال، استاندارد ۲۸۰۰ برای جلوگیری از کاهش بیش از حد تقاضای لرزه‌ای، حداقل‌هایی را برای طیف ویژه ساختمان تعیین کرده است که در ادامه بررسی می‌شوند.



فصل ۶

دیافراگم‌ها



دیافراگم‌ها که معمولاً کف‌های سازه‌ای تحمل‌کننده بارهای ثقلی در ساختمان‌ها هستند، هنگام وقوع زلزله، وظیفه انتقال نیروهای ایجادشده در کف‌ها به عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای را بر عهده دارند. دیافراگم‌ها باید در برابر تغییرشکل‌های افقی که در آن‌ها ایجاد می‌شود دارای مقاومت و سختی کافی باشند.

۶-۱- انواع دیافراگم‌ها از نظر صلبیت

الف) دیافراگم صلب: در دیافراگم‌های صلب، تغییرشکل داخل صفحه دیافراگم در مقایسه با تغییرمکان جانبی نسبی عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای، کوچک و قابل صرف‌نظر کردن است. در صورتی که تحت اثر نیروهای جانبی زلزله، تغییرمکان کلیه نقاط دیافراگم در مدل تحلیلی که در آن سختی داخل صفحه دیافراگم لحاظ گردیده، نسبت به مدل تحلیلی که در آن دیافراگم به صورت صلب مدل شده، کمتر از ۱۰ درصد اختلاف داشته باشد می‌توان دیافراگم را صلب در نظر گرفت.

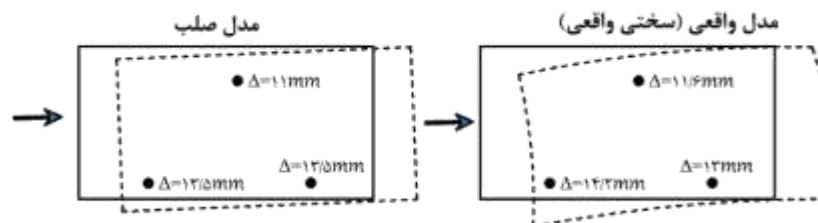
۱۹۶

تبصره: در مواردی که دیافراگم از نوع صلب یا نرم باشد در نظر گرفتن سختی دیافراگم در مدل‌سازی و تحلیل سازه بلامانع است.

دیافراگم‌های دال بتنی و عرشه فولادی پرشده با بتن، با نسبت دهانه به عمق کمتر یا برابر با ۳ در ساختمان‌هایی که فاقد هر نوع نامنظمی در پلان باشند را نیز می‌توان صلب در نظر گرفت. دهانه دیافراگم، فاصله افقی بین عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای مجاور است که تامین‌کننده اصلی سختی و مقاومت لازم برای نگهداری دیافراگم می‌باشند و عمق دیافراگم بعد دیافراگم در امتداد نیروی جانبی در دهانه مورد نظر با احتساب اثر بازشوها در صورت وجود است.

تبصره: در صورتی که دیافراگم، مطابق ضوابط فوق، صلب محسوب شود، لیکن اثرات رانش معکوس در سازه قابل ملاحظه باشد، در نظر گرفتن سختی دیافراگم در مدل سازه ضرورت دارد. رانش معکوس (*Backstay*) پدیده‌ای است که در ساختمان‌هایی که نیروهای زلزله عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای بخش فوقانی ساختمان از طریق دیافراگم‌هایی به عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای بخش تحتانی، که دارای ابعاد بزرگتری در پلان بوده و توسط دیوارهای حائل بتن‌آرمه سخت محصور شده است، منتقل می‌شود، اتفاق می‌افتد. این پدیده شامل ایجاد تلاش‌ها و تغییرشکل‌هایی در دیافراگم‌های بخش تحتانی ساختمان، برای ایجاد تعادل با اثرات نیروهای جانبی زلزله بخش فوقانی است.

