کمیتـه ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

در همکاری با دبیرخانه دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)

نشریه شماره ۹۰۰:

مجموعه دستنامه‌های کمیتـه ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی
جلد دوم (۲-۹۰۰):

طراحی اعضای سازه‌ای که جزیی از سیستم مقاوم در برابر زلزله محسوب نمی‌شوند



کارگروه بتن

آبان ۱۴۰۵

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
bhrc.ac.ir

نظام فنی و اجرایی کشور
nezamfanni.ir

iesc.bhrc.ac.ir

جمهوری اسلامی ایران

سازمان برنامه و بودجه کشور

مجموعه دستنامه‌های
کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

جلد دوم:
طراحی اعضای سازه‌ای که جزیی از سیستم مقاوم در برابر زلزله محسوب نمی‌شوند
نشریه شماره ۲-۹۰۰

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

nezamfanni.ir

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

معاونت تحقیقات

bhrc.ac.ir

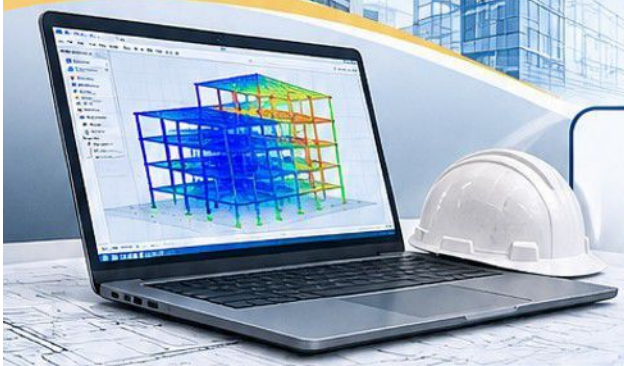
کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

iesc.bhrc.ac.ir

۱۴۰۵

کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی

ساماندهی به کارگیری نرم‌افزارهای مهندسی در چارچوب ضوابط فنی



مأموریت محوری

هم‌راستاسازی فرآیند طراحی نرم‌افزاری
با آیین‌نامه‌ها و مقررات ملی

محورهای فعالیت

- تبیین ضوابط آیین‌نامه‌ای در فرآیند طراحی
- پاسخ به پرسش‌ها و ابهامات نرم‌افزارها
- انتقال دانش خبرگان از طریق تهیه راهنماهای کاربردی
- رصد و شناخت ظرفیت نرم‌افزارهای مهندسی

مسیر پاسخ‌گویی تخصصی

پرسش مهندس ← بررسی در کارگروه تخصصی ← پاسخ و راهنمای فنی

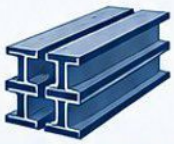
نمونه فعالیت‌ها



شناسایی نرم‌افزارهای ایرانی



کارگروه بتن و سازه‌های بتنی



کارگروه فولاد و سازه‌های فولادی



کارگروه اندرکنش سازه، خاک و پی

درگاه اطلاع‌رسانی: iesc.bhrc.ac.ir

پیشگفتار

با عنایت به الزام جامعه مهندسی به رعایت ضوابط مندرج در مقررات، آیین‌نامه‌ها، استانداردها و اسناد مرجع و ضرورت پیاده‌سازی این ضوابط در نرم‌افزارهای مهندسی؛ مناسب است با در نظر گرفتن نیازهای ایشان، ظرفیت نرم‌افزارهای موجود و قیدهای منظور شده در ضوابط مورد اشاره، ارائه راهکارهای مهندسی با هدف «ترویج استفاده صحیح از نرم‌افزار و استناد دقیق به سند مرجع» و همچنین، ارائه راهنماهای کاربردی با هدف «ایجاد وحدت رویه و کاهش سردرگمی مهندسین در پیاده‌سازی ضوابط» مورد توجه قرار گیرد. در همین راستا؛ «طرح ساماندهی نرم‌افزارهای مهندسی» در قالب تفاهم‌نامه همکاری مشترک فی ما بین امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی از سال ۱۳۹۹ و با بهره‌گیری از توان تخصصی و دانش فنی اساتید، صاحب‌نظران و متخصصان امر تعریف و تا کنون، در سه فاز متوالی عملیاتی شده است. این طرح که با تشکیل «کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی» فعالیت خود را آغاز نموده، در گام نخست به موضوعات مرتبط با مهندسی عمران پرداخته و پیرو انتشار ویرایش‌های جدید مباحث هفتم، نهم و دهم مقررات ملی ساختمان، آیین‌نامه بتن ایران (آبا)-ضابطه شماره ۱۲۰ نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور و ویرایش پنجم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) بر ارائه راه حل‌های کاربردی در خصوص پیاده‌سازی صحیح ضوابط و الزامات این اسناد در نرم‌افزارهای متعارف مهندسی عمران تمرکز نموده‌است.

نتیجه فعالیت‌های این کمیته طی سالیان گذشته در سامانه اطلاع‌رسانی کمیته ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی به نشانی iesc.bhrc.ac.ir در دسترس مهندسین قرار گرفته و به طور کلی، پاسخ به پرسش‌ها، ارائه راهنماهای تفصیلی و انتشار نشریه‌های تخصصی را در بر می‌گیرد. پیرو انتشار ویرایش پنجم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و با هدف یکپارچه سازی موضوعات مرتبط با بارگذاری، تحلیل و طراحی، تدوین دستنامه‌های تخصصی کاربردی در پاسخ به نیاز جامعه مهندسی به عنوان اصلی ترین فعالیت فاز سوم طرح ساماندهی نرم‌افزارهای مهندسی مورد توجه قرار گرفت.

