



بررسی ضریب رفتار سازه‌های فولادی با سیستم مهاربندی خرپای متناوب (Straggered Truss System)

حامد صفاری^۱، وحید وحدتی‌زاده^۲، سعید علیزاده تقی‌آباد^۳

۱-دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

پست الکترونیکی: vahdati@graduate.uk.ac.ir

خلاصه

سیستم سازه با خرپای متناوب (Straggered Truss System) یکی از انواع سیستم‌های مهاربندی جانبی در سازه‌های فولادی محسوب می‌گردد. در این سیستم در یک طبقه دهانه مهاربندی در یک ردیف ستون قرار گرفته که این ردیف در ارتفاع به صورت یک در میان (متناوب) اجرا می‌شود و در طبقات دیگر، دهانه مهاربندی به ردیف ستون دیگر منتقل می‌شود. به دلیل فاصله زیاد بین ستون‌ها، که باعث ایجاد فضای معماری بیشتر می‌شود و نیز به لحاظ اقتصادی بودن در ساختمان‌های بلند، این سیستم نسبت به سایر سیستم‌ها مورد توجه خاص محققین قرار گرفته است. این سازه‌ها باید توانایی تغییر شکلهای حاصل از نیروهای جانبی زلزله را داشته باشد و این توانایی تحت پارامتری به عنوان شکل‌پذیری تامین می‌شود. جهت دخالت دادن شکل‌پذیری در طراحی سازه‌ها و استفاده از تمامی ظرفیت سازه‌ها، از ضریب رفتار برای کاهش مقادیر نیروهای واقعی زلزله استفاده می‌گردد. برای بررسی شکل‌پذیری سازه‌ها نیاز به آنالیز غیر الاستیک است که اساس آن را آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی تشکیل می‌دهد. این آنالیز برای کاربردهای عملی پیچیده و وقت گیر بوده لذا از روش استاتیکی غیرخطی استفاده می‌شود. در این مقاله به بررسی و بدست آوردن ضریب رفتار سیستم سازه‌های خرپای متناوب با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی با نیروهای فزاینده (Pushover) پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم خرپای متناوب، تحلیل غیرخطی، ضریب رفتار، شکل‌پذیری

مقدمه

هدف اصلی طراحی لرزه‌ای ساختمانها بر این مبناست که رفتار ساختمان، در مقابل نیروهای ناشی از زلزله‌های کوچک بدون خسارت و در محدوده خطی مانده و در مقابل نیروهای ناشی از زلزله‌های شدید، ضمن حفظ پایداری کلی خود خسارتهای سازه‌ای و غیر سازه‌ای را تحمل کند. به همین دلیل مقاومت لرزه‌ای که مورد نظر آئین‌نامه‌های طراحی در برابر زلزله است عموماً کمتر و در برخی موارد، خیلی کمتر از مقاومت جانبی مورد نیاز برای حفظ پایداری سازه در محدوده ارتجاعی در یک زلزله شدید است. بنابراین رفتار سازه‌ها به هنگام رخداد زلزله‌های متوسط و بزرگ وارد محدوده غیر ارتجاعی می‌گردد و برای طراحی آنها نیاز به یک تحلیل غیر ارتجاعی است. کاهش مقاومت سازه از مقاومت ارتجاعی مورد نیاز عموماً با استفاده از ضرائب کاهش مقاومت (ضریب رفتار) انجام می‌شود.

