ابهاماتی درباره طراحی لرزه ای سازه ها

نادر شکوفی مقیمیان ، مدیر بخش سازه ، مهندسین مشاور توان
سارا باقری کریمی، کارشناس سازه، مهندسین مشاور توان

مقدمه

نزدیک به بیست سال از چاپ اولین ویرایش آیین نامه طراحی لرزه ای ایران می گذرد. آیین نامه بتن ایران نیز حدود پانزده سال عمر دارد. طراحی لرزه ای سازه های بتنی که در ایران بر اساس این دو آیین نامه انجام می شود، با هربار ویرایش این آیین نامه ها دچار تغییراتی شده است. اما با این وجود مواردی در این نشریات وجود دارد که همچنان نیازمند تغییر و بازنگری است. اگرچه تجربه نشان داده است که سازه های طراحی شده بر اساس این آیین نامه ها عموماً رفتار قابل قبولی در هنگام رخداد زلزله داشته اند، اما همچنان سوالات جدی درباره برخی از فرضیات اولیه این آیین نامه ها وجود دارد.

بسیاری از طراحان سازه با عبارت حدس اولیه نامناسب آشنایند. بسیاری از ما این تجربه را داریم که چنانچه سیستم سازه ای مناسب برای سازه انتخاب نشود و یا حدس اولیه ما از المانهای سازه ای درست نباشد، سازه های نامعین ممکن است به سوی پاسخی بجز آنچه عرف مهندسی انتظار دارد حرکت کند. به شکلی ساده می توان گفت که چنانچه حدس اولیه ما از ابعاد عضوی بشکلی نامناسب بزرگتر از نیاز آن المان باشد، ممکن است که بدلیل سختی بیش از حد فراهم شده برای آن المان، نیرو به سمت آن عضو جاری شود و در گام بعدی سعی و خطا در طراحی، ابعادی حتی بزرگتر از قبل نیز برای آن در نظر گفته شود. گاهی مهندسین تازه کار تنها با تاکید بر نسبت تنشهای بدست آمده از نرم افزارهای کامپیوتری، چنین طرحی را پذیرفته می دانند، حال آنکه یک مهندس با تجربه می تواند به سرعت نامناسب بودن طراحی را در چنین شرایطی تشخیص دهد.

چگونگی تغییرات ضوابط طراحی لرزه ای، به گونه ایست که در برخی موارد، مثال فوق را به خاطر می آورد. ما با آیین نامه هایی در طرح لرزه ای روبرو هستیم که در هربار ویرایش، مقداری بر نیروهای لرزه ای می افزاید و ضوابط محدود کننده تری را برای این امر منظور می کند. جای این پرسش برای طراحان سازه باقی می ماند که آیا نباید بجای افزودن ضرایب، در فلسفه بنیادین طراحی لرزه ای بازنگری کرد؟

علاوه بر این، باید توجه داشت که بجز در ساختمانهای معمولی و مرسوم مسکونی، در بسیاری از پروژه ها، طراح سازه نیاز به آن دارد که فلسفه پشتیبان ضابطه مطرح شده در آیین نامه را بداند تا بتواند آنرا در شرایط پیچیده موجود در طرح به شکل مناسب بکار برد. در آیین نامه های معتبر دنیا مرسوم است که همواره آیین نامه ها همراه با تفسیر آنها ارائه می شود. علاوه بر این، دسترسی به مشروح مذاکرات کمیته تدوین کننده آیین نامه نیز برای مهندسان مقدور است. در برخی موارد، مانند آیین نامه بتن ACI ۳۱۸ ، آیین نامه یکسال قبل از چاپ رسمی آن در اختیار جامعه مهندسی قرار می گیرد و مجموعه سوالات و اشکالات مطرح شده توسط مهندسین و محققین،همراه با پاسخهای ارائه شده توسط کمیته های تدوین کننده آیین نامه در نشریه ای به چاپ می رسد. این مجموعه نشریات پشتیبان به مهندسان کمک می

کنند که هم فلسفه ضوابط مطرح شده در آیین نامه را بداند و هم محدودیتها و توانایی های ضوابط و روابط ارائه شده در آیین نامه را به شکل مناسب تری درک کند.
متاسفانه آیین نامه طراحی لرزه ای ایران فاقد یک تفسیر رسمی و بند به بند از سوی کمیته تدوین کننده استاندارد می باشد. نگارنده تنها دو کتاب را می تواند نام برد که به شکلی مناسب این آیین نامه را تفسیر می کنند، یکی کتاب «نگرشی فلسفی به ضوابط محاسباتی ساختمانها در برابر زلزله» نوشته آقای مهندس علی اصغر طاهری بهبهانی و دیگری «شرحی بر ویرایش دوم آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله» نوشته آقای دکتر علی اکبر آقاکوچک. در مورد آیین نامه بتن ایران نیز تنها تفسیر بخش اول آیین نامه با آن همراه شده است و بخش مربوط به طراحی تا سال ۱۳۸۴ فاقد تفسیر رسمی بوده است. در این سال تفسیر این بخش از آیین نامه (دو سال پس از چاپ تجدید نظر اول آن و حدود ۱۳ سال پس از نخستین چاپ آیین نامه) به چاپ رسیده است.

