بررسی شکل‌پذیری اعضاء و کل سازه در ساختمانهای بتنی دارای سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط

غلامرضا قدرتی امیری، استاد، قطب علمی پژوهشهای بنیادین در مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
سیده نگار کالبدی، کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

شناخت رفتار لرزه‌ای واقعی سازه در تأمین سطح عملکرد مناسب برای سازه، از محورهای اساسی در روشهای نوین طراحی لرزه‌ای می‌باشد. بررسی نتایج زمین‌لرزه‌های پیشین و خسارات وارده به سازه‌های موجود، اهمیت شکل‌پذیری و تأمین آن در سازه را به عنوان موضوعی اساسی در طراحی لرزه‌ای سازه مورد توجه قرار داده است. بر این اساس در این مقاله، به‌منظور بررسی شکل‌پذیری اعضاء در ساختمانهای بتنی، تغییرشکل محتمل برای سازه و هر یک از اعضاء در هنگام زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، سه ساختمان بتنی با سیستم باربر قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مدلسازی و تحلیل شده است. در این ارزیابی ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری سازه، عنوان‌شده در استاندارد ۲۸۰۰ با ضرایب متناظر آن در شیوه‌های طراحی بر اساس عملکرد نظیر ضرایب شکل‌پذیری اعضا (m)، عنوان شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، مقایسه گردیده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، به‌طور متوسط ضریب کاهش نیرو برای سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط برابر ۷/۳ حاصل گردید. همچنین نتایج بررسی معیارهای پذیرش ضریب شکل‌پذیری عضو در روش خطی (ضریب m) و مقدار متناظر آن در روش غیرخطی، مبین انطباق مناسب این دو ضریب در سطح عملکرد مورد نظر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ضریب رفتار، ضریب شکل‌پذیری اعضاء، شکل‌پذیری سازه، طراحی بر اساس عملکرد

۱– مقدمه

امروزه با توجه به اهمیت تأمین عملکرد مناسب لرزه‌ای سازه‌ها در طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر زلزله، مسأله شناخت رفتار سازه در هنگام زلزله از موضوعات اصلی در مهندسی زلزله است. بر این اساس در آیین‌نامه‌های طراحی سازه، معیارهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مبانی اصلی طراحی سازه می‌باشند.

در دهه‌های اخیر با بررسی نتایج زمین‌لرزه‌های پیشین و خسارات وارد به سازه‌ها، پرداختن به مفاهیم شکل‌پذیری اهمیت ویژه‌ای یافته و بهره‌گیری از قابلیت شکل‌پذیری سازه در تأمین عملکرد مناسب برای سازه در هنگام زلزله بیش از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. از آن‌جمله، پس از وقوع زلزله در شهر سان‌فرناندو در ایالت کالیفرنیای آمریکا در سال ۱۹۷۱ و با توجه به خرابیهای زیاد ایجاد شده در اثر این زلزله، تحولات بسیاری در ضوابط آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای آمریکا حاصل گردید و مفاهیم شکل‌پذیری مورد توجه ویژه قرار گرفت. همچنین بررسیها بر علل خرابیهای زلزله‌های رخ داده در سالهای اخیر از جمله زلزلهٔ نورتریج (لوس‌آنجلس) در سال ۱۹۹۳، زلزلهٔ سال ۱۹۹۴ در کوبه (ژاپن) و نیز زلزلهٔ رودبار- منجیل (ایران) در سال ۱۳۶۹ اهمیت قابلیت شکل‌پذیری سازه در استهلاک انرژی زلزله را نمایان ساخت.

همچنین ضوابط طراحی بسیاری از آیین‌نامه‌های لرزه‌ای با نگرشی جدید در جهت تأمین این پارامتر در سازه، مورد بازبینی و تحول قرار گرفت. در این تحول ضوابط لرزه‌ای در جهت تعیین دقیقتر رفتار اعضاء و به‌خصوص تعیین ظرفیت شکل‌پذیری تغییر داده شد. از طرف دیگر از آنجا که تعیین دقیق ظرفیت تغییرشکل سازه مستلزم تحلیلهای غیرخطی سازه بوده و با توجه به زمان‌بر بودن این تحلیلها و از طرفی

آسان بودن آنالیزهای خطی نسبت به تحلیلهای غیرخطی، در آیین‌نامه‌های طراحی بر اساس نیروی کاهش یافته به‌صورت کلی برای سیستم‌های مختلف سازه‌ای ضرایب کاهنده‌ای موسوم به ضریب رفتار (R) به منظور کاهش نیروی زلزله با در نظر گرفتن عملکرد غیرخطی سازه‌ها ارائه شده است. این ضرایب به‌منظور کاهش نیروی زلزله با در نظر گرفتن عملکرد غیرخطی سازه‌ها می‌باشد. تعیین ضریب مذکور در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای با توجه به عوامل متعددی از جمله شکل‌پذیری سازه، اضافه مقاومت، میرایی و نیز ضرایب اطمینان به کار گرفته شده در ضوابط طراحی ساختمانها می‌باشد [۱].

از طرف دیگر در نسل جدید آیین‌نامه‌های طراحی و بهسازی لرزه‌ای که از روش طراحی بر اساس عملکرد در جایگزینی با روشهای تجویزی استفاده می‌شود، بررسی دقیقتر این موضوع مد نظر قرار گرفته است. در این فرآیند با توجه به رفتار واقعی اعضاء تحت اثر نیروهای وارده و با در نظرگیری کلیهٔ پارامترهای اثرگذار، از جمله مصالح، هندسه و مشخصات اعضاء، شکل‌پذیری متناظر با هر تلاش در هر المان برآورد می‌گردد.

با توجه به ضرایب شکل‌پذیری مورد استفاده در هر دو روش طراحی لرزه‌ای مذکور، تحقیقات سالهای اخیر در بررسی این ضرایب گسترده می‌باشد. بررسی در خصوص تحقیقات انجام شده در این زمینه، نشاندهنده مطالعات فراوان این موضوع در دهه‌های اخیر است. از آن جمله می‌توان به مطالعات کونات و همکاران [۲] اشاره کرد که در تحقیقات خود با بررسی سازه‌های مختلف، ارتباط بین ضرایب شکل‌پذیری عنوان شده در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای و میزان تغییرشکل محتمل سازه‌ها تحت بار زلزله را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این بررسی ضریب m عنوان شده در پیش استاندارد *FEMA356* برای سازهٔ مورد مطالعه (ضریب شکل‌پذیری عضو)، محاسبه گردیده و با ضریب شکل‌پذیری کلی سازه که از نتایج تحلیلهای غیرخطی حاصل گردیده و نیز ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری عنوان‌شده در آیین‌نامهٔ لرزه‌ای با شیوهٔ طراحی بر اساس نیروی کاهش یافته، مورد قیاس قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشاندهنده به واقع نزدیک بودن ضریب m به عنوان معیار مناسب‌تر به منظور نشان دادن قابلیت شکل‌پذیری سازه می‌باشد، چرا که این ضریب در بردارندهٔ رفتار مصالح و نمایشگر بهتری از تغییرشکلهای محتمل طبقات می‌باشد.