عطف به توضیحات فوق و پیرو اقدامات صورت گرفته در موضوع، دستنامه تخصصی «**طراحی اعضای سازه‌ای که جزیی از سیستم مقاوم در برابر زلزله محسوب نمی‌شوند**» جهت بهره‌برداری مهندسین منتشر می‌شود. در این دستنامه ضوابط بند ۹-۲۰-۱۰-۱ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان مدنظر قرار گرفته است. با عنایت به این بند، در سازه‌هایی با شکل‌پذیری زیاد یا متوسط می‌توان در صورت لزوم و با درنظر گرفتن ملاحظاتی در تحلیل و طراحی، برخی از اعضای سازه‌ای (تیرها، ستون‌ها، دال‌ها و دیوار پایه‌ها) را به عنوان جزیی از سیستم باربر جانبی منظور ننمود و این دستنامه، روش اعمال این بند را تشریح می‌نماید.

این دستنامه با شماره نشریه (۲-۹۰۰) امور نظام فنی و اجرایی، در ردیف راهنماهای کاربردی به شمار می‌رود و با هدف تصریح و تبیین رویه‌های صحیح پیاده‌سازی ضوابط مدلسازی، بارگذاری، تحلیل و طراحی تدوین شده است. امید است با بهره‌گیری مهندسین از این سند، گام مؤثری در راستای آموزش و ترویج پیاده‌سازی صحیح ضوابط طراحی سازه برداشته شود. ضمن آنکه، این مرکز آمادگی خود برای دریافت سوالات تخصصی در موضوع و نظرات تکمیلی در راستای تدقیق یا توسعه این سند – از طریق نشانی الکترونیکی سامانه ایرانی نرم‌افزارهای مهندسی به نشانی iesc@bhrc.ac.ir – را اعلام می‌دارد. همچنین، از کلیه علاقمندان دعوت می‌گردد جهت اطلاع از انتشار اسناد و راهنماهای کاربردی به تارنمای مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به نشانی bhrc.ac.ir و تارنمای امور نظام فنی و اجرایی کشور به نشانی Nezamfanni.ir مراجعه نمایند.

فهرست مطالب

پیشگفتار ..... أ

۱- مقدمه ۱

۲- طراحی اعضای باربر لرزه‌ای ۱

۳- طراحی اعضایی که جزیی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه نیستند ۲

۳-۱- نواحی اتصال دال به ستون ۳

۳-۲- دیوارپایه‌ها ۵

۳-۳- تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون درجا ریخته ۵

۴- مراجع ۹

مجریان طرح:

دکتر عاطفه جهان محمدی

مهندس سیدمحمد میرهاشمی

اعضای کمیته تدوین (به ترتیب حروف الفبا):

مهندس صمد آقازاده

دکتر سعید تاریوردیلو

دکتر محمدرضا جوانمردی

مهندس صمد دهقانی

دکتر رضا سلطان آبادی

دکتر امیرحسین شجاع

دکتر مهدی علیرضایی

دکتر کامیار کرباسی آرانی

اعضای کمیته داوری (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر عاطفه جهان محمدی

دکتر مسعود داریوشی

دکتر مسعود سلطانی محمدی

دکتر امیرمسعود صالحی

مهندس رضا غفاری

زیر نظر کمیته راهبردی (به ترتیب حروف الفبا):

مهندس صمد آقازاده

دکتر اباذر اصغری

مهندس علیرضا توتونچی

دکتر عاطفه جهان محمدی

مهندس سجاد حیدری حسنکلو

دکتر عبدالرضا سروقد مقدم

دکتر مسعود سلطانی محمدی

دکتر امیرمسعود صالحی

مهندس رضا غفاری

دکتر محمدحسین غفاری

دکتر کامیار کرباسی آرانی

دکتر بهروز محمدکاری

مهندس سیدمحمد میرهاشمی

طراحی اعضای سازه‌ای که جزیی از سیستم مقاوم در برابر زلزله محسوب نمی‌شوند

۱- مقدمه

بر اساس ضابطه‌ی بند ۹-۲۰-۱۰-۱ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان [۱]، "در سازه‌هایی با شکل‌پذیری زیاد یا متوسط می‌توان در صورت لزوم برخی از اعضای سازه‌ای (تیرها، ستون‌ها، دال‌ها و دیوار پایه‌ها) را به عنوان جزیی از سیستم باربر جانبی منظور ننمود. در چنین حالتی باید از سختی و مقاومت این اعضا در برابر بارهای جانبی صرف‌نظر شود، ولی این اعضا و اتصالات آن‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند به صورت مناسب بارهای قائم وارده بر آن‌ها را که شامل اثرات هم‌زمان مؤلفه قائم زلزله نیز می‌شوند، تحت اثر تغییرمکان‌های جانبی ایجاد شده در بحرانی‌ترین اثر زلزله تحمل نمایند. در این اعضا باید اثرات ثانویه‌ی P-Δ نیز منظور گردند." در این دستنامه روش اعمال این ضابطه تشریح می‌شود.

۲- طراحی اعضای باربر لرزه‌ای

صرف‌نظر کردن از سختی و مقاومت اعضای غیرباربر لرزه‌ای تنها در مواردی مجاز است که در نظر گرفتن این اعضا باعث کاهش تقاضا در سایر بخش‌های سازه شود، اما نادیده گرفتن اثرات نامطلوب ناشی از حضور این اعضا مجاز نیست. برای نمونه، در بررسی ضابطه‌ی ستون قوی-تیر ضعیف یا نیروی برشی اتصال تیر به ستون، نمی‌توان از تأثیر ظرفیت خمشی تیرهای غیرباربر لرزه‌ای متصل به ستون‌های سیستم باربر لرزه‌ای صرف‌نظر کرد.