طراحی لرزه ای در استاندارد ۲۸۰۰ ایران

نخستین آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله تحت شماره استاندارد ۲۸۰۰ در بهمن ۱۳۶۶ در دسترس عموم قرار گرفت. تا پیش از این تاریخ، طراحی لرزه ای در ایران بر اساس فصلی از استاندارد ۵۱۹ ایران و با نگاه به آیین نامه های خارجی انجام می پذیرفت.
فلسفه اصلی طراحی لرزه ای این آیین نامه –که در مطابقت با آیین نامه UBC انتخاب شده بود- بر اساس اعمال یک نیروی جانبی به شکل ضریبی از جرم ساختمان بود. ضریب معرفی شده در این آیین نامه از چهار بخش تشکیل می شد : شتاب مبنای طرح، ضریب بازتاب ساختمان، ضریب اهمیت بنا و ضریب رفتار ساختمان.
شتاب مبنای طرح بر اساس منحنی های همشتاب تهیه شده برای کشور ایران بر مبنای مطالعات بربریان و همکاران تنظیم شده بود. بر این اساس، کشور ایران به سه منطقه با شتاب مبنای زیاد، متوسط و کم تقسیم شده بود.
ضریب بازتاب ساختمان به صورت تابعی از زمان تناوب سازه و نوع خاک ساختگاه آن تعریف می شد. این تابع، شکل طیف طرح استاندارد آیین نامه زلزله ایران را مشخص می کند.
ضریب اهمیت بنا، میزان ضریب زلزله را بر اساس اهمیت بنا و میزان خسارات احتمالی ناشی از تخریب آن افزایش یا کاهش می داد.
ضریب رفتار ساختمان تاثیر عوامل غیر خطی را در کاهش نیروی وارده بر سازه منظور می کرد.
در ویرایش های دوم و سوم این آیین نامه که به ترتیب در سالهای ۱۳۷۸ و ۱۳۸۴ در دسترس مهندسین قرار گرفت، همچنان این فلسفه طراحی حفظ شده است و مقادیر ضرایب تغییر یافته اند. به عنوان نمونه، در ویرایش دوم آیین نامه ۲۸۰۰ ایران، تقسیم بندی کشور ایران بر اساس شتاب مبنای طرح از سه قسمت به چهار قسمت افزایش یافت و ضریب بازتاب ساختمان افزایشی در حدود ۲۵ درصد یافت. این ضریب بعدها در ویرایش سوم این آیین نامه بین ۱۰ تا ۳۰ درصد دیگر نیز افزایش یافت. به شکلی که

میزان حداکثر آن که در ویرایش نخست آیین نامه برابر ۲.۰ بود، در ویرایش دوم به ۲.۵ و در ویرایش سوم به ۲.۷۵ و حتی در شرایطی به ۳.۲۵ افزایش یافت. (شکل ۱)

تغییرات آیین نامه ای در ویرایش های متوالی البته به این موارد محدود نمی شود و موارد متعددی از جمله ضوابط تغییر مکانهای ثانویه، تغییر مکانهای مجاز، ضرایب رفتار سازه و نیروهای قائم زلزله را نیز در بر می گیرد.

با وجود این تغییرات، فلسفه پایه آیین نامه زلزله ایران همچنان ثابت مانده است. طراحی لرزه ای بر اساس این آیین نامه وابسته به استفاده از یک طیف بازتاب الاستیک است. این طیف بر اساس حداکثر پاسخ برش پایه یک سازه با یک درجه آزادی در حالت رفتار الاستیک بدست آمده است و بعد با استفاده از روشهای آماری هموار شده است.

پرسشهای بنیادین متعددی درباره استفاده از این طیف وجود دارد.