همچنین میراندا [۳] در تحقیقات خود با برآورد میزان تغییرشکل سازه در اثر بار زلزله و ضرایب کاهش نیرو، به بررسی پارامترهای مؤثر در تعیین این ضرایب پرداخته است. این محقق در سال ۱۹۹۴ به جمع‌آوری نتایج حاصل از ۱۳ تحقیق مختلف که در مدت ۳۰ سال قبل از آن توسط پژوهشگران دیگر در خصوص این ضریب انجام و ارائه شده بود، پرداخت و پس از بررسیهای بیشتر، نتایج جدیدی در خصوص تأثیر عوامل مختلف بر ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری سازه ($R\mu$) ارائه نمود. نتایج ارائه شده توسط این محقق نشان می‌دهد که با وجود تفاوت ناچیز در مقدار ضریب کاهش $R\mu$ در خاکهای سخت سنگی و نیمه‌سخت، به‌منظور ارائهٔ روابط کاربردی، این تفاوت ناچیز و قابل صرفنظر کردن می‌باشد. برای خاکهای نرم، تغییرات $R\mu$، تفاوت چشمگیری با نمودار تغییرات مربوط به خاکهای سخت داشته و به میزان قابل‌توجهی به پریود غالب زلزله بستگی دارد. مطالعات انجام گرفته توسط میراندا نشان می‌دهد که پاسخ الاستیک و غیرالاستیک سازه واقع شده بر روی خاک نرم به نسبت زمان تناوب اصلی سازه به پریود خاک وابسته است. همچنین این محقق تأثیر شدت زلزله و فاصله از کانون زلزله را بر روی تغییرات مقدار ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از این تحقیق مبین تأثیر قابل‌اغماض پارامترهای ذکر شده بر مقدار ضریب کاهش نیرو به علت شکل‌پذیری می‌باشد.

ریپاپیس و همکاران [۴] نیز در زمینهٔ میزان شکل‌پذیری در ساختمانهای بتنی گوناگون، با در نظر گرفتن اثرات ناشی از قابلیت تغییرشکل و نیز مقاومت سازه تحقیق نموده‌اند. در این پژوهش، یک ساختمان پنج طبقهٔ بتنی که بر اساس ضوابط آیین‌نامهٔ دههٔ ۱۹۶۰ یونان طراحی لرزه‌ای شده، انتخاب گردیده و بر اساس آنالیز غیرخطی بررسی و پارامترهای مورد نظر محاسبه شده است. همچنین نمونهٔ انتخابی بر اساس آیین‌نامه‌های کنونی این

کشور طراحی مجدد شده و بررسیها برای این ساختمان تکرار گردیده است. بررسیهای صورت گرفته نشان داده است که ساختمان موجود اضافه مقاومت بیشتری نسبت به ساختمان طراحی شده بر اساس ضوابط آیین‌نامهٔ معاصر دارند ولیکن ظرفیت شکل‌پذیری آنها کمتر است. همچنین مقاومت جانبی ساختمان طراحی شده بر اساس آیین‌نامهٔ جدید بیشتر بوده و نتایج تحلیلهای غیرخطی آنها نشاندهندهٔ تشکیل مفاصل پلاستیک در ابتدا در تیرها و سپس در ستونها می‌باشد. این نتایج نشانگر توجه بیشتر آیین‌نامه‌های جدید به قابلیت شکل‌پذیری سازه نسبت به آیین‌نامه‌های پیشین می‌باشد.

بر این اساس در این مقاله ضمن بررسی مفاهیم شکل‌پذیری، این پارامتر از سطح مصالح تا کل سازه (شکل‌پذیری مصالح، مقطع، عضو و سازه) مورد بحث و بررسی قرار گرفته و تحقیقات در این زمینه بر روی سه ساختمان بتنی با تعداد طبقات سه، پنج و هفت طبقه و اعضایی با ابعاد و آرماتورگذاری متفاوت انجام گرفته است. در این راستا ظرفیت شکل‌پذیری اعضاء بر اساس روابط تحلیلی مورد محاسبه قرار گرفته است. همچنین با انجام آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه‌های مورد مطالعه، مقدار نیاز شکل‌پذیری اعضاء محاسبه و با مقدار ظرفیت شکل‌پذیری اعضای طراحی شده براساس آیین‌نامهٔ طراحی لرزه‌ای ایران، استاندارد۲۸۰۰، و از طرف دیگر با مقادیر ضرایب m ارائه شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران مورد مقایسه قرار گرفته و اعتبار این ضریب و نیز نتایج حاصل از آن به عنوان پارامتر نمایندهٔ شکل‌پذیری کل سازه، مورد بحث و کنکاش قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق علاوه بر بررسی و مقایسهٔ وضعیت شکل‌پذیری اعضای سازه‌های مورد مطالعه با مقدار نیاز تحت بار زلزله، دستیابی به شکل‌پذیری مطلوب بر اساس تغییر مشخصات اعضاء بررسی گردیده است.

۲- بررسی شکل‌پذیری از سطح مصالح تا کل سازه

قبل از دهۀ ۱۹۶۰، مفهوم شکل‌پذیری تنها در توصیف خصوصیات مصالح به کار گرفته می‌شد. پس از مطالعات صورت گرفته توسط بیکر در خصوص طراحی سازه به روش پلاستیک و نیز تحقیقات انجام گرفته توسط هوسنر در زمینهٔ مسائل لرزه‌ای، مفهوم شکل‌پذیری در سطح سازه گسترش پیدا کرد و به همراه خصوصیات مقاومت و سختی برای کل سازه متصور گردید [۵].

در تحقیقات انجام گرفته در طراحی پلاستیک سازه، پارامتر شکل‌پذیری به عنوان قابلیت سازه در تحمل تغییرشکلها تحت بار اعمالی پس از جاری‌شدن اولیه، بدون کاهش قابل توجه در مقاومت کلی سازه، تعریف می‌شود. آگاهی از شکل‌پذیری سازه، امکان تعیین ظرفیت سازه را فراهم می‌سازد. این موضوع، معیار بسیار مهمی برای طراحی یک سازه تحت نیروی مشخص می‌باشد.

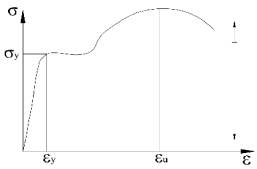
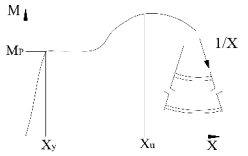
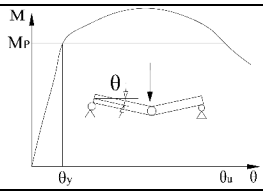
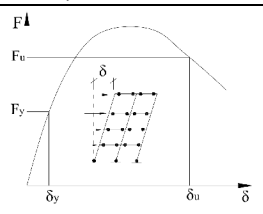
در مطالعات انجام گرفته در زمینهٔ طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، پارامتر شکل‌پذیری به منظور تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه با مشخص نمودن مقدار انرژی زلزله که می‌تواند با تغییرشکلهای پلاستیک اعضاء مستهلک شود، به کار می‌رود. استفاده از خصوصیت شکل‌پذیری این امکان را به طراح می‌دهد که نیروی طراحی لرزه‌ای را کاهش داده و از طرف دیگر امکان کنترل خسارات احتمالی سازه را حتی در زلزله‌های شدید، فراهم سازد [۵].

پارامتر شکل‌پذیری را می‌توان به شکل‌پذیری مصالح، شکل‌پذیری مقطع عضو، شکل‌پذیری عضو و شکل‌پذیری کل سازه تفکیک نمود. بر این اساس شکل‌پذیری ناشی از مصالح تا کل سازه به صورت زیر تعریف می‌شود:

- شکل‌پذیری مصالح، و یا شکل‌پذیری محوری، شامل خصوصیت تغییرشکل پلاستیک مصالح است؛
- شکل‌پذیری در مقطع عضو، و یا شکل‌پذیری به علت انحناء، شامل تغییرشکلهای پلاستیک مقطع عضو با توجه به عملکرد متقابل اجزای آن است؛
- شکل‌پذیری عضو، و یا شکل‌پذیری به علت چرخش عضو، وابسته به مشخصات عضو می‌باشد؛
- شکل‌پذیری سازه و یا شکل‌پذیری به علت تغییرمکان، شامل رفتار کلی سازه می‌باشد [۵].