مثال ۱: در اثر زلزله در جهت افقی تغییرشکل‌های زیر در دیافراگم ایجاد شده است. با استفاده از اطلاعات داده شده بررسی کنید که آیا دیافراگم از نوع صلب هست یا خیر؟



حل: محاسبه درصد اختلاف در نقطه پایین سمت چپ:

$$\frac{|13/5 - 14/2|}{14/2} \times 100 = 4/93\%$$

محاسبه درصد اختلاف در نقطه پایین سمت راست:

$$\frac{|13/5 - 13|}{13} \times 100 = 3/85 \%$$

محاسبه درصد اختلاف در نقطه بالا:

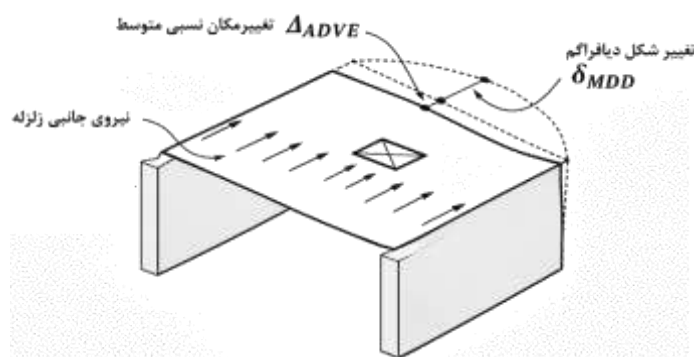
$$\frac{|11 - 11/6|}{11/6} \times 100 = 5/17 \%$$

چون در تمامی نقاط این اختلاف کمتر از ۱۰ درصد است پس دیافراگم را می‌توان صلب در نظر گرفت.

(ب) دیافراگم نرم

در دیافراگم‌های نرم، تغییرشکل داخل صفحه دیافراگم در مقایسه با تغییرمکان جانبی نسبی عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای قابل ملاحظه است. در صورتی که دیافراگم صلب محسوب نشود و نیز رابطه زیر برقرار باشد، دیافراگم نرم محسوب می‌شود.

$$\frac{\delta_{MDD}}{\Delta_{ADVE}} > 2 \quad (1-6)$$



δ_{MDD} : حداکثر تغییرشکل داخل صفحه دیافراگم در دهانه مورد نظر ناشی از نیروهای جانبی زلزله

Δ_{ADVE} : متوسط تغییرمکان جانبی نسبی ارتجاعی عناصر قائم مقاوم لرزه‌ای طرفین دهانه مورد نظر دیافراگم در طبقه مورد نظر ناشی از نیروی جانبی زلزله

همچنین دیافراگم‌های ساخته شده از عرشه فولادی بدون بتن رویه یا ساخته از پنل‌های با مصالح سازه‌ای چوبی در ساختمان‌هایی که سیستم مقاوم لرزه‌ای آن‌ها متشکل از قاب مهاربندی شده فولادی یا دیواربرشی بتنی، فولادی یا بنایی باشد را می‌توان نرم در نظر گرفت.

(ج) دیافراگم نیمه صلب

چنانچه دیافراگم در هیچ یک از دسته‌های صلب یا نرم قرار نگیرد نیمه صلب محسوب شده و باید سختی آن در تحلیل سازه از طریق مدل کردن دیافراگم در نظر گرفته شود.

در سازه‌های دارای دیافراگم‌های صلب و نیمه‌صلب، به منظور توزیع برش طبقه ناشی از زلزله در پلان، در نظر گرفتن اثر لنگرهای پیچشی در ساختمان، با رعایت تبصره ۱ بند ۳-۹-۳ (پیچش تصادفی برای گروه طراحی لرزه‌ای ۳ در کلیه حالات و برای گروه طراحی لرزه‌ای ۱ و ۲ در ساختمان‌های دارای نامنظمی پیچشی زیاد و شدید) الزامی است. لیکن در سازه‌های دارای دیافراگم نرم در توزیع برش طبقه ناشی از زلزله