نخست آنکه طیف بدست آمده بر اساس رفتار الاستیک سازه ارائه شده است حال آنکه تقریبا همواره در سازه در هنگام رخداد زلزله –لااقل در هنگام رخداد زلزله های شدید- مفاصل پلاستیک شکل می گیرد و رفتار سازه را از حالت الاستیک خارج می کند. رابطه حداکثر تغییر مکان الاستیک و پلاستیک سازه بسیار پیچیده است و نمی توان به سادگی طیف بازتاب الاستیک را برای مشخص کردن حداکثر تغییر مکان پلاستیک سازه کافی دانست. در ویرایش سوم آیین نامه زلزله ایران، نسبت حداکثر تغییر مکان الاستیک حاصله از روابط آیین نامه ای با حداکثر تغییر مکان پلاستیک محتمل سازه به صورت خطی و با ضریب ۰.۷R معرفی شده است. این ضریب در ویرایش دوم این آیین نامه برابر ۰.۴R معرفی شده بود و در ویرایش اول همین آیین نامه اشاره مستقیمی به رابطه حداکثر تغییر مکان الاستیک و پلاستیک سازه نشده بود. چنانچه دیده می شود، مقدار تغییر مکان پلاستیک محتمل سازه در ویرایش سوم نسبت به ویرایش دوم ۷۵ درصد افزایش داده شده است. این افزایش به حدی زیاد است که دقت ما را در استفاده از طیف بازتاب ارائه شده در آیین نامه زیر سوال می برد. طراح سازه از خود می پرسد که آیا طیف طرح الاستیک ارائه شده در آیین نامه برای تخمین تغییر مکانهای واقعی سازه،۷۵ درصد خطا داشته است؟

دیگر آنکه طیف بازتاب تنها حداکثر پاسخ سازه را ارائه می کند و تاثیر مدت زمان لرزش یا تعداد نوسانات بارگذاری را نادیده می گیرد. حال آنکه در یک زلزله مفروض، در طی مدت لرزش زمین، سازه های کوتاه که پریود نوسانات کمتری دارند تعداد بیشتری نوسان را در مقایسه با سازه های بلند مرتبه با پریودهای بیشتر تجربه می کنند.

نکات مبهم در فلسفه بنیادین آیین نامه زلزله به طیف بازتاب محدود نمی شود. در مورد ضریب رفتار سازه نیز سوالات بسیار جدی مطرح است.

همانطور که می دانیم، اعضای مختلف سازه ای از تیر و ستون و بادبند و دیوار برشی،رفتارهای متفاوت لرزه ای از خود نشان می دهند. حتی در یک عضو سازه ای نیز در برش،خمش یا فشار رفتارهای متفاوتی دیده می شود.

بنابراین استفاده از یک ضریب رفتار واحد برای کل سازه و کل المانهای موجود در آن در تمامی مدهای رفتاری متفاوت آنها، به نظر نامناسب می آید.

به نظر می رسد که رویکردی که در آیین نامه های مبتنی بر عملکرد، از جمله «دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود» اتخاذ شده است و رفتار هر عضو را در هر شکل از عملکرد در بررسی لرزه ای سازه منظور می کند، رویکردی مناسب تر باشد و تصوری دقیق تر از رفتار سازه بدست دهد.
با توجه به نکات به نظر می رسد که شاید دقت طرح لرزه ای بر مبنای آیین نامه زلزله ایران چندان هم زیاد نباشد و شاید رویکرد مناسبتری نیز به طراحی لرزه ای سازه ها وجود داشته باشد.

طراحی برای تغییر مکان

واضح است که لرزش زمین، به صورت امواج مکانیکی در خاک منتقل می شود و به صورت تغییر مکان به سازه وارد می شود. با این وجود، از آنجا که سنت تحلیل و طراحی سازه بر اساس استفاده از نیروهای وارده به سازه است، در آیین نامه ها و ضوابط طراحی لرزه ای، تاثیرات زلزله به شکل نیروهای وارد بر سازه دیده شده اند. چنین وضعیتی از سویی باعث می شود که تقریب های بزرگی برای تخمین مقدار نیروی وارد به سازه منظور شود و از سوی دیگر تجسم نادقیقی را از رفتار سازه موجب می شود. شاید به همین دلیل است که آیین نامه های طراحی، در هر مرحله بازنگری توجه بیشتری به کنترل تغییر مکان سازه در هنگام زلزله نشان می دهند. این توجه به حدی است که در برخی موارد (از جمله قابهای خمشی فولادی ویژه)، عامل کنترل کننده ابعاد المانها در طراحی سازه، ضوابط تغییر مکان است.
به نظر می رسد که زمان آن رسیده باشد که آیین نامه طراحی لرزه ای از مبنای نیرو به مبنای تغییر مکان تغییر پیدا کند. چنین آیین نامه ای می تواند به شکلی مناسبتر وضعیت شکل پذیری سازه را در طراحی مد نظر قرار دهد. همچنین موقعیت و توزیع مفاصل پلاستیک در سازه بر این اساس به صورت دقیق تری دیده خواهند شد. یک مسیر پیشنهادی برای چنین رویکردی به طراحی در مرجع شماره ۷ ارائه شده است.
طراحی بر مبنای تغییر مکان از سویی با روش اجزای محدود نیز تناسب بهتری دارد. چرا که در این حالت مستقیما تغییر مکانهای گرهی در سازه بدست می آید و نیازی به معکوس کردن ماتریس سختی سازه برای حل مدل محاسباتی نخواهد بود. در نتیجه زمان محاسبات سازه نیز کاهش خواهد یافت.