با توجه به تعاریف فوق، می‌توان شکل‌پذیری را در قالب جدول (۱) طبقه‌بندی نمود.

جدول (۱): *شکل‌پذیری در سطوح مختلف [۵].*

نوع شکل‌پذیری	نمودار شماتیک	تعریف
شکل‌پذیری مصالح (محوری)		$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}$
شکل‌پذیری مقطع عضو (انحناء)		$\mu_\varepsilon = \frac{X_u}{X_y}$
شکل‌پذیری عضو (چرخش)		$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$
شکل‌پذیری سازه (تغییرمکان)		$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y}$

در جدول (۱) μ: شکل‌پذیری، ε: تغییر طول، X: انحناء، θ: چرخش و δ: تغییرمکان است. همچنین M، σ و F نمایشگر تنش، ممان و نیرو می‌باشد. همچنین در روابط فوق، اندیس y، در حد جاری شدن عضو و اندیس u، در حالت حدی عضو را نمایانگر است.

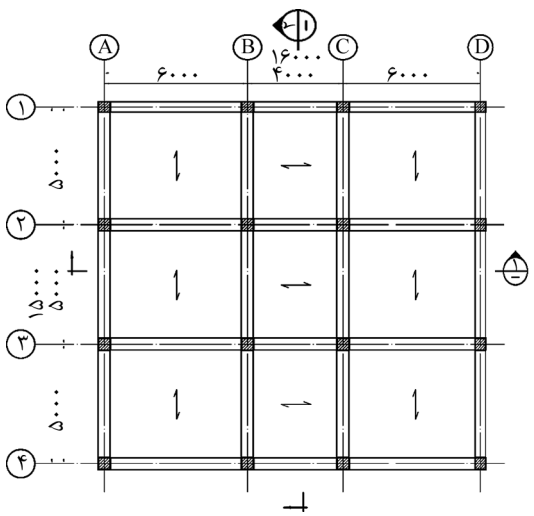
با توجه به مطالب فوق، برای اینکه سازه بتواند شکل‌پذیر باشد بایستی اعضاء، اتصالات، مقاطع و مصالح به کار رفته شده در آن شکل‌پذیر باشند. رفتار شکل‌پذیر برای عضو به معنی قابلیت تحمل تغییرشکلهای غیرالاستیک پیش از ایجاد خرابی در سازه می‌باشد. حال آنکه مادهٔ شکل‌پذیر به ماده‌ای گفته می‌شود که بتواند تحت بارهای اعمالی، کرنشهای زیاد را تحمل کند. برعکس، ماده و سازهٔ شکننده یا ترد به ماده یا سازه‌ای گفته می‌شود که با رسیدن به مقدار حداکثر بار خود به صورت ناگهانی گسیخته شود.

در صورتی که سازه شکل‌پذیر باشد، می‌توان انتظار داشت که سازه بتواند تحت تأثیر افزایش بار، تغییر جهت بار و یا حرکات ناشی از نشست شالوده‌ها، رفتار انعطاف‌پذیری از خود نشان دهد. به این ترتیب چنانچه سازه به‌گونه‌ای طراحی شود که در هنگام زلزله به صورت شکل‌پذیر رفتار نماید، ساکنین و یا استفاده‌کنندگان آن سازه قبل از وقوع خرابی، آگاه شده و بنابراین احتمال خسارت جانی در هنگام زلزله کاهش می‌یابد. این ویژگی در بسیاری از آیین‌نامه‌های ساختمانی مورد توجه قرار گرفته و در ضوابط طراحی لرزه‌ای سازه استفاده شده است. به عنوان مثال، آیین‌نامه طراحی ساختمانهای بتنی، *ACI*، برای دستیابی به یک مقدار حداقل شکل‌پذیری در سازه‌های بتنی تحت بارهای وارده، نسبت آرماتور طولی اعضای خمشی را محدود می‌کند.

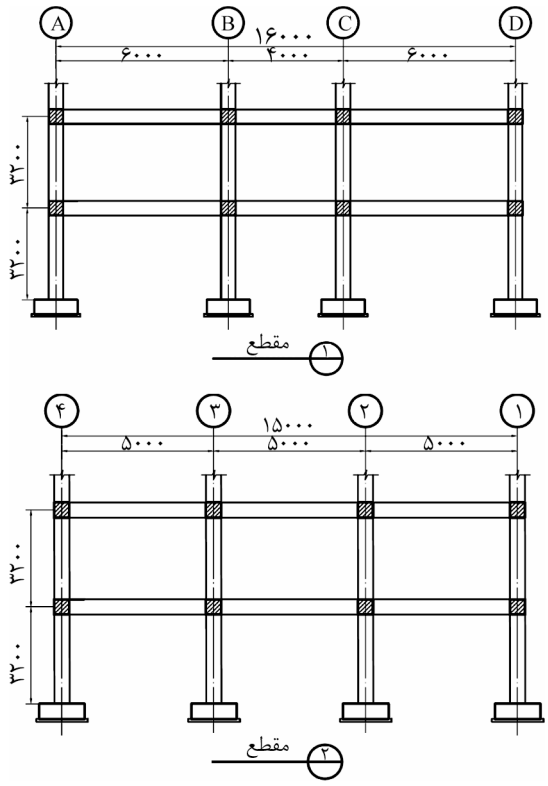
۳- معرفی سازه‌های مورد مطالعه و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق، بررسی بر روی سه ساختمان بتنی با تعداد طبقات سه، پنج و هفت طبقه با سیستم باربر قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط انجام گرفته است. لازم به ذکر است که در این تحقیق بررسی سازه‌های با پریود پایین مد نظر بوده است. در هر سه نمونه پلان طبقات و نیز نحوهٔ توزیع بار کف به تیرها مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است. همچنین همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در کلیهٔ نمونه‌ها ارتفاع طبقات برابر ۳/۲ متر منظور گردیده است.

به‌منظور طراحی اولیهٔ سازه‌های مورد مطالعه، بارگذاری ثقلی بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمانها [۶] در نظر گرفته شده است. بر این اساس بار مردهٔ طبقات برابر ۵/۵ کیلونیوتن بر مترمربع و در بام برابر ۶ کیلونیوتن بر مترمربع



شکل (۱): *پلان نمونه‌های مورد مطالعه.*



***شکل (۲)**: نمایی از نمونه‌های مورد مطالعه.*

در نظر گرفته شده است. همچنین بار زندهٔ طبقات برابر ۲ کیلونیوتن بر مترمربع و بار زندهٔ بام برابر ۱/۵ کیلونیوتن بر متر مربع لحاظ شده است. دیوارهای در نظر گرفته شده برای این سازه‌ها با وزنی برابر ۳ کیلونیوتن بر مترمربع برای دیوارهای خارجی محورهای A و D و ملحوظ نمودن ۲۰ درصد بازشو برای دیوارهای خارجی محورهای ۱ و ۴ سازه‌های مورد مطالعه، مطابق شکل(۱)، فرض شده است.

بارگذاری لرزه‌ای نیز بر اساس آیین‌نامهٔ طراحی ساختمانها در برابر زلزله [۷] انجام گرفته است. در این بررسی ساختگاه ساختمانها پهنهٔ با خطر نسبی زیاد و ساختمان با اهمیت متوسط لحاظ شده است. روش تحلیلی مورد استفاده در طراحی اولیهٔ سازه‌ها، روش استاتیکی معادل می‌باشد. با توجه به سیستم باربر لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه، قاب خمشی بتنی با شکل‌پذیری متوسط، ضریب رفتار در نظر گرفته شده با توجه به مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ ایران، برابر ۷ در نظر گرفته شده و در محاسبهٔ نیروی زلزلهٔ طراحی مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به مشخصات سازه‌های مورد مطالعه و بارگذاری در نظر گرفته شده، وزن لرزه‌ای سازه‌ها (با در نظرگیری درصد میزان مشارکت بار زنده در نیروی جانبی زلزله برابر ۲۰ درصد، برای ساختمانهای مسکونی مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران) به ترتیب برابر ۷۳۹۰، ۱۴۱۰۰، ۲۱۸۷۰ کیلونیوتن برای ساختمانهای سه، پنج و هفت طبقه بوده است.