امروزه تعریفهای مختلفی جهت شکل‌پذیری و ضریب رفتار مطرح گردیده و روشهای بسیاری برای مطالعه، کنترل و بهینه کردن آن مطرح گردیده است. پوپوف [1] شکل‌پذیری یک قاب را بصورت نسبت تغییر مکان حداکثر به تغییر مکان تسلیم در بالاترین نقطه سازه تعریف کرده و برای بدست آوردن آن یک بارگذاری دوره‌ای افقی را فقط به طبقه آخر وارد کرده است. این روش توزیع واقعی نیروی زلزله را در نظر نمی‌گیرد، لذا شاخص مناسبی برای تعریف شکل‌پذیری کلی سازه نیست. میراندا و برترو [2] پیشنهاد می‌کنند که بهتر است رابطه‌ای بین شکل‌پذیری کلی سازه و شکل‌پذیری طبقات تعریف گردد. بنظر آنها این رابطه تابعی از توزیع تغییر شکل الاستیک در سازه (مکانیزم خرابی) و خصوصیات زمین لرزه است. در انتخاب سیستم سازه-ای پارامترهای مختلفی از جمله ملاحظات معماری، اقتصادی نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کنند که خود در تأمین شکل‌پذیری و مقاومت مؤثر می‌باشند،

^۱ دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه عمران

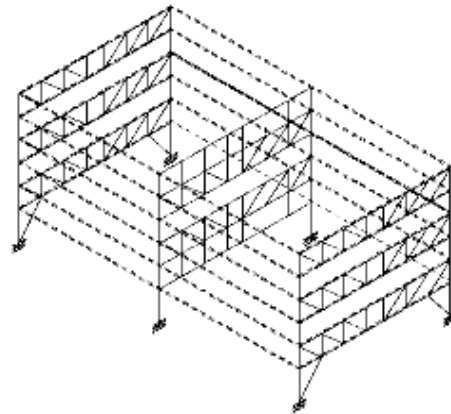
^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه عمران



بدین سبب بررسی عملکرد سیستمهای جدید لرزه بر ضروری بنظر می‌رسد. پذیرش هرگونه سیستم سازه‌ای جدید توسط آئین‌نامه، پس از انجام آزمایشهای مختلف و تحلیل دقیق توسط محققین صورت می‌گیرد. یکی از این سیستمهای سازه‌ای سیستم خرپای متناوب است که اعضاء باربر جانبی در یک جهت آن، خرپاها هستند. نقش و وظیفه خرپا و انواع حالات و ترکیبات خرپاهای مورد استفاده توسط اسکالزی [3] و یانگ‌جیان [4] تشریح شده و به نکات لازم برای اجرا اشاره نموده‌اند. تحقیقاتی درباره عملکرد لرزه‌ای با اعمال نیروی زلزله بر روی مدل مکانیکی و معرفی اصول پایه برای تحلیل الاستو پلاستیک بمنظور ارزیابی و تخمین ظرفیت لرزه‌ای سازه با سیستم خرپای متناوب در مراجع [5] و [6] انجام گرفته است. همچنین در مرجع [7] به تحلیل ویژگیها و خصوصیات معماری این سیستم می‌پردازد و نکات ویژه‌ای در رابطه با طراحی ستونها، کف و خرپاها پیشنهاد می‌شود و در رابطه با سختی برشی جانبی بحث شده است. از نظر اجرایی با بررسی پروژه‌های ساخته شده توسط لیفلر [7]، پولاک [8] و کوهن [9] استفاده از این سیستم در بسیاری از موارد برای سازه‌های بلند به لحاظ اقتصادی گزینه بسیار مناسبی خواهد بود. همچنین با توجه به مطالعات انجام گرفته، سیستم از لحاظ مقاومت در برابر بارهای جانبی بررسی شده و چگونگی انتقال نیروهای زلزله مشخص شده است.

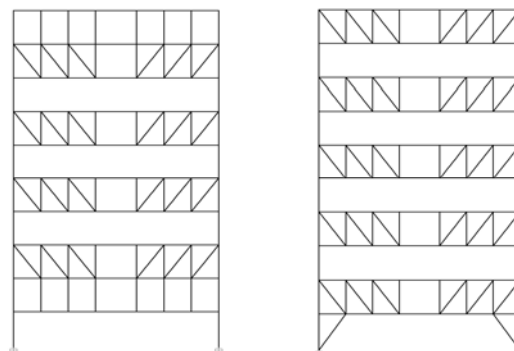
سیستم خرپای متناوب

سیستم خرپای متناوب یک ایده جدید در سازه‌های فلزی مخصوصاً ساختمانهای بلند می‌باشد. این سیستم شامل یک سری خرپاهایی می‌باشد که بین دو ردیف ستونهای خارجی در تمامی دهانه و ارتفاع طبقه مطابق شکل ۱- قرار می‌گیرد.