طراحی اعضای بتنی

ضوابط طرح لرزه ای حدود نیم قرن است که در آیین نامه ACI ۳۱۸ مطرح شده اند و در هربار بازنگری این آیین نامه نیز محدوده ای گسترده تر می یابند. در آیین نامه بتن ایران این ضوابط از نخستین ویرایش آیین نامه مطرح بوده اند و در ویرایش جدید آن نیز تکمیل شده اند. بررسی ساختمانهای ساخته شده بر اساس ضوابط آیین نامه در زلزله های اخیر نشاندهنده آن است که این ساختمانها عموما رفتار قابل قبولی از خود نشان داده اند. با این وجود تحقیقات نشاندهنده آن است که ضوابط مطرح شده دارای ابهامات یا ناگفته هایی هستند که نیاز به تکمیل بیشتر در ویرایش های آتی و نیز بحث مفصل تر در تفسیر مربوطه دارند. علاوه بر اینها، تحقیقات نشان می دهد که برخی نکاتی که به صورت پیش فرض

برای مهندسین مطرح است ممکن است از دقت کافی بر خوردار نباشند. دو مورد از این پیش فرض های نادقیق و یک مورد از ضوابط آیین نامه ای که نیاز به تکمیل بیشتر دارد در زیر مطرح می شود.

نرمی و مقاومت

در طراحی برای زلزله بر تامین نرمی و شکل پذیری کافی در سازه تاکید فراوانی می شود. اما روش فعلی طراحی بر مبنای نیرو، مهندسان را به سویی سوق می دهد که در طراحی اعضا، اساس را بر تامین مقاومت کافی در المان بگذارند و تامین نرمی را با رعایت ضوابط آیین نامه در ارائه جزئیات و تامین آرماتور عرضی انجام دهند. در حقیقت با استفاده از روش طراحی لرزه ای بر مبنای نیرو، طراح تخمین مناسبی از میزان مقاومت تامین شده در اعضای سازه ای دارد و ابزار کافی برای افزایش یا کاهش مقاومت طراحی اعضا در دست دارد حال آنکه آیین نامه های موجود توانایی تشخیص تاثیر فاکتورهای طراحی بر میزان شکل پذیری اعضا را فراهم نمی کنند.

این امر آنگاه حساسیت بیشتر می یابد که دقت شود که مقدار مقاومت و شکل پذیری یک عضو رابطه معکوس با یکدیگر دارند. به این معنی که با افزایش مقدار آرماتور طولی، مقاومت عضو افزایش می یابد اما شکل پذیری این عضو کاهش خواهد یافت.

در هنگام طراحی لرزه ای سازه، طراح برای اعضایی که سهم بیشتری در حمل نیروی زلزله دارند، مقاومت بیشتری در نظر می گیرد. این مقاومت بیشتر، چنانچه گفته شد، باعث می شود که این عضو دارای شکل پذیری کمتری باشد. در نتیجه موقعیتی ناخواسته پیش می آید که در آن المانهایی که نقش بیشتری در تامین پایداری سازه در هنگام زلزله دارند، از شکل پذیری کمتری برخوردارند.

توزیع آرماتور خمشی

ضوابط طراحی سازه های بتنی ابتدا برای بارهای ثقلی تدوین شده اند و سپس به بارهای لرزه ای تعمیم یافته اند. این تعمیم در برخی موارد باعث می شود پیش فرضهایی در زمینه طراحی لرزه ای مد نظر قرار گیرد که از دقت کافی برخوردار نیستد.

شاخص ترین این پیش فرضها موقعیت قرار گیری میلگردهای طولی در اعضای خمشی است. طبق پیش فرض، میلگردها باید حتی الامکان در دورترین موقعیت نسبت به تارخنثی قرار گیرند تا بیشترین بازوی لنگر را فراهم کنند. بسیاری از همکاران ما در هنگام کنترل سازه با این پرسش روبرو شده اند که لایه های آرماتور تقویتی در عمق کمتری قرار می گیرند و در نتیجه تاثیر کمتری از آرماتوری که در لایه اصلی قرار گرفته است دارند. وونگ و همکاران در تحقیقی نشان دادند که تفاوت اندکی بین مقاومت خمشی تیری که در آن آرماتورهای طولی در بالا و پایین مقطع قرار گرفته اند و تیری که در آن همین میزان میلگرد در عمق مقطع در دو سوی تیر قرار داده شده اند وجود دارد. (شکل ۲)

چنین نتیجه ای با رویکرد مرسوم طراحی دیوارهای برشی که در آن آرماتور مورد نیاز عضو را به صورت یکنواخت در عمق مقطع توزیع می نماییم همخوانی دارد.