مدلسازی اولیهٔ سازه‌های مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار *Sap11.0.8* انجام شده است. طراحی ساختمانهای مورد نظر، با توجه به مدل سازه در نرم‌افزار و نتایج تحلیل خطی سازه تحت بارهای وارده و براساس ضوابط آیین‌نامهٔ طراحی ساختمانهای بتنی، آبا [۸]، انجام شده و بر این اساس جزئیات مقاطع تیر و ستون تعیین و پیکربندی سازه مشخص گردیده است.

با توجه به نتایج طراحی سازه‌های مورد مطالعه، مقاطع در نظر گرفته شده برای تیر و ستون در این سازه‌ها مطابق جداول (۲) تا (۷) است. در هر یک از این جداول، ستون اول نام مفروض برای مقطع عضو، ستون دوم ابعاد مقطع و ستون سوم و چهارم (در جداول مربوط به تیرها) به ترتیب معرف میزان آرماتورهای طراحی پایین و بالای عضو و ستون سوم (در جداول مربوط به ستونها) نمایانگر کل آرماتور مقطع ستون مورد نظر است.

***جدول (۲)**: مقاطع تیرها در ساختمان سه طبقه.*

نوع	مقطع $b\times h$ (میلیمتر× میلیمتر)	A_s میلیمتر^2	A'_s میلیمتر^2
تیر ۱	۳۵۰×۳۵۰	۱۵/۲۴×۱۰^4	۲۲/۸×۱۰^4
تیر ۲	۳۵۰×۳۵۰	۱۵/۲۴×۱۰^4	۱۹/۰۴×۱۰^4
تیر ۳	۳۵۰×۳۵۰	۷/۶۳×۱۰^4	۱۵/۲۴×۱۰^4
تیر ۴	۳۵۰×۳۰۰	۱۰/۱۸×۱۰^4	۱۲/۷۳×۱۰^4
تیر ۵	۳۵۰×۳۰۰	۸/۸۹×۱۰^4	۱۲/۷۳×۱۰^4

***جدول (۳)**: مقاطع ستونها در ساختمان سه طبقه.*

نوع	مقطع $b\times h$ (میلیمتر× میلیمتر)	A_s میلیمتر^2
ستون ۱	۴۵۰×۴۵۰	۵۸/۹×۱۰^4
ستون ۲	۴۰۰×۴۰۰	۵۸/۹×۱۰^4

جدول (۴): *مقاطع تیرها در ساختمان پنج طبقه.*

نوع	مقطع $b\times h$ (میلیمتر× میلیمتر)	A_s میلیمتر^2	A'_s میلیمتر^2
تیر ۱	۴۵۰×۴۵۰	۲۲/۸۴×۱۰^4	۲۶/۶۴×۱۰^4
تیر ۲	۴۵۰×۴۵۰	۱۷/۸۱×۱۰^4	۲۲/۸۴×۱۰^4
تیر ۳	۴۵۰×۴۵۰	۱۲/۷۲×۱۰^4	۱۷/۸۱×۱۰^4
تیر ۴	۴۵۰×۴۵۰	۷/۶۳×۱۰^4	۱۲/۷۲×۱۰^4
تیر ۵	۴۵۰×۴۰۰	۱۳/۳۹×۱۰^4	۱۷/۸۱×۱۰^4
تیر ۶	۴۵۰×۴۰۰	۱۷/۸۱×۱۰^4	۲۱/۵۸×۱۰^4
تیر ۷	۴۵۰×۴۰۰	۷/۶۳×۱۰^4	۱۲/۷۲×۱۰^4

جدول (۵): *مقاطع ستونها در ساختمان پنج طبقه.*

نوع	مقطع $b\times h$ (میلیمتر× میلیمتر)	A_s میلیمتر^2
ستون ۱	۵۵۰×۵۵۰	۹۸/۵۲×۱۰^4
ستون ۲	۵۰۰×۵۰۰	۴۹/۲۶×۱۰^4

جدول (۶): *مقاطع تیرها در ساختمان هفت طبقه.*

نوع	مقطع $b\times h$ (میلیمتر× میلیمتر)	A_s میلیمتر^2	A'_s میلیمتر^2
تیر ۱	۵۵۰×۵۰۰	۲۶/۶۱×۱۰^4	۳۰/۴۱×۱۰^4
تیر ۲	۵۵۰×۵۰۰	۲۴/۱۳×۱۰^4	۲۶/۶۱×۱۰^4
تیر ۳	۵۵۰×۵۰۰	۱۹/۰۱×۱۰^4	۲۲/۸۱×۱۰^4
تیر ۴	۵۰۰×۴۵۰	۱۵/۲۷×۱۰^4	۲۰/۳۶×۱۰^4
تیر ۵	۵۰۰×۴۵۰	۱۲/۷۲×۱۰^4	۱۵/۲۷×۱۰^4
تیر ۶	۵۰۰×۴۵۰	۱۵/۲۴×۱۰^4	۱۹/۰۴×۱۰^4
تیر ۷	۵۰۰×۴۵۰	۲۲/۸۴×۱۰^4	۲۷/۹۳×۱۰^4
تیر ۸	۴۵۰×۴۰۰	۱۵/۲۴×۱۰^4	۱۹/۰۴×۱۰^4
تیر ۹	۴۵۰×۴۰۰	۱۲/۷۲×۱۰^4	۱۵/۲۴×۱۰^4

جدول (۷): *مقاطع ستونها در ساختمان هفت طبقه.*

نوع	مقطع $b\times h$ (میلیمتر× میلیمتر)	A_s میلیمتر^2
ستون ۱	۷۰۰×۷۰۰	۱۱۷/۸۱×۱۰^4
ستون ۲	۶۵۰×۶۵۰	۵۸/۹۰×۱۰^4
ستون ۳	۵۵۰×۵۵۰	۵۸/۹۰×۱۰^4

به منظور افزایش دقت در تحلیل و بررسی رفتار سازه و نیز تعیین ضریب رفتار برای سازه‌های مورد مطالعه، تحلیل استاتیکی غیرخطی نمونه‌ها نیز با مدلسازی سه‌بعدی سازه‌ها در نرم‌افزار *Perform4.0.1* و انجام آنالیزهای غیرخطی صورت گرفته است. در این مدلسازی مقادیر بارهای ثقلی، مشابه بارگذاری در مرحلهٔ طراحی به اعضای سازه اعمال شده است. همچنین بار لرزه‌ای بر اساس الگوهای بارجانبی تا رسیدن به تغییرمکان هدف و بر اساس ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود ایران [۹] در نظر گرفته شده است. در این پژوهش، مطابق تعاریف عنوان شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای، سطح عملکرد ایمنی جانی مدنظر قرار گرفته است.

۴- مبانی نظری

۴-۱- تعیین تغییرمکان هدف

هدف این تحقیق تعیین ضریب شکل‌پذیری کلی سازه و نیز ضرایب شکل‌پذیری اعضاء می‌باشد. با توجه به آن که روش تحلیل به کار گرفته شده، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بوده است، به این منظور در تعیین تغییرمکان هدف، روش ضرایب تصحیح بر اساس ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود [۹] مورد استفاده قرار گرفته است.