شکل ۱- سیستم خرپای متناوب

این سیستم اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط محققین دانشگاه M.I.T. بوجود آمد و به این گونه است که سازه در جهت طولی پلان از سیستم قاب خمشی و در جهت عرضی از سیستم مهاربندی خرپایی کمک می‌گیرد [10]. نحوه اجرا به این صورت است که در یک قاب، یک طبقه در طول کل دهانه بادبندی می‌شود. یعنی برای ارتفاع یک طبقه در طول کل دهانه سیستم مثل یک خرپا عمل می‌کند. این سیستم خرپایی در کل ارتفاع قاب به صورت یک در میان (متناوب) اجرا می‌شود (شکل-۲). به عبارت دیگر یک طبقه دارای سیستم خرپایی است و در همان قاب و در طبقه دیگر هیچگونه مهاربندی وجود ندارد و این عمل در ارتفاع قاب بصورت متناوب قابل اجراء است.



شکل ۲- دو قاب متوالی از یک سیستم مجهز به خرپای متناوب



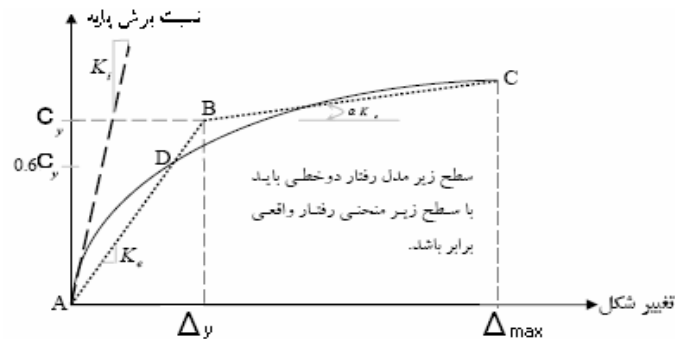
از مزایای سیستم خرابی متناوب می‌توان به این موارد اشاره کرد: کم بودن ستونها و فاصله زیاد بین آنها، افزایش انعطاف پذیری طراحی در اثر کمتر بودن ستونها، سرعت زیاد اجرا بدون توجه به شرایط آب و هوایی، استفاده از سیستم کف پیش ساخته توخالی، کم بودن ارتفاع کف تا کف، افزایش زمان برای اطفاء حریق بدلیل فاصله زیاد ستونها در جهت عرضی و خرابها در جهت طولی ساختمان و اقتصادی بودن این سیستم نسبت به سایر سیستمها برای ساختمانهای ۱۵ تا ۲۰ طبقه [11]. همچنین طراحی این سیستم نسبت به سایر سازه های فلزی ساده تر می‌باشد زیرا طراحی سازه ای کمتری دارد چون تنوع المان سازه ای در آن کمتر است، جزئیات طراحی و اجراء اتصالات بسیار ساده هستند و مراحل اجرا تکراری است [12].

ایده اصلی در مورد این سیستم به این گونه است که تمامی سیستم همانند یک تیر طره در موقع اعمال بار جانبی رفتار می کند. به عبارتی می توان اینگونه توصیف کرد که ستونهای موجود در دیوار خارجی همانند بالهای این تیر و خرابهایی که بین ستونها قرار گرفته‌اند مانند جان این تیر عمل می کنند. سیستم کف بین یال بالایی یک خرپا و یال پایینی خرابی مجاور قرار می گیرد و همانند یک دیافراگم عمل می کند و نیروهای برشی جانبی را از یک ستون به ستون دیگر منتقل می کند. همچنین سازه را قادر می سازد که مانند یک قاب ساده مهاربندی عمل کند در حالی که خرابها در دو صفحه موازی قرار گرفته‌اند. عمل تیر طره ای خرابی دو وجهی در اثر بارهای جانبی باعث کاهش لنگرهای خمشی در ستونها می شود. که این کاهش لنگر به علت اتصالات یال خرپا است. البته این نکته حائز اهمیت است که باید محور قوی مقطع ستون در جهت طولی ساختمان قرار گیرد [3].