فصل ۷

کنترل‌های بعد از طراحی در ساختمان‌ها



پس از طراحی اعضای سازه و کنترل الزامات مقاومتی، لازم است عملکرد کلی ساختمان از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. برخی از این کنترل‌ها، علاوه بر تأمین ایمنی سازه، نقش مهمی در بهره‌برداری مناسب، جلوگیری از آسیب‌های غیرسازه‌ای و اطمینان از عملکرد مطلوب ساختمان در هنگام زلزله دارند. در این فصل، مهم‌ترین کنترل‌های پس از طراحی شامل کنترل تغییرمکان جانبی، محاسبه درز انقطاع، کنترل واژگونی ساختمان و بررسی اثر زلزله بهره‌برداری، بر اساس ضوابط ویرایش پنجم استاندارد ۲۸۰۰ تشریح خواهد شد.

۷-۱- کنترل تغییرمکان در سازه

تغییرمکان جانبی زیاد در سازه باعث تخریب اجزای غیرسازه‌ای و همچنین ممکن است باعث ناپایداری سازه شود. همچنین محدودیت تغییرمکان ضریب اطمینانی برای عدم قطعیت‌ها و عدم مدلسازی دقیق توسط نرم‌افزارها است.

در فصل قبلی به نحوه محاسبه برش پایه و توزیع این نیرو در ارتفاع طبقه پرداخته شد. در اثر اعمال نیروی جانبی به سازه تغییرشکل‌های جانبی در آن ایجاد می‌شود که این تغییرشکل‌های الاستیک را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\Delta_{eu} = \frac{V}{K} \quad (۷-۱)$$

در رابطه فوق:

V : برش طبقه مورد نظر بر حسب kN

K : سختی طبقه بر حسب kN/m

Δ_{eu} = تغییرمکان جانبی غیرارتجاعی طبقه نسبت به طبقه زیرین بر حسب متر است (دریافت طبقه)

تغییرمکان جانبی نسبی ارتجاعی هر طبقه بر مبنای اختلاف بین تغییرمکان‌های جانبی کلی مراکز جرم کف‌های بالا و پایین آن طبقه و براساس یکی از روش‌های تحلیل خطی محاسبه می‌شود لیکن در ساختمان‌های دارای نامنظمی پیچشی زیاد و شدید محاسبه تغییرمکان جانبی نسبی ارتجاعی هر طبقه باید بر مبنای بیشترین اختلاف بین تغییرمکان‌های جانبی گره‌های قرار گرفته در یک امتداد قائم در کف‌های بالا و پایین آن طبقه که در محل محورهای کناری ساختمان قرار دارند انجام شود.

محاسبه Δ_{eu} طبقات باید در حضور بارهای ثقلی قابل انتظار و با در نظر گرفتن آثار $P - \Delta$ انجام شود. بارهای ثقلی قابل انتظار نباید کمتر از $D + 0.5L$ در نظر گرفته شود که D بار مرده و L بار زنده کاهش نیافته است و مطابق ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان تعیین می‌گردند. مقدار L در ترکیب فوق را می‌توان برای بارهای زنده کمتر از ۵ کیلونیوتن بر مترمربع برابر $0.4L_0$ و برای بارهای زنده ۵ کیلونیوتن بر مترمربع و بیشتر برابر $0.8L_0$ در نظر گرفت L_0 حداقل بار زنده گسترده یکنواخت، مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان می‌باشد.