چنانچه با پذیرش این تحقیقات میلگردهای طولی اعضای خمشی در عمق تیر توزیع شود، دو مزیت عمده بدست می آید. نخست اینکه بتن ریزی تیرها با سهولت بیشتری انجام می گیرد و علی الخصوص در محل اتصال تیر به ستون که عموماً ازدحام آرماتور در آن بتن ریزی را با دشواری روبرو می کند، می تواند بسیار کارگشا باشد. از سوی دیگر توزیع آرماتورهای طولی در عمق تیر باعث افزایش مقاومت برشی اتصال نیز خواهد شد و رفتار اتصال را بهبود خواهد بخشید.

برش

طراحی اعضای بتنی در برش و خمش عموما مستقل از یکدیگر انجام می شود حال آنکه این دو کاملا با یکدیگر مرتبطند و نمی توان در طراحی آنها را به سادگی مستقل از یکدیگر در نظر گرفت.

طراحی برشی اعضای بتن مسلح با فرض ایجاد ترکهای برشی ۴۵ درجه استوار است. با این فرض مکانیسم انتقال برش بوسیله ایجاد خرپایی است که المانهای ۴۵ درجه بتنی اعضای فشاری آن و خاموتهای عمودی، اعضای کششی آنرا تشکیل می دهند. آرماتور طولی در سمت کششی و بلوک فشاری بتنی در سمت فشاری نیز اعضای طولی این خرپا را می سازند. (شکل ۳)

با منظور کردن تعدادی فرض ساده کننده، می توان دید که چنین رویکردی به طراحی نمی تواند چندان مناسب باشد. با فرض اینکه محل برآیند نیروی فشاری در تیر در نزدیکی آرماتور فشاری باشد می توان میزان مقاومت خمشی عضو را به شکل زیر نوشت :

$$M_i = T(d - d')$$

با در نظر گرفتن تاثیر خرپای برشی، این رابطه به صورت زیر اصلاح می شود :

$$M_{iv} = T(d - d') - V\frac{(d - d')}{2} = (T - \frac{V}{2})(d - d')$$

با صرفنظر از برش ناشی از بارهای ثقلی و فرض مقاومت خمشی یکسان در دو سر عضو و با فرض اینکه طول عضو، x برابر $(d\text{-}d')$ باشد می توان نوشت :

$$V = \frac{2M_{iv}}{x(d - d')}$$

و نتیجه گرفت که :

$$M_{iv} = T(d - d') - \frac{M_{iv}}{x}$$

و در نتیجه :

$$M_{iv} = \frac{M_i}{1 + 1/x}$$

در یک تیر عمیق که طول آن حدود ۴ برابر عمقش باشد، این امر نشاندهنده کاهش ۲۰ درصدی مقاومت خمشی تیر در اثر وجود خرپای برشی است. حتی در یک تیر با تناسب مرسوم که طول آن حدود ۱۰ برابر عمقش است نیز این کاهش در حدود ۱۰ درصد خواهد بود. حال آنکه تالیج آزمایش چنین کاهشی در مقاومت خمشی عضو را تایید نمی کنند. در نتیجه نمی توان مکانیسم عمل خرپای برشی را به شکل ساده ای که در اینجا توضیح داده شده است قابل قبول دانست.

تردیدها در مورد چگونگی عمل خرپای برشی در محل مفاصل پلاستیک بیشتر نیز می شود. در محل تشکیل مفصل پلاستیک، ترکهای خمشی موجود در عضو، تقریبا تمامی عمق سطح مقطع را در می نوردند. بخصوص در هنگام بارگذاری های رفت و برگشتی مانند زلزله، بدلیل تغییر جهت لنگر، جهت کششی و فشاری مقطع نیز عوض می شوند در نتیجه قسمتی از مقطع که پیش از این بصورت فشاری عمل می کرده است در کشش می افتد و در آن ترکهای عمودی کششی بوجود می آید. از سوی دیگر در بخش کششی مقطع که در این زمان در فشار قرار گرفته است، هنوز ترکهای موجود در اثر فشار بسته نشده است. در نتیجه یک ترک عمودی سراسر عمق مقطع را طی می کند. در چنین شرایطی فرض وجود المان ۴۵ درجه فشاری بتنی و در نتیجه مکانیسم خرپای برشی ناصحیح خواهد بود.