برای محاسبه و طراحی سازه با سیستم خرابی متناوب بمنظور روشن شدن رفتار دقیق و اطمینان از رفتار واقعی آن احتیاج به آنالیزهای غیرخطی خواهد بود که برای کاربردهای عملی پیچیده، زمان گیر و با هزینه زیاد همراه خواهد بود. همچنین بدلیل نبود مقدار ضریب رفتار طبق آئین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) این پژوهش به تعیین مقدار ضریب رفتار (R) این سیستم می پردازد.

ضریب رفتار (R)

آئین نامه های طراحی لرزه ای کنونی، نیروهای لرزه ای برای طراحی ارتجاعی ساختمان را از یک طیف خطی که وابسته به زمان تناوب طبیعی ساختمان و شرایط خاک محل احداث ساختمان است، بدست می آورند و برای ملحوظ کردن اثر رفتار غیرارتجاعی و اتلاف انرژی بر اثر رفتار هیستریزس، میرایی و اثر مقاومت افزون سازه، این نیروی ارتجاعی را به وسیله ضریب کاهش مقاومت (ضریب رفتار) به نیروی طراحی تبدیل می کنند.



شکل ۳- رفتار کلی سازه

با توجه به شکل ۳ مقدار مقاومت الاستیک مورد نیاز برحسب ضریب پایه (CeU) عبارتست از:

$$C_{eu} = \frac{V_e}{W} \quad (1)$$

وزن سازه و حداکثر برش پایه در صورتی که سازه کاملاً در محدوده الاستیک باقی بماند. از آنجا که یک سازه که بصورت صحیح طراحی شده، معمولاً مقادیر قابل ملاحظه ای از شکل پذیری را می تواند تأمین کند، سازه می تواند بصورت اقتصادی تری طراحی شود تا حداکثر مقاومت $C_y W$ را تأمین کند. برای اهداف طراحی، آئین نامه ها مقدار C_y را تا مقدار C_S کاهش می دهند که نمایانگر تشکیل اولین مفصل پلاستیک در مجموعه سازه می باشد. در طراحی با استفاده از روش بارنهایی در سازه های بتنی و روش ضرائب بار و مقاومت در سازه های فولادی از این تراز نیرویی استفاده می شود. اختلاف نیروی بین $C_y W$ و $C_S W$ را اصطلاحاً اضافه مقاومت می نامند. از آنجا که در آئین نامه های طراحی سازه های فولادی و بتنی در بسیاری از کشورها هنوز استفاده از روش تنش مجاز متداول است، آئین نامه ۲۸۰۰ ایران مقدار C_S را به C_W کاهش می دهد و لذا نیروی برشی پایه طراحی در این آئین نامه ها برابر $C_W W$ می باشد [14].

ضریب شکل پذیری کلی سازه (μ_s)

با ایده آل نمودن منحنی رفتار کلی به منحنی الاستیک-پلاستیک کامل در شکل ۳ ضریب شکل پذیری کلی سازه را می توان بصورت زیر بیان کرد:



$$\mu_s = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (2)$$

ضریب کاهش مقاومت در اثر شکل پذیری ($R\mu$) در اثر شکل پذیری، ساختمان ظرفیتی برای استهلاک انرژی خواهد داشت. بدلیل این ظرفیت استهلاک انرژی نیروی طراحی الاستیک (C_{eu}) را می-توان به تراز مقاومت تسلیم (C_y) کاهش داد:

$$R\mu = \frac{C_{eu}}{C_y} \quad (3)$$

توجه به این نکته ضروری است که تراز مقاومت تسلیم به تراز ایجاد مکانیزم گسیختگی در سازه و یا فرو ریزش سازه اطلاق می شود و نه به تراز اولین تسلیم در سازه.