در سازه‌هایی که از اعضای غیرباربر لرزه‌ای استفاده می‌شود، لازم است کفایت اعضای سیستم باربر لرزه‌ای اصلی سازه در دو مدل زیر بررسی شود:

مدل اصلی- در این مدل، برای طراحی اعضای سیستم باربر لرزه‌ای سازه، از سختی جانبی و مقاومت اعضای غیرباربر لرزه‌ای صرف‌نظر می‌شود. برای این منظور می‌توان در دو انتهای تیرها و ستون‌های غیرباربر لرزه‌ای لنگرهای خمشی را آزاد کرد، ضریب اصلاح سختی خمشی دال‌ها را عدد کوچکی مانند 0.01 در نظر گرفت و علاوه بر حذف سختی برشی دیوارپایه‌های غیرباربر لرزه‌ای، ضریب اصلاح سختی خمشی آن‌ها را نیز به عدد کوچکی مانند 0.01 کاهش داد. لازم است در این مدل کلیه‌ی اعضای سیستم باربر لرزه‌ای سازه پاسخگوی بارهای وارده باشند.

مدل دوم- در این مدل، برای بررسی اثر اعضای غیرباربر لرزه‌ای بر افزایش تقاضای اعضای باربر لرزه‌ای، طراحی سیستم باربر لرزه‌ای با در نظر گرفتن سختی و مقاومت اعضای غیرباربر لرزه‌ای انجام می‌شود.

نکته‌ی ۱: در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، آیین‌نامه بتن ایران (آبا) [۲] و نیز ACI 318-25 [۳] محدودیتی برای میزان تأثیر سختی اعضای غیرباربر لرزه‌ای بر تقاضای لرزه‌ای ایجادشده در اعضای باربر لرزه‌ای ارائه نشده است؛ اما در برخی مراجع معتبر، محدودیت‌هایی در این خصوص ارائه شده است. بر اساس ضوابط ASCE/SEI 41-23 [۴]، در نظر گرفتن سختی

جانبی اجزای ثانویه نباید موجب افزایش بیش از ۱۰ درصدی تقاضای نیرو یا تغییرشکل در یک جزء اولیه شود[1]. بر همین اساس، این کارگروه توصیه می‌کند که چنانچه تقاضای نیرو یا تغییرشکل یک عضو باربر لرزه‌ای در مدل دوم (مدلی که در آن از سختی اعضای غیرباربر لرزه‌ای صرف‌نظر نشده است) از ۱۱۰ درصد مقدار متناظر آن در مدل اصلی (مدلی که در آن از سختی اعضای غیرباربر لرزه‌ای صرف‌نظر شده است) بیشتر باشد، در انتخاب اعضای غیرباربر لرزه‌ای تجدید نظر شود؛ به‌گونه‌ای که نسبت ذکر شده به کمتر از ۱۱۰ درصد کاهش یابد.

نکته‌ی ۲: بررسی جابجایی نسبی طبقات سازه (drift) در مدل اصلی انجام می‌شود.

نکته‌ی ۳: در هنگام بررسی نامنظمی سازه، نمی‌توان از آثار منفی اعضای غیرباربر لرزه‌ای صرف‌نظر کرد، ولی از اثرات مثبت آن‌ها باید صرف‌نظر کرد. بنابراین، بررسی نامنظمی‌های سازه در هر دو مدل انجام می‌شود و اگر سازه در هر یک از مدل‌ها نامنظم بود، باید در طراحی، نامنظم در نظر گرفته شود.

نکته‌ی ۴: در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۵]، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران، در مورد حداکثر میزان مشارکت اعضای غیرباربر لرزه‌ای در پاسخ کلی سازه ضابطه‌ای تجویز نشده است؛ اما ضوابط یوروکد ۸ [۶]، حداکثر مشارکت اعضای غیرباربر لرزه‌ای در سختی جانبی را به ۱۵ درصد سختی حاصل از کل اعضای باربر لرزه‌ای محدود می‌کند. همچنین ASCE/SEI 41-23 نسبت سختی اعضای ثانویه را به ۲۰ درصد سختی اعضای اولیه محدود نموده است. بر همین اساس این کارگروه توصیه می‌کند که در طراحی سازه‌هایی که در آن‌ها اعضای غیرباربر لرزه‌ای حضور دارند، تناسبات ابعادی اعضا به نحوی انتخاب گردد که سختی جانبی حاصل از مشارکت اعضای غیرباربر لرزه‌ای بیش از ۲۰ درصد سختی حاصل از کل اعضای باربر لرزه‌ای نباشد. برای کنترل این ضابطه می‌توان جابجایی نسبی طبقات را یک بار در مدل اصلی و یک بار در مدل دوم محاسبه کرد. نسبت جابجایی نسبی طبقات حاصل از مدل اصلی به مدل دوم نباید بیش از ۱۲۰ درصد باشد. توصیه می‌شود در صورت تأمین نشدن این نسبت، در انتخاب اعضای غیرباربر لرزه‌ای تجدید نظر انجام شود و برخی اعضای غیرباربر لرزه‌ای به اعضای باربر لرزه‌ای تغییر کنند تا نسبت ذکر شده به زیر ۱۲۰ درصد کاهش یابد.

۳- طراحی اعضایی که جزیی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه نیستند

در طراحی سازه برای حمل بارهای لرزه‌ای، از سختی و مقاومت اعضایی که جزیی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه نیستند، صرف‌نظر می‌شود. با این حال، فرض عدم مشارکت این اعضا در باربری لرزه‌ای، به این معنی نیست که در آن‌ها نیازهای لرزه‌ای ایجاد نمی‌شود؛ بلکه در هنگام وقوع زلزله، ممکن است تلاش‌های قابل توجهی در این اعضا شکل گیرد که در نظر نگرفتن آن‌ها در خلاف جهت اطمینان است و از دلایل فروریزش برخی سازه‌ها در زلزله‌های گذشته به شمار می‌رود.