در شرایط معمول، عملکرد برشی تیرها به صورت مجموعه از سه عامل دیده می شود : عملکرد خاموتها در نتیجه مکانیسم خرپایی، درگیری سنگدانه ها و عملکرد زبانه (Dowel action) آرماتور طولی. در هنگام رخداد زلزله در محل تشکیل مفصل پلاستیک، با توجه به توضیح فوق دیگر نمی توان عملکرد خاموتها را در تحمل برش موثر دانست. بدلیل وجود ترکهایی با عرض نسبتا زیاد، درگیری سنگدانه ها نیز قابل اعتماد نخواهد بود و در نتیجه کل برش مقطع در مفاصل پلاستیک باید بوسیله عملکرد زبانه با آرماتورهای طولی حمل شود.

بر این اساس باید ضوابط طراحی برشی در مفاصل پلاستیک احتمالی، متفاوت با نقاط خارج از این مفاصل تعریف شود و باید شامل فاکتورهای تاثیرگذار بر عملکرد زبانه، شامل قطر میلگرد طولی و موقعیت اولین خاموت از بر ستون و نیز فاصله آرماتورها در طول پلاستیک تیر باشد. روابط فعلی آیین نامه ابزار کافی برای منظور کردن این آثار و تعیین مقاومت برشی عضو در محل تشکیل مفاصل پلاستیک را بدست نمی دهند.

جمع بندی

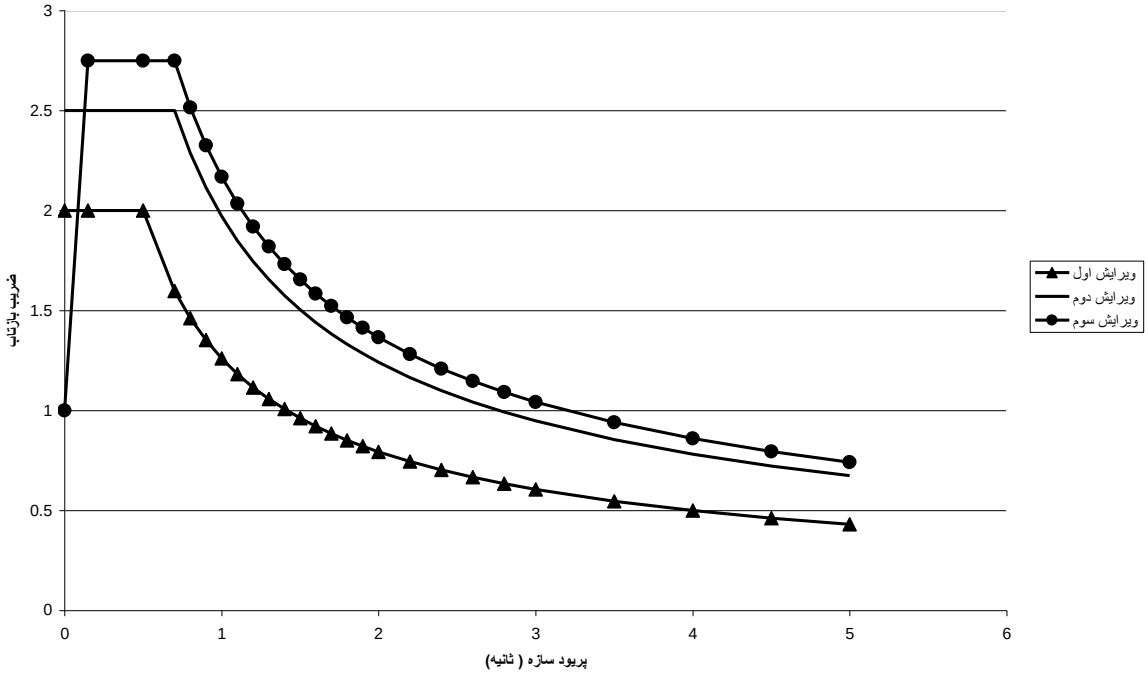
در این مقاله، لزوم وجود تفسیر رسمی و بند به بند آیین نامه های طراحی که توسط کمیته تدوین کننده آیین نامه و همراه با آن ارائه شود مطرح گردید. کاستی های موجود در فلسفه طراحی لرزه ای بر مبنای نیرو بحث شد و احتمال وجود رویکرد تغییر مکانی به زلزله و فواید ناشی از چنین رویکردی مطرح گردید. دو نمونه از پیش فرضهای نادقیق در طراحی سازه ارائه شد. در نهایت بر لزوم بازبینی ضوابط برش بخصوص در مفاصل پلاستیک تاکید گردید.