این تغییرمکان‌ها که براساس تحلیل خطی به دست آمده‌اند واقعی نبوده و باید آن‌ها به تغییرمکان واقعی تبدیل کرد. آیین‌نامه با استفاده از ضریب بزرگنمایی تغییرمکان (C_d)، تغییرمکان‌های به دست آمده از تحلیل خطی را به تغییرمکان واقعی تبدیل می‌کند.

$$\Delta_M = C_d \Delta_{eu} \quad (۲-۷)$$

برش پایه به دست آمده برای ساختمان‌های با گروه اهمیت‌های متفاوت به ضریب اهمیت ساختمان (I_e) ضرب شده است که اگر در محاسبه تغییرمکان از این ضریب صرف‌نظر کنیم می‌توان رابطه را به صورت زیر نوشت:

$$\Delta_M = \frac{C_d \Delta_{eu}}{I_e} \quad (۳-۷)$$

تبصره: در صورتی سازه دارای نامنظمی پیچشی (زیاد و یا شدید) یا نامنظمی سیستم‌های غیرموازی باشد در این صورت محاسبه تغییر مکان سازه به صورت مراحل زیر خواهد بود:

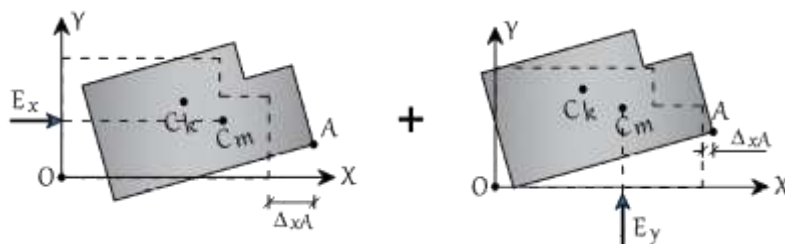
برای محاسبه تغییرمکان در جهت x : ابتدا ۱۰۰ درصد نیروی زلزله در جهت x به سازه وارد شده و مقدار تغییرمکان غیر خطی آن با اعمال ضرایب $\frac{C_{dx}}{I_e}$ به دست می‌آید. در گام بعدی نیروی زلزله y در جهت y به سازه وارد شده و تغییرمکان واقعی حداکثر (در گوشه پلان) در جهت x سازه با اعمال ضریب $\frac{C_{dy}}{I_e} \cdot 0.3$ محاسبه می‌شود.

مقدار تغییرمکان برابر جمع جبری دو مقدار $\frac{\Delta_{eu} C_{dx}}{I_e}$ و $\frac{\Delta_{eu} C_{dy}}{I_e} \cdot 0.3$ خواهد بود:

$$\Delta_x = \frac{\overbrace{\Delta_{eu-x} \cdot C_{dx}}^{\text{با اعمال نیروی } V_x}}{I_e} + \frac{\overbrace{\Delta_{eu-x} \cdot C_{dy}}^{\text{با اعمال نیروی } V_y}}{I_e} \times 0.3 \quad (۴-۷)$$

برای محاسبه تغییرمکان در جهت y : ابتدا ۱۰۰ درصد نیروی زلزله در جهت y به سازه وارد شده و مقدار تغییرمکان غیر خطی آن با اعمال ضرایب $\frac{C_{dy}}{I_e}$ به دست می‌آید. در گام بعدی نیروی زلزله x در جهت x به سازه وارد شده و تغییرمکان واقعی حداکثر (در گوشه پلان) در جهت y سازه با اعمال ضریب $\frac{C_{dx}}{I_e} \cdot 0.3$ محاسبه می‌شود.

$$\Delta_y = \frac{\overbrace{\Delta_{eu-y} \cdot C_{dy}}^{\text{با اعمال نیروی } V_y}}{I_e} + \frac{\overbrace{\Delta_{eu-x} \cdot C_{dx}}^{\text{با اعمال نیروی } V_x}}{I_e} \times 0.3$$



نکته: این نیروها باید با خروج از مرکزیت اتفاقی به سازه وارد شوند و نیروی زلزله وارد به سازه براساس زمان تناوب تحلیلی محاسبه گردد همچنین در صورتی که سازه درامتداد مورد نظر دارای نامنظمی پیچشی باشد باید اثر ضریب تشدید پیچشی اتفاقی (A_j) نیز در تعیین این تغییرمکان لحاظ شده باشد.