بر اساس ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و نیز آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، لازم است اعضایی که جزیی از سیستم باربر لرزه‌ای سازه نیستند و همچنین اتصالات آن‌ها، به گونه‌ای طراحی شوند که توانایی تحمل اثرات هم‌زمان بارهای قائم وارده (شامل اثرات مؤلفه قائم زلزله) و اعمال تغییرمکان طرح را داشته باشند. تغییرمکان طرح (δ_u) بر اساس ضوابط آیین‌نامه طراحی

[1] در ASCE/SEI 41-23، اجزایی که بر سختی جانبی سازه یا نحوه توزیع نیروها در آن تأثیر می‌گذارند و برای مقاومت در برابر نیروهای لرزه‌ای و تحمل تغییرشکل‌ها، به‌منظور دستیابی سازه به سطح عملکرد انتخاب‌شده، ضروری هستند، به‌عنوان اجزای اولیه طبقه‌بندی می‌شوند. اجزای اولیه باید برای نیروها و تغییرشکل‌های ناشی از زلزله، در ترکیب با اثرات بارهای ثقلی، ارزیابی شوند. اجزای سازه‌ای که تغییرشکل‌های ناشی از زلزله را تحمل می‌کنند، اما مقاومت آن‌ها در برابر نیروهای لرزه‌ای برای دستیابی سازه به سطح عملکرد انتخاب‌شده ضروری نیست، به‌عنوان اجزای ثانویه طبقه‌بندی می‌شوند.

ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) تعیین می‌شود و مقدار آن برابر با $C_d.\delta_{ue}$ است که در آن δ_{ue} تغییرمکان الاستیک به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری تحت اثر نیروهای لرزه‌ای طراحی و C_d ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان است.

مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا) ، ضوابط طراحی اعضای غیرباربر لرزه‌ای را به تفکیک نوع عضو در سه دسته به شرح زیر ارائه کرده‌اند:

الف- نواحی اتصال دال به ستون

ب- دیوارپایه‌ها

ج- تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون درجا ریخته

۳-۱- نواحی اتصال دال به ستون

در اتصالات دال-ستون غیرباربر لرزه‌ای، نگرانی‌های اصلی هنگام وقوع زلزله، شکست ناشی از برش پانچ و همچنین خرابی پیش‌رونده به علت وقوع این شکست در اتصالات متعدد هستند. برای رفع این نگرانی‌ها، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، ضوابطی را برای افزایش ظرفیت برش پانچ از طریق تعبیه‌ی آرماتورهای عرضی و همچنین ضوابطی را برای تقویت و حفظ یکپارچگی از طریق تعبیه‌ی آرماتورهای طولی انسجام (یا یکپارچگی)، در ناحیه‌ی اتصال دال-ستون ارائه کرده‌اند.

۳-۱-۱- آرماتورهای عرضی:

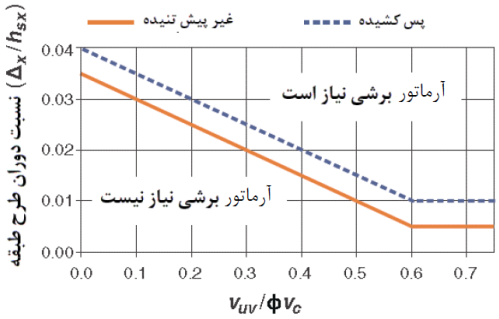
در اتصالات دال-ستون غیرباربر لرزه‌ای، محاسبه‌ی مستقیم نیروهای ناشی از مؤلفه‌های افقی زلزله الزامی نیست و به جای آن، می‌توان لزوم تعبیه‌ی آرماتورهای عرضی را با بررسی تنش برشی و تغییرمکان نسبی درون‌طبقه‌ای، ارزیابی کرد. در این اتصالات، تغییرمکان نسبی درون‌طبقه‌ای با دو معیار زیر بررسی می‌شود. در صورتی‌که هر یک از روابط زیر برقرار نباشد، نیازی به تعبیه‌ی آرماتورهای برشی نیست؛ اما اگر هر دو رابطه هم‌زمان برقرار باشند لازم است آرماتورهای برشی تعبیه شوند.

$$\frac{\Delta_x}{h_{sx}} \geq 0.035 - \frac{0.05 v_{uv}}{\phi v_c}$$

$$\frac{\Delta_x}{h_{sx}} > 0.005$$

که در آن Δ_x تغییرمکان نسبی طرح در طبقه x، h_{sx} ارتفاع طبقه‌ی x، v_{uv} تنش برشی ضریب‌دار در مقطع بحرانی دال ناشی از بارهای ثقلی و اثرات مؤلفه‌ی قائم زلزله (بدون انتقال لنگر)، v_c تنش متناظر با مقاومت برشی اسمی دوطرفه‌ی تأمین شده توسط بتن و ϕ ضریب کاهش مقاومت هستند. مقدار Δ_x/h_{sx} باید برابر با بزرگترین مقدار در طبقات فوقانی و تحتانی تراز مورد نظر، در نظر گرفته شود.

برای درک بهتر ضابطه‌ی فوق می‌توان به شکل ۱ مراجعه کرد. چنانچه در یک اتصال دال-ستون، نقطه‌ی نظیر تنش برشی و تغییرمکان نسبی درون‌طبقه‌ای، زیر خط نارنجی رنگ قرار بگیرد، نیازی به تعبیه‌ی آرماتور برشی نیست ولی اگر نقطه بالای خط نارنجی رنگ قرار بگیرد، آرماتور برشی مورد نیاز است.



شکل ۱- نمایش ضابطه‌ی لزوم تعبیه‌ی آرماتور عرضی در اتصال دال-ستون غیربابر لرزه‌ای [۲]

در حالتی که تعبیه‌ی آرماتورهای برشی ضروری باشد، نیازی به محاسبه‌ی مقدار آرماتور برشی بر اساس نیروهای توسعه‌یافته در دال نیست و مقدار مورد نیاز آن از رابطه‌ی تجویزی زیر به دست می‌آید:

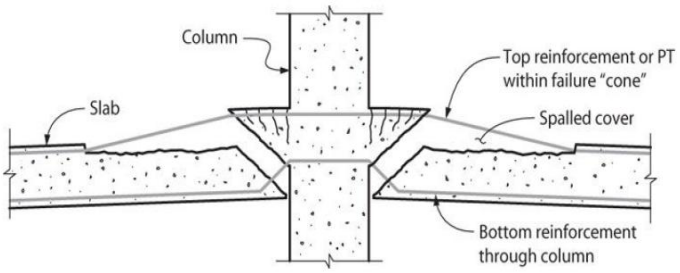
$$v_s \geq 0.29\sqrt{f_c'}$$

علاوه بر این، آرماتورهای برشی باید حداقل تا فاصله‌ای معادل چهار برابر ضخامت دال از وجه تکیه‌گاهِ مجاور مقطع بحرانی برش دوطرفه ادامه یابند.