منابع :

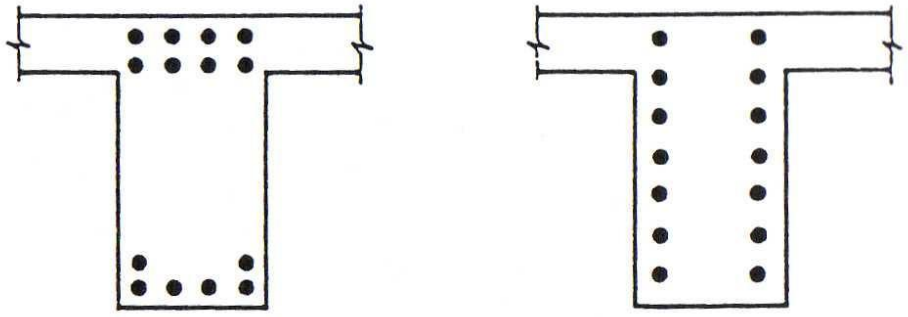
۱- آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله – استاندارد ۲۸۰۰ ایران – نشریه شماره ض ۲۵۳ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ویرایش های اول بهمن ۱۳۶۶ ، دوم آذر ۱۳۷۸ و سوم خرداد ۱۳۸۴

۲- آیین نامه بتن ایران – نشریه شماره ۱۲۰ سازمان مدیریت و برنامه ریزی- تجدید نظر اول ۱۳۸۲

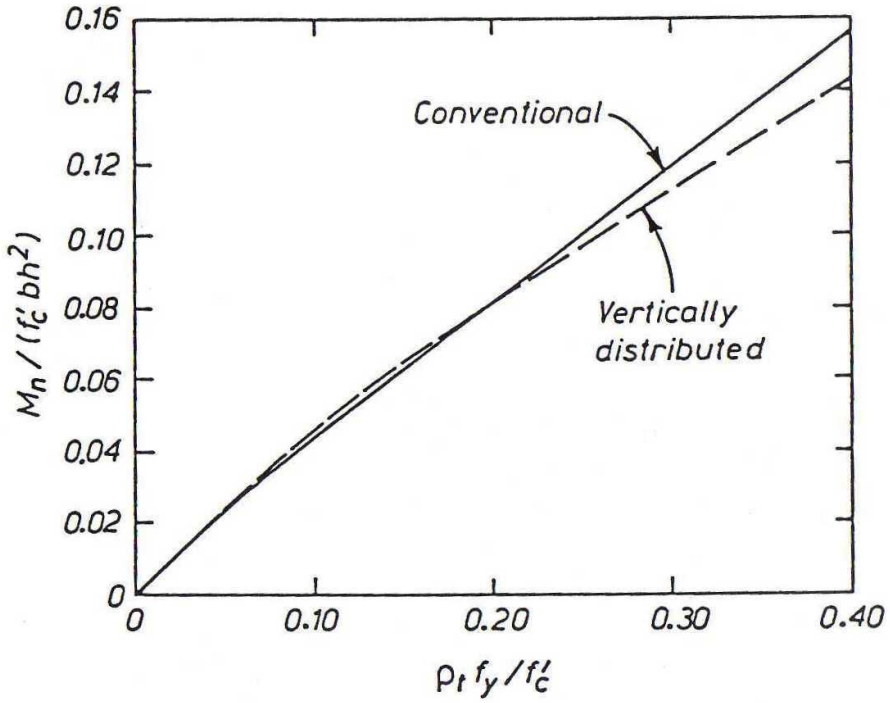
۳- تفسیر بخش دوم آیین نامه بتن ایران – ضمیمه نشریه شماره ۱۲۰ سازمان مدیرین و برنامه ریزی – ۱۳۸۴
۴- آیین نامه سازه های بتنی ACI ۳۱۸-۰۲ و تفسیر ACI ۳۱۸ R – ۰۲ ترجمه مهندس مجید رضا نقیه- انتشارات ارکان ۱۳۸۳
۵- نگرشی فلسفی به ضوابط محاسباتی ساختمانها در برابر زلزله – مهندس علی اصغر طاهری بهبهانی – نشریه شماره ۲۳۰ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن – چاپ دوم تابستان ۱۳۷۶
۶- شرحی بر ویرایش دوم آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله – دکتر علی اکبر آقاکوچک و مهندسی سید سهیل مجید زمانی – کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی وزارت کشور – ۱۳۸۰
۷- Myths and fallacies in earthquake engineering – Conflict between design and reality – M.J.N. Priestley- Proceedings of Tom Paulay Symposium ۱۹۹۳ – ACI SP-۱۵۷
۸- Reinforced concrete structures – R. Park & T. Paulay – John Wiley & sons – ۱۹۷۵
۹- Seismic Resistance of frame with vertically distributed longitudinal reinforcement in beams – P.K.C Wong , M.J.N. Priestley and R. Park – ACI Structural Journal – Vol ۸۷ , No. ۴ , July/August ۱۹۹۰, pp. ۴۸۸-۴۹۸