ضریب اضافه مقاومت (Ω)

مقاومت ذخیره‌ای که بین تراز واقعی تسلیم سازه (C_y) و تراز اولین تسلیم (C_s) وجود دارد، برحسب ضریب اضافه مقاومت بیان می‌گردد:

$$\Omega = \frac{C_y}{C_s} \quad (4)$$

اضافه مقاومت سازه در نتیجه باز توزیع نیروهای داخلی، بیشتر بودن مقاومت واقعی مصالح نسبت به مقاومت اسمی، سخت شونده‌گی کرنشی، محدودیتهای آئین‌نامه‌ای در مورد تغییر مکان جانبی، اثرات اجزاء غیر سازه‌ای و غیره می‌باشد.

ضریب تنش مجاز (Y)

این ضریب برای در نظر گرفتن اختلاف در الگوی طراحی در آئین‌نامه‌های مختلف استفاده می‌شود. برای طراحی بر اساس تنش مجاز، تراز مربوط به نیروی طراحی (C_y) از تراز اولین تسلیم قابل توجه (C_s) بوسیله ضریب تنش مجاز کاهش می‌یابد:

$$Y = \frac{C_y}{C_s} \quad (5)$$

تعیین ضریب رفتار (R یا R_w)

با توجه به شکل ۳، ضریب رفتار مطابق با روش طراحی بر اساس مقاومت را می‌توان بصورت زیر تعیین کرد:

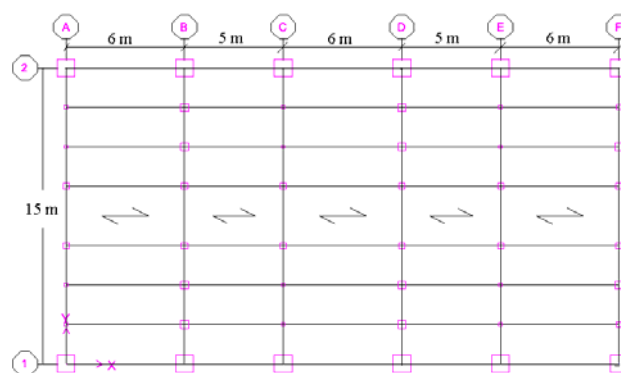
$$R = \frac{C_{eu}}{C_s} = \frac{C_{eu}}{C_y} \cdot \frac{C_y}{C_s} \quad (6)$$

و ضریب رفتار مطابق با روش طراحی بر اساس تنش مجاز (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) را می‌توان بصورت زیر تعیین کرد:

$$R_w = \frac{C_{eu}}{C_w} = \frac{C_{eu}}{C_y} \cdot \frac{C_y}{C_s} \cdot \frac{C_s}{C_w} = R\mu \cdot \Omega \cdot Y \quad (7)$$

مطالعات عددی

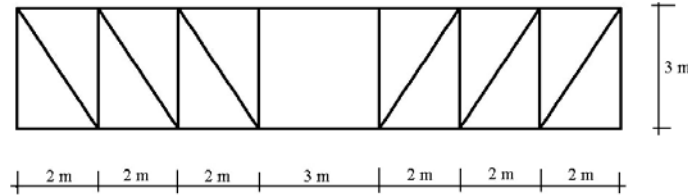
به منظور تعیین ضریب رفتار سازه خرابی متناوب سه ساختمان با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با پلان یکسان انتخاب گردید و مراحل مختلف ضریب رفتار برای آنها به اجرا درآمد که نتایج آنها در قسمتهای بعدی تشریح می‌گردد. پلان ساختمانهای مورد مطالعه مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است و تحلیل و طراحی آنها بصورت سه بعدی انجام گرفته است.