ذکر این نکته ضروری است که در محاسبه v_{uv} صرفاً تنش‌های برشی ناشی از بارهای ثقلی و اثرات مؤلفه‌ی قائم زلزله، بدون انتقال لنگر خمشی منظور می‌شوند. همچنین تنها ترکیب‌بارهای شامل E (مانند $1.2D + L + E_v$) بررسی می‌شوند. به عنوان مثال نیازی به بررسی تنش‌ها تحت اثر ترکیب‌بار $1.2D + 1.6L$ نیست و طراحی برای این ترکیب‌بار (شامل طراحی برای پانچ) بر اساس ضوابط غیرلرزه‌ای انجام می‌شود. بدیهی است چنانچه تحت اثر ترکیب‌بارهای ثقلی مقدار آرماتور برشی بیشتر از مقدار حاصل از رابطه‌ی فوق مورد نیاز باشد، آن مقدار بر طرح حاکم خواهد بود.

۳-۱-۲- آرماتورهای انسجام یا یکپارچگی:

در سیستم دال-ستون چنانچه ظرفیت پس از پانچ کافی تأمین نشود، شکست یک اتصال ممکن است به خرابی پیش‌رونده و فروریزش کل سازه منجر شود، لذا تأمین مقاومت پسماند (ظرفیت پس از پانچ) بسیار مهم است. هرچند آرماتورهای برشی دال می‌توانند از طریق ایجاد مقاومت محدود پس از پانچ در جلوگیری از خرابی پیش‌رونده مؤثر باشند، اما همانطور که در شکل ۲ نمایش داده شده است، استفاده از آرماتورهای لایه‌ی پایین دال که از هسته‌ی ستون عبور کنند (و در نتیجه مخروط شکست را قطع نمایند)، برای این منظور مؤثرتر است.



شکل ۲- اتصال دال-ستون پانچ‌شده [۷]

لازم به ذکر است که با توجه به پوشش بتنی اندک موجود بر روی آرماتورهای فوقانی دال، این آرماتورها تأثیر چندانی در تأمین ظرفیت پس از پانچ نخواهند داشت و باید از طریق تعبیه‌ی آرماتورهای لایه‌ی پایین، ظرفیت پسماند کافی را تأمین نمود. برای این منظور توصیه می‌شود مطابق روابط ACI 352.1R-11 [۷]، در هر راستا حداقل به مقدار زیر آرماتورهای تحتانیِ پیوسته، از هسته‌ی ستون عبور داده شود:

$$A_{sm} = \frac{0.5 w_u l_1 l_2}{\phi f_y}$$

که در آن w_u بار گسترده‌ی ضریب‌دار در کل دهانه با اعمال ضرایب افزایش بار (ولی نه کمتر از دو برابر وزن مرده دال)، مقدار ϕ برابر با 0.9 و l_1 و l_2 طول دهانه‌ها در دو راستا هستند. مقدار A_{sm} برای ستون‌های لبه و ستون‌های گوشه به ترتیب به 2/3 و 1/2 مقدار فوق کاهش می‌یابد؛ دقت شود که در این حالت نیز l_1 و l_2 نشان دهنده‌ی طول کل دهانه‌های مجاور بوده و نباید به عرض بارگیر این ستون‌ها محدود شوند.

تذکر: هرچند طراحی دال‌های غیربابر لرزه‌ای برای تلاش‌های خارج از صفحه‌ی ناشی از نیروهای افقی زلزله الزامی نیست، اما لازم است این دال‌ها علاوه بر بارهای ثقلی و مؤلفه‌ی قائم نیروی زلزله، برای اثرات درون‌صفحه‌ای ناشی از نیروهای زلزله (مبحث طراحی دیافراگم) نیز طراحی شوند.

۳-۲- دیوارپایه‌ها

دیوارپایه‌ها حالت خاصی از قطعات قائم دیوار هستند که نسبت ارتفاع به طول (h_w/l_w) در آن‌ها بزرگ‌تر از ۲ یا مساوی آن و نسبت طول به ضخامت (l_w/b_w) در آن‌ها کم‌تر از ۶ یا مساوی آن است. این اعضا بر حسب نسبت طول به ضخامت به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف- دیوارپایه‌های با نسبت طول به ضخامت (l_w/b_w) کمتر یا مساوی ۲/۵: ضوابط حاکم بر این دیوارپایه‌ها عیناً مشابه ستون‌های قاب خمشی ویژه است. در واقع این اعضا، ضوابط ابعادی ستون‌های قاب‌های خمشی ویژه را برآورده می‌کنند. در این حالت، سطوح فوقانی و تحتانیِ ارتفاع آزاد دیوارپایه به عنوان برِ گره‌ها، منظور می‌شوند.

ب- دیوارپایه‌های با نسبت طول به ضخامت (l_w/b_w) بین ۲/۵ و ۶: این دیوارپایه‌ها ضوابط ابعادی ستون‌های قاب‌های خمشی ویژه را برآورده نمی‌کنند، اما رفتار آن‌ها مشابه این ستون‌ها است. به این معنی که مکانیزم مورد انتظار در این اعضا نیز تشکیل مفصل پلاستیک در دو انتها است و نیاز برشی آن‌ها نیز بر اساس همین مکانیزم تعیین می‌شود. این دیوارپایه‌ها را می‌توان مانند بند "الف" با ضوابط ستون‌های قاب خمشی ویژه طراحی کرد؛ همچنین می‌توان به جای ضوابط ستون‌ها، به ضوابط اختصاصی دیوارپایه‌ها موضوع بند ۹-۲۰-۷-۶ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان رجوع نمود.