شکل ۱ – تغییرات ضریب بازتاب ساختمان در ویرایش های اول تا سوم آیین نامه زلزله ایران

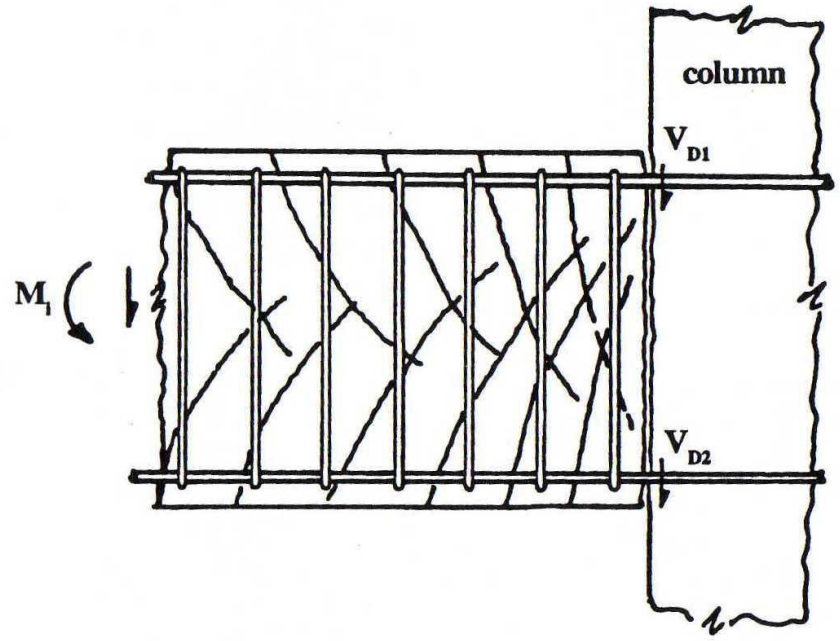


Arrangements of longitudinal reinforcement in beams

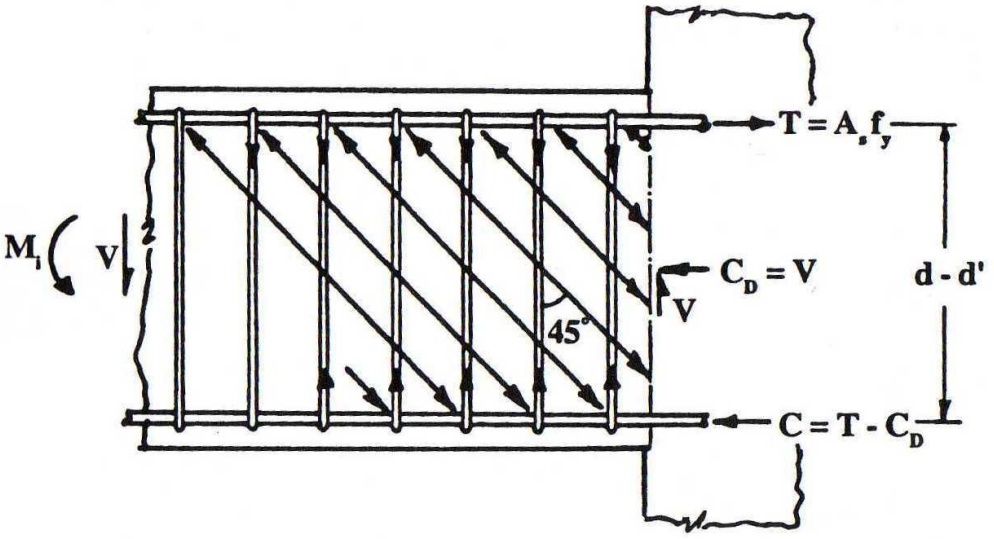


Dimensionless flexural strength for beams with conventional and vertically distributed reinforcement

شکل ۲- مقایسه تاثیر نحوه توزیع میلگرد طولی در عمق تیر



a) Conditions at high ductility



b) 45 deg truss mechanism

Shear transfer in beam plastic hinges

شکل ۳- مکانیسم خرپایی جهت انتقال برش و وضعیت مفصل پلاستیک