جدول (۱-۷) مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی مجاز طبقه (Δ_a)

گروه اهمیت ساختمان			
گروه ۴	گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱



$0.25h$	$0.2h$	$0.15h$	$0.1h$
---------	--------	---------	--------

تبصره ۱: در حالتی که در هر یک از امتدادهای ساختمان، سیستم مقاوم لرزه‌ای آن امتداد صرفاً از قاب‌های خمشی تشکیل شده و آن امتداد مشمول اعمال ضریب نامعینی باشد، مقدار تغییرمکان جانبی نسبی مجاز طبقات برای آن امتداد باید برابر Δ_a/ρ در نظر گرفته شود.

تذکر: برش پایه وارده به سازه برای محاسبه تغییرمکان به ضریب ρ ضرب نمی‌شود و اگر سازه با سیستم قاب خمشی بوده و دارای نامعینی کافی نباشد محدودیت تغییرمکان برای آن بیشتر خواهد شد:

جدول (۲-۷) مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی مجاز طبقه (Δ_a) برای قاب

خمشی که مشمول ضریب نامعینی ρ باشد.

گروه اهمیت ساختمان			
گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	گروه ۴
$\frac{0.1h}{\rho}$	$\frac{0.15h}{\rho}$	$\frac{0.2h}{\rho}$	$\frac{0.25h}{\rho}$

۲۰۸

تبصره ۲: در صورتی که سیستم مقاوم لرزه‌ای از نوع دیوار برشی بنایی مسلح باشد، مقدار تغییرمکان جانبی نسبی مجاز طبقات باید مطابق با ضوابط مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان باشد.

تبصره ۳: چنانچه قاب‌های خمشی از نوع متوسط یا معمولی در هر یک از سیستم‌های قاب ساختمانی، قاب خمشی یا دوگانه وجود داشته باشد، مقادیر تغییرمکان جانبی نسبی مجاز طبقه برای گروه اهمیت ۲ باید به $0.125h$ و برای گروه اهمیت ۳ و ۴ به $0.15h$ محدود گردد.

نکته: در محاسبه تغییرمکان جانبی نسبی طبقات، رعایت برش پایه حداقل ضروری است.

$$\text{اگر } S_1 < 0.6 \Rightarrow V_{u \min - Drift} = 0.44 S_{DS} \cdot I_e W \geq 0.1 \quad (5-7)$$

همچنین در صورتی که $S_1 \geq 0.6$ باشد، $V_{u \min - Drift}$ نباید از مقدار رابطه زیر نیز کمتر در نظر گرفته شود:

$$\text{اگر } S_1 \geq 0.6 \Rightarrow V_{u \min - Drift} = \max \left\{ \frac{0.5 S_1 I_e}{R_u}, 0.44 S_{DS} \cdot I_e, 0.1 \right\} W \quad (6-7)$$

در محاسبه انواع تغییرمکان‌های جانبی سازه، مقدار برش پایه را می‌توان بر مبنای زمان تناوب اصلی نوسان جانبی سازه در امتداد مورد نظر، حاصل از تحلیل سازه و بدون منظور نمودن محدودیت $1/4$ برابر زمان تناوب حاصل از روابط تجربی تعیین نمود.

$$T_{\text{اصلی-Drift}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (7-7)$$

تذکر: در محاسبه زمان تناوب تحلیلی سیستم برای سازه‌های بتن آرمه ضرایب ترک خوردگی باید عیناً ضرایبی در نظر گرفته شوند که برای طراحی و کنترل سازه اعمال می‌شود.