بر این اساس تغییرمکان هدف در نظر گرفته شده برای سازه‌های مورد مطالعه با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه گردیده است.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \qquad (۱)$$

در این رابطه، C_0 ضریب اصلاح برای ارتباط تغییرمکان طیفی سیستم یکدرجه آزادی به تغییرمکان بام سیستم چند درجه آزادی، C_1 ضریب تصحیح برای اعمال تغییرمکانهای غیر ارتجاعی سیستم، ضریب C_2 نیز ضریب تصحیح به منظور اعمال اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌ای بر تغییرمکانها به دلیل رفتار غیرارتجاعی آنها، ضریب C_3 ضریب تصحیح به منظور اعمال اثرات $P-\Delta$ با رفتار غیرخطی مصالح و S_a، ضریب شتاب طیفی و T_e، زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان است.

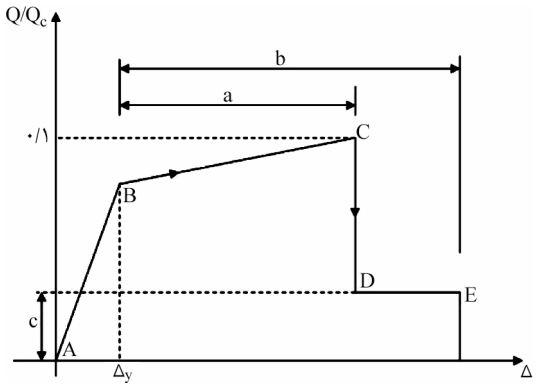
در این تحقیق، با توجه به خصوصیات سازه‌های مورد مطالعه و توصیه‌های دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، برای هریک از سازه‌ها، دو نوع الگوی بار جانبی در نظر گرفته شده است. توزیع بار جانبی مطابق الگوی نوع اول، بر اساس تعریف دستورالعمل بهسازی

لرزه‌ای ساختمانهای موجود، متناسب با توزیع بار جانبی در روش استاتیکی خطی و توزیع بار جانبی مطابق با الگوی نوع دوم متناظر با توزیع یکنواخت که در آن بار جانبی متناسب با وزن هر طبقه اعمال می‌شود، فرض شده است.

براساس محاسبات انجام گرفته برای سازه‌های مورد مطالعه، نتایج تغییرمکان هدف نسبی[1] در توزیع بارهای اعمال شده به طور متوسط برای ساختمانهای سه، پنج و هفت طبقه به ترتیب در جهت X، برابر ۰/۰۲۲، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۱ و در جهت Y، برابر ۰/۰۲۳ ، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۳ حاصل گردیده است.

۴-۲- منحنی رفتاری اعضاء

در روند مدلسازی و آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه‌های مورد مطالعه، رفتار غیرخطی اعضای لرزه‌بر مورد توجه قرار گرفته است. در این فرآیند معرفی رفتار غیرخطی اعضای لرزه‌ای در نرم‌افزار، بر اساس مشخصات اعضاء و ضوابط عنوان شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای و مطابق شکل (۳) است.



شکل (۳): *منحنی رفتاری عضو [۱۰].*

در شکل (۳)، محور افقی نمایانگر تغییرشکل عضو و محور قائم معرف نسبت تلاش مورد نظر است. در این شکل، Q_c معرف مقاومت عضو و Q بیانگر مقدار نیروی نیاز اعمال شده به علت زلزله می‌باشد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است رفتار عضو تا مرحلهٔ تسلیم، نقطهٔ B در شکل، به صورت خطی می‌باشد، که پس از مرحلهٔ تسلیم نمودار با کاهش سختی (با امکان ایجاد سخت‌شدگی کرنشی) تا نقطه C، ادامه می‌یابد و با افت مقاومت، به نقطه D می‌رسد و تا نقطه E ثابت می‌ماند. نهایتاً در این نقطه مقاومت به صفر کاهش می‌یابد.

در این منحنی، تغییرشکلها مستقیماً بر اساس پارامترهایی مانند کرنش، انحناء، دوران و یا تغییر طول محوری عضو بیان می‌شوند. پارامترهای a و b دلالت بر تغییرشکلهای پس از تسلیم عضو دارد، یعنی تغییرشکلهای پلاستیک [۱۰].

در معرفی مشخصات منحنی رفتاری اعضاء در روند مدلسازی سازه‌های مورد مطالعه، مقادیر مربوط به پارامترهای a، b و c بر اساس مقادیر پیشنهادی در جداول مربوطه در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود انتخاب شده است.

۴-۳- تعیین پارامترهای شکل‌پذیری اعضاء

در این پژوهش، تغییرشکل اعضاء بر اساس سه پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است: نسبت تغییرشکل محتمل اعضاء تحت بار جانبی، تغییرشکل پذیرش عضو در سطح عملکرد ایمنی جانی و مقدار متناظر آن در روش خطی[2] مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود.

تعیین تغییرشکل محتمل اعضاء تحت بار جانبی، بر اساس نتایج تحلیل مدل غیرخطی سازه در نرم‌افزار بوده است. در این فرآیند تغییرشکل ایجاد شده در هر یک از اعضاء تحت بار جانبی اعمالی مورد توجه قرار گرفته است.

تغییرشکل پذیرش هر یک از اعضاء در سطح عملکرد ایمنی جانی در روش خطی نیز با توجه به مشخصات عضو، جداول و ضوابط موجود در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران تعیین گردیده است.

در محاسبهٔ تغییرشکل پذیرش اعضای نمونه‌های مورد مطالعه، ضریب m که به عنوان معیار پذیرش اعضای کنترل‌شونده توسط تغییرشکل در تحلیلهای خطی در طراحی بر اساس عملکرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، ملاک عمل قرار گرفته است. این ضریب با توجه به تعریف عنوان شده در دستورالعمل *FEMA356* به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

۱. تعیین تغییرشکل متناظر با سطح پذیرش عضو که در اعضای اصلی و در سطح عملکرد ایمنی جانی، برابر ۰/۷۵ تغییرشکل متناظر نقطهٔ C در منحنی رفتاری عضو است، شکل (۳).

۲. تعیین نسبت تغییرشکل به‌دست آمده در مرحلهٔ ۱ به تغییرشکل متناظر با جاری شدن عضو (Δ_y).

۳. با ضرب نسبت به دست آمده در مرحلهٔ دو در ضریب ۰/۷۵ مقدار m حاصل می‌گردد.

با توجه به آن که در این قسمت از تحقیق تغییرشکل تیرهای سازه مد نظر بوده است (از آنجا که با توجه به مشخصات ستونهای سازه، این اعضاء کنترل‌شونده توسط نیرو بوده‌اند)، در تعیین ضریب m این اعضا، لنگر جاری شدن عضو (M_y) و تغییرشکل متناظر با آن (θ_y) محاسبه گردیده است. محاسبهٔ این دو پارامتر با توجه به مشخصات مقاطع تیرها و بر اساس مبانی طراحی سازه‌های بتنی و ضوابط آیین‌نامهٔ آبا بوده است. در ادامه، روابط کلی تعیین M_y و θ_y به همراه نمونه‌ای از محاسبات ارائه شده است.