در مواردی که طبق ضوابط آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، منظور کردن اثرات اضافه مقاومت در طراحی سیستم باربر لرزه‌ای الزامی است، می‌توان نیروی برشی طراحی را Ω_0 برابر برش ایجاد شده در دیوارپایه در اثر تغییرمکان طرح (δ_u) منظور نمود.

۳-۳- تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون درجا ریخته

تفسیر ASCE/SEI 7-22 [۸] بیان می‌کند که برای طراحی اعضای غیرباربر لرزه‌ای یا سازه‌های دارای چنین اعضایی، طراح ۳ روش کلی پیشِ رو دارد که باید بر اساس یکی از آن‌ها، جزییات شکل‌پذیری، طراحی مقاومتی یا تناسبات ابعادی اعضا را تعیین نماید. این ۳ روش عبارتند از:

الف- استفاده از جزییات مربوط به شکل‌پذیری در اعضای غیربابر لرزه‌ای، مشابه آنچه که در اعضای سیستم مقاوم در برابر بار جانبی زلزله استفاده می‌شود.

ب- تأمین مقاومت کافی در اعضای غیربابر لرزه‌ای.

ج- تأمین سختی کافی در کل سازه، به منظور جلوگیری از ایجاد تقاضای شکل‌پذیری در اعضای غیربابر لرزه‌ای.

با در نظر گرفتن همین مفهوم، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا) دو روش را برای طراحی تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستونِ درجا در اعضای غیربابر لرزه‌ای پذیرفته‌اند که روش ۱ آن، معادل با روش "الف" فوق و روش ۲ آن، معادل با روش "ب" است که روش "ج" را نیز به صورت ضمنی پوشش می‌دهد. این روش‌ها به شرح زیر هستند:

روش ۱: عدم طراحی مقاومتی اعضای غیربابر لرزه‌ای برای تلاش‌های حاصل از بارهای لرزه‌ای و طراحی جزییات اعضا برای حصول رفتار شکل‌پذیر

این روش مربوط به اعضایی است که توان تحمل نیروهای وارده در هنگام زلزله را ندارند یا بدون هرگونه بررسی فرض می‌شود که چنین است. در این حالت، طراحی و تعیین جزییات آرماتورهای عرضی باید به گونه‌ای باشد که با تأمین ظرفیت برشی متناظر با تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در دو انتهای تیرها و ستون‌ها و همچنین تأمین محصورشدگی لازم برای بارهای قائم از وقوع هرگونه شکست ترد در این اعضا جلوگیری شود. به بیان دیگر، ضوابط این روش به منظور فراهم آوردن شرایط تسلیم شکل‌پذیر خمشی در ستون‌ها و تیرها تحت اثر تغییرمکان طرح و ایجاد محصورشدگی و مقاومت برشی کافی در اعضای تسلیم‌شونده، تدوین شده است. ضوابط تجویزی آرماتورگذاری طولی و عرضی در تیرها، ستون‌ها و اتصالات آن‌ها در این روش، در بند ۹-۲۰-۱۰-۳-۳ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ارائه شده است.

در صورت انتخاب این روش، اعضای غیربابر لرزه‌ای باید برای حمل بارهای غیرلرزه‌ای (ثقلی، حرارتی، باد و ...) در مدل دوم (مدلی که در آن از سختی اعضای غیربابر لرزه‌ای صرف‌نظر نشده است) طراحی شوند. به علاوه، این اعضا باید برای تحمل بارهای قائم (شامل بارهای ثقلی و اثرات هم‌زمان مؤلفه قائم زلزله) در تغییرمکان طرح نیز طراحی شوند. این نیروها در ستون‌ها و اتصالات به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

الف- ستون‌ها: ستون‌های غیربابر لرزه‌ای، باید برای ترکیب‌بار $1.2D + 1.0L + E_v$ (در برخی موارد مطابق ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۹] کاهش ضریب بار زنده مجاز است) یا $0.9D - E_v$ به علاوه لنگر اضافی $Pc_d\delta_{ue}$ ناشی از تغییرمکان طرح، طراحی شوند که در آن P بار محوری حاصل از ترکیب‌بار مذکور است.

ب- اتصالات تیر به ستون: تقاضای برشی اتصال تیر به ستون، باید بر اساس ظرفیت خمشی محتمل (M_{pr}) تیرهای متصل به آن محاسبه شود.

روش ۲: طراحی مقاومتی اعضای غیربابر لرزه‌ای، برای تلاش‌های حاصل از تحلیل سازه

استفاده از روش ۲ و طراحی مقاومتی اعضای غیربابر لرزه‌ای، تنها در شرایطی لازم است که طراح سازه تمایل به استفاده از جزئیات شکل‌پذیری ویژه در این اعضا نداشته باشد. به بیان دیگر، در صورت استفاده از روش ۱ شرح داده شده در بخش فوق (طراحی جزییات اعضا برای حصول رفتار شکل‌پذیر)، نیازی به طراحی مقاومتی اعضا مطابق با این بخش نخواهد بود.