T	Sa (S1=0.6)	Sa (S1=0.55)	Sa (S1=0.50)	Sa (S1=0.45)	Sa (S1=0.6)	Sa (S1=0.55)	Sa (S1=0.50)	Sa (S1=0.45)
0	0.373	0.373	0.373	0.373	0.360	0.360	0.360	0.360
0.02	0.504	0.516	0.530	0.548	0.482	0.493	0.506	0.522
0.04	0.635	0.658	0.687	0.722	0.603	0.625	0.652	0.684
0.06	0.765	0.801	0.844	0.896	0.725	0.758	0.797	0.846
0.08	0.896	0.933	0.933	0.933	0.846	0.890	0.900	0.900
0.1	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.12	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.14	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.16	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.18	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.2	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.22	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.24	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.26	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.28	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.3	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.32	0.933	0.933	0.933	0.933	0.900	0.900	0.900	0.900
0.34	0.933	0.933	0.933	0.882	0.900	0.900	0.900	0.882
0.36	0.933	0.933	0.926	0.833	0.900	0.900	0.900	0.833
0.38	0.933	0.933	0.877	0.789	0.900	0.900	0.877	0.789
0.4	0.933	0.917	0.833	0.750	0.900	0.900	0.833	0.750
0.42	0.933	0.873	0.794	0.714	0.900	0.873	0.794	0.714
0.44	0.909	0.833	0.758	0.682	0.900	0.833	0.758	0.682
0.46	0.870	0.797	0.725	0.652	0.870	0.797	0.725	0.652
0.48	0.833	0.764	0.694	0.625	0.833	0.764	0.694	0.625
0.5	0.800	0.733	0.667	0.600	0.800	0.733	0.667	0.600
0.52	0.769	0.705	0.641	0.577	0.769	0.705	0.641	0.577
0.54	0.741	0.679	0.617	0.556	0.741	0.679	0.617	0.556
0.56	0.714	0.655	0.595	0.536	0.714	0.655	0.595	0.536
0.58	0.690	0.632	0.575	0.517	0.690	0.632	0.575	0.517
0.6	0.667	0.611	0.556	0.500	0.667	0.611	0.556	0.500
0.62	0.645	0.591	0.538	0.484	0.645	0.591	0.538	0.484
0.64	0.625	0.573	0.521	0.469	0.625	0.573	0.521	0.469
0.66	0.606	0.556	0.505	0.455	0.606	0.556	0.505	0.455
0.68	0.588	0.539	0.490	0.441	0.588	0.539	0.490	0.441
0.7	0.571	0.524	0.476	0.429	0.571	0.524	0.476	0.429
0.72	0.556	0.509	0.463	0.417	0.556	0.509	0.463	0.417
0.74	0.541	0.495	0.450	0.405	0.541	0.495	0.450	0.405
0.76	0.526	0.482	0.439	0.395	0.526	0.482	0.439	0.395
0.78	0.513	0.470	0.427	0.385	0.513	0.470	0.427	0.385
0.8	0.500	0.458	0.417	0.375	0.500	0.458	0.417	0.375
0.82	0.488	0.447	0.407	0.366	0.488	0.447	0.407	0.366
0.84	0.476	0.437	0.397	0.357	0.476	0.437	0.397	0.357
0.86	0.465	0.426	0.388	0.349	0.465	0.426	0.388	0.349
0.88	0.455	0.417	0.379	0.341	0.455	0.417	0.379	0.341
0.9	0.444	0.407	0.370	0.333	0.444	0.407	0.370	0.333
0.92	0.435	0.399	0.362	0.326	0.435	0.399	0.362	0.326
0.94	0.426	0.390	0.355	0.319	0.426	0.390	0.355	0.319
0.96	0.417	0.382	0.347	0.313	0.417	0.382	0.347	0.313
0.98	0.408	0.374	0.340	0.306	0.408	0.374	0.340	0.306
1	0.400	0.367	0.333	0.300	0.400	0.367	0.333	0.300

برای خاک نوع I با شتاب طیفی زلزله بیشینه $S_s = 1/3$ و $S_s = 1/25$ برای زمان تناوب ۰ تا ۱ ثانیه