با استفاده از روابط همسازی در مقطع بتنی و شکل (۴) خواهیم داشت:

$$M_y = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} f_c b\bar{y}\right)\left(d - \frac{\bar{y}}{3}\right) + A'_s f'_{sc}(d - d') \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

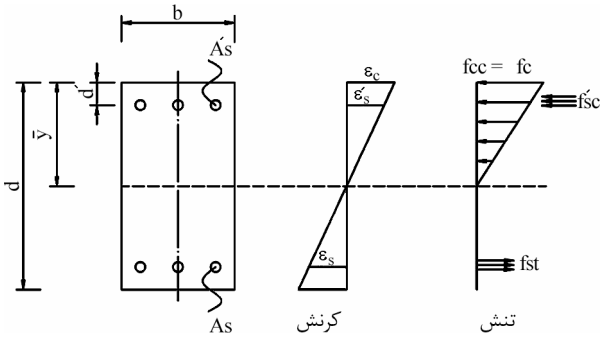
$$f'_{sc} = \varepsilon'_s E_s$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_c \frac{\bar{y} - d'}{\bar{y}}$$

$$\bar{y} = Kd \qquad (۳)$$

$$K = \sqrt{(\rho + \rho')^2 n + 2(\rho + \rho' \frac{d'}{d})n} - (\rho + \rho')n$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$



شکل (۴): *منحنی شماتیک از تنش، کرنش در حد جاری شدن عضو.*

$b, \bar{y}$: به ترتیب عرض مقطع و فاصلهٔ تار خنثی

d', d : به ترتیب فاصلهٔ آرماتورهای کششی و فشاری

A_s, A'_s : به ترتیب آرماتورهای کششی و فشاری مقطع

f_{st}, f'_{sc} : به ترتیب تنش در آرماتورهای کششی و فشاری مقطع

f'_c : مقاومت فشاری مشخصهٔ بتن

$\varepsilon_s, \varepsilon'_s$: به ترتیب کرنش در آرماتورهای کششی و فشاری مقطع

ε_c: کرنش در بتن مقطع

E_c, E_s : به ترتیب مدول الاستیته در بتن و فولاد

ρ, ρ': به ترتیب نسبت آرماتورهای کششی و فشاری مقطع.

بر این اساس تغییرشکل متناظر با جاری شدن عضو (θ_y) را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه نمود:

$$\theta_y = \frac{M_y}{6(EI)_{cr}/L} \qquad (۴)$$

$(EI)_{cr}$: سختی خمشی مقطع در حالت ترک‌خورده که مطابق توصیهٔ آیین‌نامهٔ آبا و دستورالعمل بهسازی ایران برابر ۰/۳۵ سختی خمشی مقطع است.

L : طول تیر

در ادامه به عنوان نمونه محاسبات مربوط به M_y و θ_y تیر تیپ ۱ (تیر ۱) با طول ۶ متر از ساختمان پنج طبقهٔ مورد مطالعه ارائه می‌گردد، جدول (۸).

جدول (۸): *نمونه محاسبات M_y و θ_y (تیر ۱، از ساختمان پنج طبقه).*

نوع	f_c MPa	d میلیمتر	$y_{(bar)}$ میلیمتر	ε_c	E_c MPa	E_s MPa	f'_{sc} MPa
تیر ۱	۲۵	۴۱۰	۱۲۶	۰/۰۰۰۵	۲۳۸۷۵	۲۰۴۰۰۰	۷۳

نوع	M_y نیرو- میلیمتر	θ_y رادیان	θ_{LS} رادیان	m
تیر ۱	۲۰۲۴×۱۰^{۵}	۰/۰۰۶۳۸	۰/۰۱	۱/۹۳

در محاسبات فوق، مقدار θ_{LS}، بر اساس مشخصات مقطع و با توجه به مقادیر پیشنهادی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای محاسبه گردیده است.

۵- نتایج تحلیل سازه‌های مورد مطالعه

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی بر سازه‌های مورد مطالعه، منحنی رفتاری هر یک از سازه‌ها مشخص گردیده و بر این اساس ضرایب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری سازه و نیز ضریب رفتاری سازه تعیین گردیده است.

لازم به ذکر است در بررسی ضریب رفتار هر یک از سازه‌ها، میانگین مقادیر ضرایب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری به دست آمده در چهار نوع توزیع الگوی بار جانبی مطابق با تغییرمکان هدف محاسبه شده در هر یک از نمونه‌های مورد مطالعه، ارائه گردیده است. نتایج به دست آمده برای ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری در هر یک از سازه‌های مورد مطالعه، مطابق با جدول (۹) است.

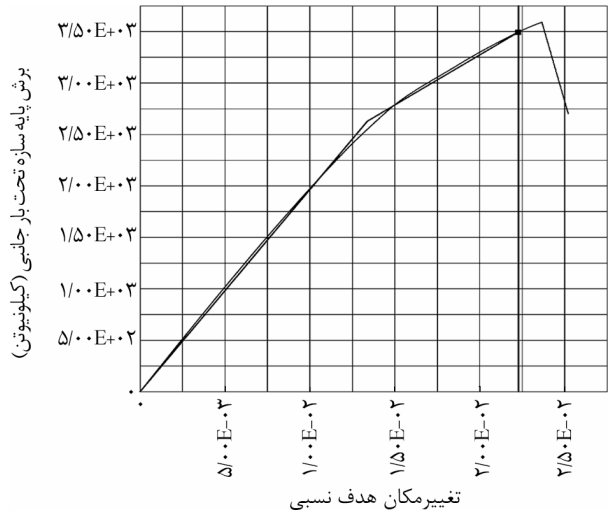
جدول(۹): *پارامترهای شکل‌پذیری در ساختمانهای مورد مطالعه.*

نمونه‌های مورد مطالعه	ضریب R (استاندارد ۲۸۰۰)	ضریب R_μ (آنالیز استاتیکی غیرخطی)
ساختمان بتنی سه طبقه	۷	۲/۵۱
ساختمان بتنی پنج طبقه	۷	۲/۶۴
ساختمان بتنی هفت طبقه	۷	۲/۶۶

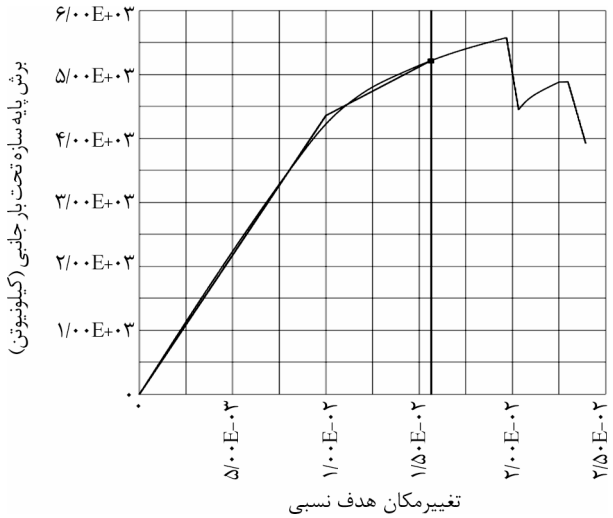
با توجه به نتایج به دست آمده مطابق جدول (۹)، می‌توان به طور میانگین ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری سازه را درحدود ۲/۶ در سازه‌های بتنی مورد مطالعه با سیستم قاب خمشی متوسط در نظر گرفت. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش ارتفاع سازه مقدار این ضریب افزایش یافته است.

در ادامه، به عنوان نمونه برای هر یک از سازه‌های مورد مطالعه، منحنی نیرو- تغییرمکان سازه تحت الگوی بار جانبی نوع اول در جهت X، حاصل از نتایج آنالیز استاتیکی غیرخطی سازه و بر اساس تغییرمکان هدف محاسبه شده ارائه گردیده است، شکلهای (۵) تا (۷).

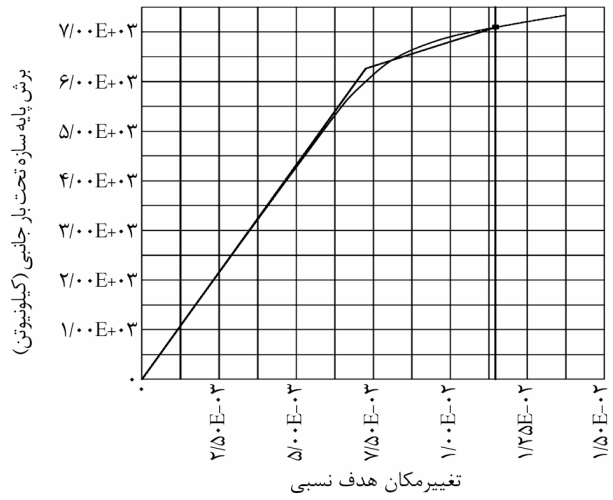
لازم به ذکر است که در منحنی‌های نمایش داده شده، محور افقی نمایشگر تغییرمکان هدف نسبی و محور قائم نمایانگر برش پایهٔ سازه تحت بار جانبی است.