شکل ۴- پلان مشترک ساختمانها



در مدل‌های تعریف شده ارتفاع طبقه اول ۳/۲ متر و ارتفاع طبقات دیگر ۳ متر در نظر گرفته شده. در بارگذاری ثقلی نیز فرضیات زیر در نظر گرفته شده: بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار مرده ۴۸۰ کیلوگرم بر مترمربع. طول پانل ویراندل خرپا ۳ متر که در مرکز خرپا قرار گرفته است و در هر طرف آن سه پانل بادبندی شده که طول هر دهانه آن ۲ متر است که در مجموع طول دهانه در راستای خرپا ۱۵ متر می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵ - نمایی از خرپای یک طبقه

در طراحی ساختمانها از مقاطع I شکل برای تیرها و مقاطع Box برای اعضاء قائم و مورب استفاده شده است. تحلیل خطی و طراحی ساختمانهای مذکور مطابق آئین‌نامه AISC-ASD01 با نرم افزار ETABS و تحلیل استاتیکی غیر خطی به کمک نرم افزار SAP با اختصاص مفاصل پلاستیک بر اساس مدارک موجود در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانها [15] صورت گرفته است. رفتار تیر و ستونها با توجه به مقاطع بکار رفته در طراحی برای تعیین پارامترهای مدل سازی و معیارهای پذیرش در روش غیرخطی بصورت خمشی کنترل شونده حاکم شد و برای بادبند نیز مطابق ضوابط موجود، رفتار حاکم بر اساس نوع مقاطع بکار رفته مشخص گردید و به نرم افزار معرفی شدند.

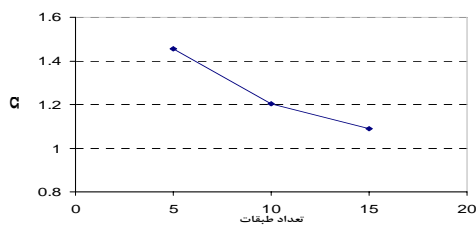
نتایج تحلیل‌ها

بمنظور بدست آوردن ضریب مقاومت افزون نیاز به محاسبه ضریب برش پایه در حالت تسلیم سازه و ضریب برش پایه در اولین مفصل پلاستیک ایجاد شده در سازه می‌باشد که این مقادیر از منحنی‌های پوش اور استخراج می‌شوند. البته برای استخراج باید منحنی‌های رفتار غیرخطی سازه به منحنی دو خطی تبدیل شوند. بدین صورت که یک خط در امتداد شیب اولیه منحنی و خط دیگری از نقطه حداکثر تغییر مکان در امتداد شیب قسمت نهایی منحنی ترسیم می‌گردد. مقادیر ضریب افزایش مقاومت برای ساختمانهای موجود در جدول ۱ ارائه شده است.

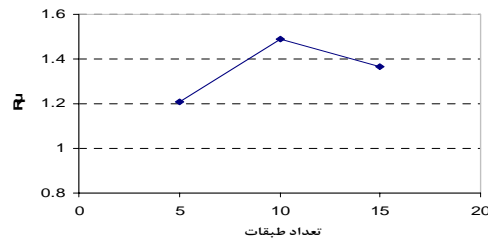
جدول ۱- مقادیر ضریب مقاومت افزون

قالب	۵ طبقه	۱۰ طبقه	۱۵ طبقه
Ω	۱/۴۵۶۶	۱/۲۰۵	۱/۰۸۹

اثر تعداد طبقات در ضریب افزایش مقاومت در شکل ۶ نشان داده شده است که با افزایش تعداد طبقات ساختمان کاهش می‌یابد که دلیل این کاهش، حاکم بودن نیروهای ثقلی در طراحی می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳) ضرایب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری برای تعداد طبقات مختلف محاسبه می‌شود که در شکل ۷ مقادیر R_{μ} برای سه ساختمان در یک نمودار آورده شده است.



شکل ۶- ضریب افزایش مقاومت افزون در مقابل تعداد طبقات



شکل ۷- ضرایب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری در مقابل تعداد طبقات

بمنظور تعیین ضریب رفتار روش طراحی باید مشخص گردد. از آنجا که در آئین‌نامه ایران روش طراحی بر اساس تنش‌های مجاز می‌باشد در جدول ۲ مقادیر ضرایب کاهش در اثر شکل‌پذیری و حاصل ضرب ضریب تنش مجاز در ضریب افزایش مقاومت حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی، ارائه می‌شود که با ضرب نمودن دو پارامتر مذکور ضریب رفتار R بدست می‌آید که برای سازه‌های مختلف در همین جدول ارائه شده‌اند.