T	Sa (S1=0.6)	Sa (S1=0.55)	Sa (S1=0.50)	Sa (S1=0.45)	Sa (S1=0.55)	Sa (S1=0.50)	Sa (S1=0.45)	Sa (S1=0.40)
0	0.347	0.347	0.347	0.347	0.333	0.333	0.333	0.333
0.02	0.459	0.470	0.482	0.497	0.447	0.458	0.472	0.490
0.04	0.572	0.592	0.617	0.647	0.561	0.583	0.611	0.646
0.06	0.685	0.715	0.752	0.797	0.674	0.708	0.750	0.802
0.08	0.797	0.838	0.867	0.867	0.788	0.833	0.833	0.833
0.1	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.12	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.14	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.16	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.18	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.2	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.22	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.24	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.26	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.28	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.3	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.32	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833
0.34	0.867	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.784
0.36	0.867	0.867	0.867	0.833	0.833	0.833	0.833	0.741
0.38	0.867	0.867	0.867	0.789	0.833	0.833	0.789	0.702
0.4	0.867	0.867	0.833	0.750	0.833	0.833	0.750	0.667
0.42	0.867	0.867	0.794	0.714	0.833	0.794	0.714	0.635
0.44	0.867	0.833	0.758	0.682	0.833	0.758	0.682	0.606
0.46	0.867	0.797	0.725	0.652	0.797	0.725	0.652	0.580
0.48	0.833	0.764	0.694	0.625	0.764	0.694	0.625	0.556
0.5	0.800	0.733	0.667	0.600	0.733	0.667	0.600	0.533
0.52	0.769	0.705	0.641	0.577	0.705	0.641	0.577	0.513
0.54	0.741	0.679	0.617	0.556	0.679	0.617	0.556	0.494
0.56	0.714	0.655	0.595	0.536	0.655	0.595	0.536	0.476
0.58	0.690	0.632	0.575	0.517	0.632	0.575	0.517	0.460
0.6	0.667	0.611	0.556	0.500	0.611	0.556	0.500	0.444
0.62	0.645	0.591	0.538	0.484	0.591	0.538	0.484	0.430
0.64	0.625	0.573	0.521	0.469	0.573	0.521	0.469	0.417
0.66	0.606	0.556	0.505	0.455	0.556	0.505	0.455	0.404
0.68	0.588	0.539	0.490	0.441	0.539	0.490	0.441	0.392
0.7	0.571	0.524	0.476	0.429	0.524	0.476	0.429	0.381
0.72	0.556	0.509	0.463	0.417	0.509	0.463	0.417	0.370
0.74	0.541	0.495	0.450	0.405	0.495	0.450	0.405	0.360
0.76	0.526	0.482	0.439	0.395	0.482	0.439	0.395	0.351
0.78	0.513	0.470	0.427	0.385	0.470	0.427	0.385	0.342
0.8	0.500	0.458	0.417	0.375	0.458	0.417	0.375	0.333
0.82	0.488	0.447	0.407	0.366	0.447	0.407	0.366	0.325
0.84	0.476	0.437	0.397	0.357	0.437	0.397	0.357	0.317
0.86	0.465	0.426	0.388	0.349	0.426	0.388	0.349	0.310
0.88	0.455	0.417	0.379	0.341	0.417	0.379	0.341	0.303
0.9	0.444	0.407	0.370	0.333	0.407	0.370	0.333	0.296
0.92	0.435	0.399	0.362	0.326	0.399	0.362	0.326	0.290
0.94	0.426	0.390	0.355	0.319	0.390	0.355	0.319	0.284
0.96	0.417	0.382	0.347	0.313	0.382	0.347	0.313	0.278
0.98	0.408	0.374	0.340	0.306	0.374	0.340	0.306	0.272
1	0.400	0.367	0.333	0.300	0.367	0.333	0.300	0.267

برای خاک نوع I با شتاب طیفی زلزله بیشینه $S_s = 1/2$ و $S_s = 1/15$ برای زمان تناوب ۰ تا ۱ ثانیه