شکل (۵): *منحنی رفتاری ساختمان سه طبقه تحت الگوی بار نوع اول، جهت X.*



شکل (۶): *منحنی رفتاری ساختمان پنج طبقه تحت الگوی بار نوع اول، جهت X.*



شکل (۷): *منحنی رفتاری ساختمان هفت طبقه تحت الگوی بار نوع اول، جهت X.*

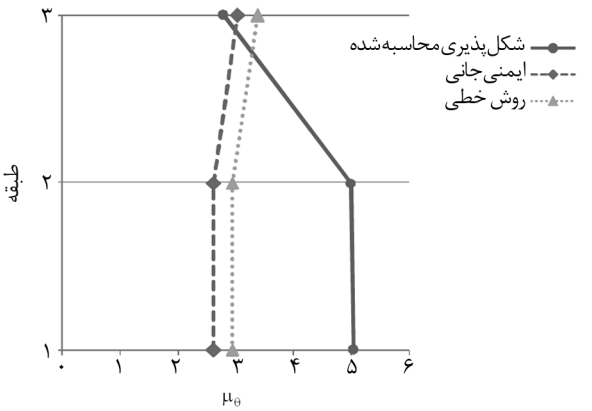
به‌منظور تعیین شکل‌پذیری اعضاء، کلیهٔ اعضای سازه‌های مورد مطالعه در هر یک از توزیع بارهای جانبی مورد بررسی قرار گرفتند. بر این اساس و با توجه به نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی نرم‌افزار، تغییرشکل هر یک از اعضاء تعیین گردیده و با محاسبهٔ لنگر جاری شدن عضو (M_y) و تغییرشکل متناظر با آن (θ_y)، ضریب شکل‌پذیری عضو و مقدار متناظر برای ضریب شکل‌پذیری اعضاء در سطح ایمنی جانی بر اساس مقادیر عنوان شده در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود در این سطح عملکرد محاسبه گردیده است.

در تعیین تغییرشکل هریک از اعضاء، با استفاده از نرم‌افزار *Perform-3D*، وضعیت یک به یک اعضاء تحت اعمال بار جانبی در تغییرمکان هدف مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است در ادامه ضریب شکل‌پذیری عضو برای تیرهای موجود در سازه‌های مورد مطالعه ارائه شده است، در حالی که ستونهای این سازه‌ها (با توجه به جزئیات این اعضاء) کنترل‌شونده توسط نیرو بوده و در آنها تغییرشکلهای غیرارتجاعی تحت بار زلزله ایجاد نشده است.

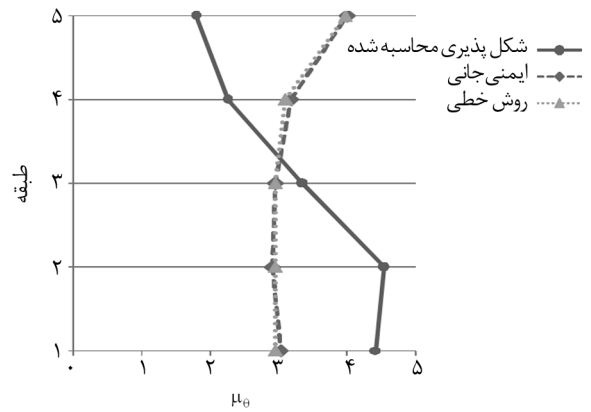
بر اساس نتایج به‌دست آمده برای تغییرشکل ایجاد شده در تیرها در هر یک از توزیع بارهای جانبی، میانگین تغییرشکل تیرهای طبقات تعیین و به عنوان تغییرشکل متوسط اعضای طبقه عنوان شده است. این پارامتر با عنوان "*Computed Ductility*" در نمودارهایی که در ادامه ارائه گردیده، نشان داده شده است.

همچنین در هر یک از اعضاء، تغییرشکل پذیرش عضو در سطح عملکرد ایمنی جانی[۳] و همچنین مقدار متناظر آن در روش خطی بر اساس ضوابط دستورالعمل بهسازی ساختمانهای موجود محاسبه گردیده و با مقدار تغییرشکل اعضاء مقایسه شده است. نتایج بررسیهای انجام گرفته در هر یک از ساختمانهای مورد مطالعه در شکلهای (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است.

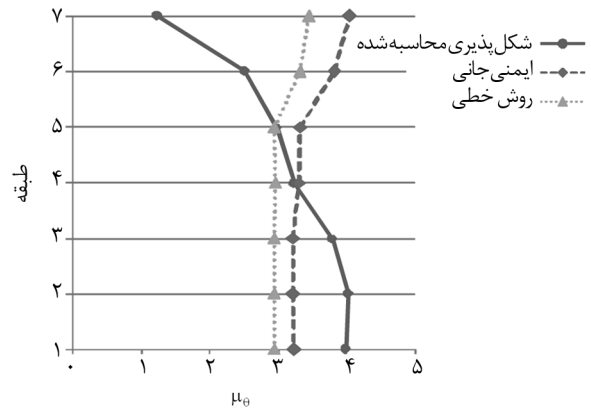
این نمودارها نشان می‌هد که وضعیت رفتاری اعضاء در ساختمان سه طبقه، با توجه به شکل (۸) چنان است که تغییرشکل ایجاد شده در تیرها (برای توزیع کلیهٔ بارهای جانبی) بین مقادیر ۲/۵ تا حدود ۵ متغیر است که



شکل(۸): *تغییرشکل اعضاء و ضرایب پذیرش متناظر در ساختمان سه طبقه.*



شکل(۹): *تغییرشکل اعضاء و ضرایب پذیرش متناظر در ساختمان پنج طبقه.*



شکل(۱۰): *تغییرشکل اعضاء و ضرایب پذیرش متناظر در ساختمان هفت طبقه.*

تغییرشکل ایجاد شده در طبقهٔ آخر به حداقل این مقدار تقلیل یافته است. همان‌طور که از این شکلها مشخص است مقدار تغییرشکل مجاز محاسبه شده برای تیرها در سطح عملکرد

ایمنی جانی تا حدود زیادی به مقدار محاسبه شده برای ضریب پذیرش شکل‌پذیری (m) تیرها نزدیک می‌باشد. این نسبت برای کلیهٔ طبقات در حدود ۲/۸ تا ۳/۵ می‌باشد. با توجه به این مقادیر مجاز، مشخص است که به‌جز طبقهٔ آخر این سازه که وضعیت مناسبی دارا می‌باشد، تغییرشکل تیرهای سایر طبقات از مقدار مجاز در سطح ایمنی جانی فراتر رفته و تا حدود ۱/۵ برابر مقدار مجاز، تغییرشکل داده است.

ارزیابی لرزه‌ای ساختمان پنج طبقه مطابق شکل (۹) نشان می‌دهد که تغییرشکل ایجاد شده در تیرها در کلیهٔ توزیع بارها تا حدود ۵ افزایش یافته است که حداکثر تغییرشکلهای ایجاد شده مربوط به تیرهای طبقات اول و دوم بوده و پس از این طبقات تغییرشکل ایجاد شده سیر نزولی داشته است. تا آنجا که در دو طبقهٔ آخر در کلیهٔ توزیع بارها، مقدار تغییرشکل ایجاد شده از مقادیر مجاز خود در سطح عملکرد ایمنی جانی کمتر بوده است. مقادیر تغییرشکلهای محاسبه شده برای تیرها در سطح عملکرد ایمنی جانی و نیز ضریب پذیرش شکل‌پذیری (m) تیرها نشاندهندهٔ انطباق مناسب این ضرایب در این ارزیابی می‌باشد.