جدول ۲- مقادیر ضریب رفتار

قالب	۵ طبقه	۱۰ طبقه	۱۵ طبقه
R_{μ}	۱/۲۰۸	۱/۴۹۱	۱/۳۶۷۴
$\Omega * Y$	۲/۴۹۲	۲/۰۶۲	۱/۸۶۳
R	۳/۰۱	۳/۰۷	۲/۵۵

نتیجه گیری

با توجه به نتایج عددی حاصل از تحلیل غیر خطی می توان به اهمیت قسمت ویراندل خرپا پی برد زیرا حضور بادبندها در پانلهای دیگر باعث تمرکز انرژی در پانل ویراندل می شود و این، منبع اولیه برای پراکندگی انرژی است. همچنین اولین مفاصل پلاستیک در تیرها و خرپاهای اطراف آن ایجاد می شوند و در نهایت با افزایش گامها در تحلیل پوش اور اولین نقاط گسیختگی در این المانها صورت می پذیرد. لذا طراحی طول دهانه ویراندل از اهمیت ویژه ای برخوردار است. همچنین اگر طراحی بر این اساس باشد که بادبندها در خرپا و اتصالاتشان تحت زلزله تسلیم نشوند، وجود آنها تأثیری در شکل پذیری سیستم نخواهد داشت.

با توجه به ضرائب رفتار محاسبه شده به مقدار میانگین ۲/۸۸ دست پیدا می کنیم که این عدد با ضریب رفتار معرفی شده در آئین نامه AISC که برای مناطق با خطر لرزه خیزی زیاد عدد ۳ را پیشنهاد می کند همخوانی دارد.

مراجع

1. Popov, E.P. (1986) On California structural steel seismic design. *Earthquake Spectra*, **2**, 1-19.
2. Miranda, E. and Bertero, V.V. (1994) Evaluation of strength reduction factors for earthquake resistance design. *Earthquake Spectra*, **10**, 357-379.
3. Scalzi, J.B. (1971) The staggered truss system-structural considerations. *AISC Engineering Journal*.
4. Yongjian, L. and Tao, F. (2004) Analysis and comparison of comprehensive performance of all kind of truss forms in staggered truss system. *China Engineering Construction Journal*.
5. Ying, P. and Xuhong, Z. (2002) A seismic behavior of the staggered truss system. *China Civil Engineering Journal*.
6. Lei, Y. and Tung, Y. (2007) Static elastic-plastic analysis of seismic performance of staggered truss steel frame system. *China Steel Construction Journal*.
7. Leffler, R.E. (1983) Calculation of wind drift in staggered truss buildings. *AISC Engineering Journal*.
8. Pollak, B.S. (2003) Staggered truss solution. *Modern Steel Construction*.
9. Cohen, M.P. (1986) Design solution utilizing the staggered steel truss system. *AISC Engineering Journal*.
10. American Institute of Steel construction (AISC) (2002). Staggered Truss Framing Systems. *Steel Design Guide 14*.
11. Kussro, W.B. (2007) Beating the odds-multi story residential construction. *Modern Steel Construction*.
12. Gervias, R. and Faraone, T. (2003) Real-life adventures in staggered truss framing. *Modern Steel Construction*.
13. Yan, L., Cao, Y.S. and Zhao, Y.Z. (2006) The disposal of steel staggered truss system and the calculation of shear rigidity. *Journal of Inner Mongolia University of Technology*.

۱۴. تسنیمی، ع. و معصومی، ع. محاسبه ضریب رفتار قابهای خمشی بتن مسلح. نشریه شماره ۴۳۶، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۵).

۱۵. دستور العمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود، نشریه شماره ۳۶۰، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، (۱۳۸۵).