T	Sa (S1=0.55)	Sa (S1=0.50)	Sa (S1=0.45)	Sa (S1=0.40)	Sa (S1=0.55)	Sa (S1=0.50)	Sa (S1=0.45)	Sa (S1=0.40)
0	0.320	0.320	0.320	0.320	0.307	0.307	0.307	0.307
0.02	0.425	0.435	0.448	0.464	0.403	0.412	0.424	0.439
0.04	0.529	0.550	0.576	0.608	0.499	0.518	0.542	0.571
0.06	0.634	0.666	0.704	0.752	0.595	0.624	0.659	0.703
0.08	0.739	0.781	0.800	0.800	0.691	0.730	0.767	0.767
0.1	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.12	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.14	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.16	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.18	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.2	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.22	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.24	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.26	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.28	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.3	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.32	0.800	0.800	0.800	0.800	0.767	0.767	0.767	0.767
0.34	0.800	0.800	0.800	0.784	0.767	0.767	0.767	0.767
0.36	0.800	0.800	0.800	0.741	0.767	0.767	0.767	0.741
0.38	0.800	0.800	0.789	0.702	0.767	0.767	0.767	0.702
0.4	0.800	0.800	0.750	0.667	0.767	0.767	0.750	0.667
0.42	0.800	0.794	0.714	0.635	0.767	0.767	0.714	0.635
0.44	0.800	0.758	0.682	0.606	0.767	0.758	0.682	0.606
0.46	0.797	0.725	0.652	0.580	0.767	0.725	0.652	0.580
0.48	0.764	0.694	0.625	0.556	0.764	0.694	0.625	0.556
0.5	0.733	0.667	0.600	0.533	0.733	0.667	0.600	0.533
0.52	0.705	0.641	0.577	0.513	0.705	0.641	0.577	0.513
0.54	0.679	0.617	0.556	0.494	0.679	0.617	0.556	0.494
0.56	0.655	0.595	0.536	0.476	0.655	0.595	0.536	0.476
0.58	0.632	0.575	0.517	0.460	0.632	0.575	0.517	0.460
0.6	0.611	0.556	0.500	0.444	0.611	0.556	0.500	0.444
0.62	0.591	0.538	0.484	0.430	0.591	0.538	0.484	0.430
0.64	0.573	0.521	0.469	0.417	0.573	0.521	0.469	0.417
0.66	0.556	0.505	0.455	0.404	0.556	0.505	0.455	0.404
0.68	0.539	0.490	0.441	0.392	0.539	0.490	0.441	0.392
0.7	0.524	0.476	0.429	0.381	0.524	0.476	0.429	0.381
0.72	0.509	0.463	0.417	0.370	0.509	0.463	0.417	0.370
0.74	0.495	0.450	0.405	0.360	0.495	0.450	0.405	0.360
0.76	0.482	0.439	0.395	0.351	0.482	0.439	0.395	0.351
0.78	0.470	0.427	0.385	0.342	0.470	0.427	0.385	0.342
0.8	0.458	0.417	0.375	0.333	0.458	0.417	0.375	0.333
0.82	0.447	0.407	0.366	0.325	0.447	0.407	0.366	0.325
0.84	0.437	0.397	0.357	0.317	0.437	0.397	0.357	0.317
0.86	0.426	0.388	0.349	0.310	0.426	0.388	0.349	0.310
0.88	0.417	0.379	0.341	0.303	0.417	0.379	0.341	0.303
0.9	0.407	0.370	0.333	0.296	0.407	0.370	0.333	0.296
0.92	0.399	0.362	0.326	0.290	0.399	0.362	0.326	0.290
0.94	0.390	0.355	0.319	0.284	0.390	0.355	0.319	0.284
0.96	0.382	0.347	0.313	0.278	0.382	0.347	0.313	0.278
0.98	0.374	0.340	0.306	0.272	0.374	0.340	0.306	0.272
1	0.367	0.333	0.300	0.267	0.367	0.333	0.300	0.267