بررسیهای صورت گرفته در خصوص شکل‌پذیری اعضاء در ساختمان هفت طبقه، مطابق شکل (۱۰)، نشان داده است که در این سازه، تغییرشکل‌حداکثر ایجاد شده تحت بار جانبی در تیرهای طبقات اول و دوم رخ داده است که این مقدار به حدود ۴/۵ برای تیرهای موجود در این طبقات رسیده است و حداقل تغییرشکل ایجاد شده مربوط به تیرهای دو طبقهٔ آخر است. بررسیهای مربوط به تغییرشکلهای محاسبه شده برای تیرها در سطح عملکرد ایمنی جانی و نیز ضریب پذیرش شکل‌پذیری (m) تیرها نیز مبین اختلاف ناچیز این مقادیر در این ارزیابی می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده مطابق نمودارهای تغییرشکل تیرها، مشخص است که در ساختمانهای با زمان تناوب بالاتر، حداکثر تغییرشکل ایجاد شده تحت بار جانبی در طبقات پایین رخ می‌دهد و در طبقات بالا تغییرشکل مورد نیاز کاهش می‌یابد.

بر این اساس و به‌منظور دستیابی به طرح مناسب و اقتصادی برای ساختمانهای مورد مطالعه می‌توان گفت طراحی بایستی به گونه‌ای باشد که اعضای طبقات پایینتر شکل‌پذیری بیشتری داشته باشند و طرح اعضای طبقات بالا تا تأمین مقاومت موردنیاز و در نظرگیری مقدار شکل‌پذیری پایین، کفایت کند. این موضوع با توجه به مقادیر ضرایب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری برای هر یک از سازه‌های مورد مطالعه مشخص می‌کند که تأمین شکل‌پذیری اعضاء تا حدود دو برابر مقدار شکل‌پذیری کلی سازه برای طبقات پایین و برابر با مقدار شکل‌پذیری در طبقات بالا انجام گیرد. این موضوع با تعیین جزئیات اعضاء با توجه به شکل‌پذیری مورد نیاز امکانپذیر است.

۶- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه‌های مورد مطالعه، به طور متوسط ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری سازه برای سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط، در ساختمانهای مورد مطالعه، برابر ۲/۶ به دست آمده است. با در نظرگیری ضریب تنش مجاز برابر ۱/۴ و مقدار حدود ۲ برای ضریب اضافه مقاومت در سازه‌های با سیستم قاب خمشی متوسط (با توجه به نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط طاهری بهبهانی در این زمینه [۱])، ضریب کاهش نیرو برای این سیستم سازه‌ای برابر ۷/۳ حاصل خواهد شد. حال آن که مقدار پیشنهاد شده برای این ضریب در استاندارد ۲۸۰۰، برابر ۷ می‌باشد که این موضوع مبین تا حدودی دست‌بالا بودن مقدار این ضریب برای این نوع سیستم سازه‌ای با زمان تناوب پایین تا متوسط در آیین‌نامهٔ طراحی لرزه‌ای می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده برای ضریب شکل‌پذیری اعضاء (مطابق با نمودارهای ارائه شده در بخش ۵ این مقاله) و مقایسه با ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری کل سازه، می‌توان نتیجه گرفت به‌منظور تأمین مقدار شکل‌پذیری متناظر با این ضریب و نیز دستیابی به طرحی اقتصادی، لازم است جزئیات اجزاء به‌گونه‌ای باشد که شکل‌پذیری متناظر برای تیرهای طبقات پایین تا حدود دو برابر مقدار ضریب $R\mu$، عملکرد مورد نظر را تأمین کند و در خصوص تیرهای طبقات بالا شکل‌پذیری تا حدود مقدار ضریب $R\mu$

برای عملکرد انتخاب شده، برآورده گردد.

از طرف دیگر نتایج بررسی معیارهای پذیرش ضریب شکل‌پذیری عضو در روش خطی (ضریب m) و مقدار متناظر آن در روش غیرخطی، برای سازه‌های مورد مطالعه (مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش ۵)، مبین انطباق مناسب این دو ضریب در سطح عملکرد موردنظر می‌باشد. بر این اساس و به منظور کنترل شکل‌پذیری اعضاء در مقایسه با ضریب $R\mu$ (مطابق با پیشنهاد فوق) ضریب m در سطح عملکرد انتخابی، معیار مناسبی برای کنترل شکل‌پذیری عضو می‌باشد. به این معنی که، به عنوان مثال برای دستیابی به شکل‌پذیری عضو برابر ضریب $R\mu$ بایستی جزئیات عضو را به‌گونه‌ای تعیین نمود که ضریب m عضو، مطابق ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، برابر ضریب $R\mu$ شود. این امر با توجه به ضوابط موجود برای ساختماهای بتنی، وابسته به میزان آرماتورگذاری در مقطع (نسبت $\frac{\rho-\rho'}{\rho_b}$) و میزان محصورشدگی در اعضاء می‌باشد. به این ترتیب با طراحی مناسب جزئیات اعضاء باتوجه به ضریب m موردنظر می‌توان شکل‌پذیری مورد نیاز سازه در هنگام زلزله را تأمین نمود.

در نهایت، با توجه به نتایج این تحقیق توصیه می‌شود در آیین‌نامهٔ طراحی لرزه‌ای، مقادیر ضریب کاهش نیروی زلزله برحسب مقادیر ضرایب $R\mu$، Ω و Y عنوان گردیده و ضوابط لازم برای تأمین هریک از این پارامترها توصیه گردد. در این خصوص در تأمین شکل‌پذیری سازه برای دستیابی به ضریب R موردنظر بر اساس سیستم باربر جانبی سازه، می‌توان ضریب شکل‌پذیری اعضاء (m) را بر اساس ضریب شکل‌پذیری کل سازه، $R\mu$، مشخص و جزئیات اجرایی و ضوابط طراحی مربوطه را ارائه نمود.

۷- مراجع

۱. طاهری بهبهانی، علی‌اصغر (۱۳۷۵). نگرشی *فلسفی* به *ضوابط محاسباتی ساختمانها در برابر زلزله*، تهران، کمیتهٔ علمی انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

2. Kunnath, S.K., Lew, H.S., and Friis, D. (2002). "Global response modification factors VS. member ductility-based modifiers", *Proceedings of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.

3. Miranda, E. (1997). Strength reduction factors in performance-based design, *National Information Service for Earthquake Engineering*, 1-9.

4. Repapis, C., Vintzileou, E., and Zeris, C. (2006). Evaluation of the seismic performance of existing RC buildings: I. Suggested methodology, *Earthquake Engineering*, 265-287.

5. Gioncu, V. (2000). Framed structures, ductility and seismic response, general report, Constructional Steel Research, 125-154.

۶. آیین‌نامهٔ بارهای وارد بر ساختمان (۱۳۸۰). مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.

۷. آیین‌نامهٔ طرح ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ایران (۱۳۸۴). مرکز تحقیقات و مسکن وزارت مسکن و شهرسازی، ویرایش سوم.

۸. آیین‌نامهٔ بتن ایران (آبا) (۱۳۸۲). نشریهٔ شمارهٔ ۱۲۰، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ویرایش سوم.

۹. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (۱۳۸۵). نشریهٔ شمارهٔ ۳۶۰، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

10. ATC-40 (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council.

۸- پانوشت

۱- *Reference Drift*
۲- *M-factor (LS)*
۳- *Acc. Criteria (LS)*