در روش طراحی مقاومتی، فرض اساسی این است که اعضای غیربابر لرزه‌ای در طول زلزله، الاستیک باقی می‌مانند. در این روش تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون برای تحمل تلاش‌های ایجاد شده در آن‌ها تحت اثر هم‌زمان بارهای قائم و تغییرمکان

جانبی طرح ($\delta_u = C_d\delta_{ue}$)، طراحی مقاومتی می‌شوند؛ همچنین در اتصالات تیر به ستون تأمین ضوابط غیرلرزه‌ای کفایت می‌کند. برای به دست آوردن نیازهای لرزه‌ای تحت اثر این جابجایی‌ها، ۳ روش زیر پیشنهاد می‌شود:

روش ۲-الف- روش غیرخطی:

در این روش در مدل دوم (مدلی که در آن از سختی اعضای غیرباربر لرزه‌ای صرف‌نظر نشده است)، امکان غیرخطی شدن صرفاً برای اعضای باربر لرزه‌ای فراهم می‌شود (به عنوان مثال، از طریق تعریف مفصل پلاستیک خمشی در نزدیکی دو انتهای اعضای قاب‌های خمشی). سپس سازه با یک الگوی بارِ مشابه با توزیع نیروی جانبی زلزله (استاتیکی یا طیفی) تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) تا رسیدن به تغییرمکان طرح ($\delta_u = C_d\delta_{ue}$) قرار می‌گیرد. در نهایت، اعضای غیرباربر لرزه‌ای (که همگی به صورت الاستیک مدل‌سازی شده‌اند)، برای تلاش‌های ایجاد شده در این تغییرمکان طرح طراحی می‌شوند.

چنانچه طراح تمایلی به استفاده از روش‌های غیرخطی ندارد، می‌تواند به صورت محافظه‌کارانه از یکی از روش‌های ۲-ب یا ۲-ج که در ادامه معرفی شده‌اند، استفاده نماید.

روش ۲-ب- روش خطی با صرف نظر کردن از غیرخطی شدن اعضای باربر لرزه‌ای:

در این روش، در مدل دوم (مدلی که در آن از سختی اعضای غیرباربر لرزه‌ای صرف‌نظر نشده است)، ضریب زلزله در ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان (C_d)، ضرب شده و اعضای غیرباربر لرزه‌ای در این مدل طراحی می‌شوند. استفاده از این روش ممکن است تنها در موارد مشخص مانند طراحی ستون‌های غیرباربر لرزه‌ای در سیستم دال-ستون توجیه اقتصادی داشته باشد.

روش ۲-ج- روش شبه‌خطی با فرض تسلیم تمام اعضای باربر لرزه‌ای:

در این روش در مدل نرم‌افزاری سختی اعضای باربر لرزه‌ای حذف می‌شود، اما سختی مؤثر اعضای غیرباربر لرزه‌ای (شامل دال‌ها) در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور علاوه بر حذف سختی برشی دیوارها و دیوارپایه‌ها در راستای طولی، ضریب اصلاح سختی خمشی آن‌ها به عدد کوچکی مانند 0.01 کاهش داده می‌شود. همچنین لنگرهای خمشیِ دو انتهای تیرها و ستون‌های باربر لرزه‌ای آزاد می‌شود (چنانچه آزادسازی لنگر خمشی در دو انتهای تیرها و ستون‌ها سبب شود که تحلیل هم‌گرا نشود، می‌توان به جای آزادسازی لنگر، سختی خمشی و برشی این اعضا را به 0.01 کاهش داد). سپس سازه تحت یک الگوی بارِ مشابه با توزیع نیروی جانبی زلزله (استاتیکی یا طیفی) تا رسیدن به تغییرمکان طرح ($\delta_u = C_d\delta_{ue}$) تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) می‌شود. اعضای غیرباربر لرزه‌ای، برای تلاش‌های ایجاد شده در این تغییرمکان، طراحی می‌شوند. در این حالت، لازم است اثرات $P-\Delta$ نیز در تحلیل استاتیکی غیرخطی لحاظ شود. توجه شود که در این روش مفصل پلاستیک به هیچ عضوی اختصاص داده نمی‌شود و صرفاً نوع تحلیل غیرخطی است.

پس از طراحی مقاومتی اعضای غیرباربر لرزه‌ای برای تلاش‌های محاسبه شده در هر یک از روش‌های فوق، برای اعمال ضوابط تجویزی آرماتورگذاری طولی و عرضی در تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون، باید به ضوابط بخش ۹-۲۰-۱۰-۳-۲ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان رجوع کرد که در آن به ویژه برای آرماتورهای عرضی، ضوابط سهل‌تری نسبت به اعضای باربر لرزه‌ای در نظر گرفته شده است.

نکات تکمیلی

نکته‌ی تکمیلی ۱:

بر اساس ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، برای تعیین تلاش‌های داخلی اعضای غیربابر لرزه‌ای لازم است سازه به میزان $\delta_u = C_d\delta_{ue}$ به‌صورت جانبی جابجا شود که در آن δ_{ue} تغییرمکان الاستیک جانبی سازه، تحت اثر زلزله‌ی طرح است.

در روش ۲ پیشنهاد شده، برخی صاحب‌نظران معتقدند که لازم است δ_{ue} در مدل اصلی (مدلی که در آن از سختی اعضای غیربابر لرزه‌ای صرف‌نظر شده است) محاسبه شود؛ اما برخی دیگر معتقدند با توجه به تقریباً الاستیک ماندن اعضای غیربابر لرزه‌ای در روش ۲، می‌توان δ_{ue} را از مدل دوم (مدلی که در آن از سختی اعضای غیربابر لرزه‌ای صرف‌نظر نشده است)، قرائت نمود.

در صورت پذیرش نظر اول، یک ضریب افزایشی اضافی مورد نیاز خواهد بود؛ چرا که در مدل دوم، در نظر گرفتن سختی اعضای غیربابر لرزه‌ای باعث کاهش تغییرمکان جانبی طبقات نسبت به مدل اصلی خواهد شد و در نتیجه هنگامی‌که در مدل دوم، نیروی زلزله در ضریب بزرگ‌نمایی تغییرمکان (C_d) ضرب شود، مقدار تغییرمکان جانبی منتج شده، کمتر از δ_u محاسبه شده از مدل اصلی خواهد شد. بنابراین برای رسیدن به δ_u متناظر با مدل اصلی، باید تغییرمکان حاصل‌شده از مدل دوم را با یک ضریب مقیاس افزایش داد؛ در نتیجه ضریب زلزله باید در عددی بزرگ‌تر از C_d ضرب شود.

نکته‌ی تکمیلی ۲:

در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، بررسی حفظ یکپارچگی سازه‌ای سیستم باربری ثقلی تنها در جابجایی‌های متناظر با زلزله‌ی طرح (DE) الزامی است. اما برخی مراجع معتبر [۱۰] توصیه می‌کنند قابلیت باربری ثقلی در جابجایی‌های متناظر با حداکثر زلزله‌ی محتمل (MCE)، نیز ارزیابی شود.

با توجه به اینکه حفظ یکپارچگی سازه در حداکثر زلزله‌ی محتمل ضروری است، این کارگروه توصیه می‌کند حفظ یکپارچگی سازه‌ای سیستم باربری ثقلی در سطح حداکثر زلزله‌ی محتمل بررسی شود و در صورت فقدان مطالعات تحلیل خطر لرزه‌ای، این ارزیابی برای حداقل ۱٫۵ برابر جابجایی‌های زلزله‌ی طرح انجام شود.

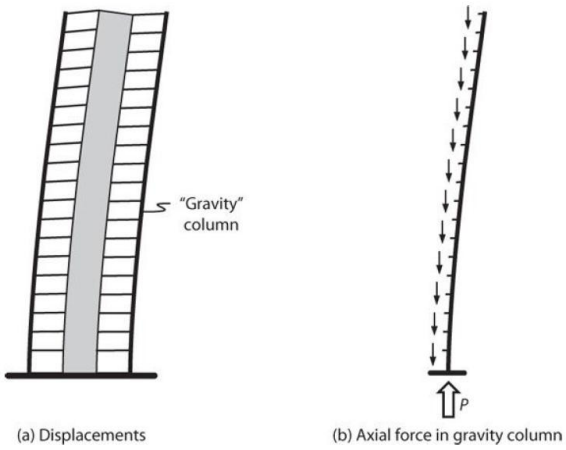
نکته‌ی تکمیلی ۳:

لازم است تغییرمکان جانبی طرح $\delta_u = C_d\delta_{ue}$ در راستای دو محور اصلی سازه و در هر راستا در هر دو جهت مثبت و منفی به‌صورت مجزا به مدل اعمال شود.

نکته‌ی تکمیلی ۴:

در برخی سیستم‌های سازه‌ای، ممکن است جابجایی‌های ناشی از زلزله موجب توسعه‌ی نیروهای محوری قابل‌توجهی در ستون‌های غیربابر لرزه‌ای شود؛ نیروهایی که در برخی رویه‌های مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه بتن ایران (آبا) و در نتیجه در بعضی از روش‌های ارائه‌شده در این دستنامه لحاظ نمی‌شوند. به عنوان مثال، در شکل ۳ ممکن است طراح، ستون‌ها و تیرها را اعضای غیربابر لرزه‌ای در نظر گرفته باشد، ولی در هنگام وقوع زلزله، قبل از تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در دو انتهای تیرها، آثار واژگونی سبب توسعه‌ی نیروی محوری قابل‌توجهی در ستون‌های غیربابر لرزه‌ای شود. اهمیت این موضوع زمانی دوچندان می‌شود که تیرهای غیربابر لرزه‌ای شکل ۳، محدودیت هندسی $l/d \geq 4$ را برآورده نکنند.

بدیهی است طراح سازه موظف است این اثر را به‌خصوص در ساختمان‌های بلند، مورد توجه ویژه قرار دهد. در چنین شرایطی، این ستون‌ها در مدل‌های اصلی و دوم طراحی نخواهند شد؛ زیرا در این مدل‌ها تنها اعضای باربر لرزه‌ای طراحی می‌شوند. از سوی دیگر، نیروهای محوری یاد شده در روش‌های ۱ و ۲-ج این دستنامه برای طراحی اعضای غیرباربر لرزه‌ای نیز منظور نمی‌شوند؛ در نتیجه، استفاده از این روش‌ها ممکن است به طراحی غیرمحافظه‌کارانه‌ی ستون‌های مورد بحث منجر شود. از طرفی در همین مثال، روش ۲-ب نیز ممکن است به نتایج غیراقتصادی بینجامد. از این‌رو، این کارگروه اکیداً توصیه می‌کند که در چنین مواردی، طراح از روش‌های غیرخطی، نظیر روش ۲- الف یا تحلیل‌های غیرخطی دقیق‌تر استفاده کند.



شکل ۳- توسعه‌ی نیروی محوری قابل توجه در ستون‌های غیرباربر لرزه‌ای به‌دلیل اثرات واژگونی در ساختمان‌های بلند [۱۰]

۴- مراجع

۱- مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، «طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه» ، ویرایش پنجم،۱۳۹۹.

۲- آیین‌نامه بتن ایران، جلد اول تحلیل و طراحی (ضابطه ۱-۱۲۰)، سازمان برنامه و بودجه کشور ۱۴۰۱.

3- ACI Committee 318. “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-25)”. *Am. Concr. Inst.*, 2025.

4- American Society of Civil Engineers. “Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-23)”. *American Society of Civil Engineers*, Reston, VA, 2023.

۵- «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)» ، ویرایش پنجم، ۱۴۰۵.

6- European Committee for Standardization (CEN). “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance — Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (EN 1998-1:2004)”. *CEN*, Brussels, 2004.

7- Joint ACI-ASCE Committee 352. “Guide for Design of Slab-Column Connections in Monolithic Concrete Structures (ACI 352.1R-11)”. *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, 2012

8- American Society of Civil Engineers. “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-22)”. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2022.

۹- مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، «بارهای وارد بر ساختمان»، ویرایش چهارم، ۱۳۹۸.

10- Moehle, J. P. “Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings”. *McGraw-Hill Education*, New York, 2015.