

بررسی عملکرد لرزه‌ای قابهای فولادی ساده با بادبندهای برون محور

جواد واثقی امیری¹ ، حامد همراه²
استاد یار دانشکده عمران، دانشگاه مازندران، بابل
کارشناس ارشد سازه، دانشگاه مازندران، بابل
E-mail: vaseghi@nit.ac.ir

خلاصه

امروزه با توسعه سطح زندگی انسانها و نیاز به فضا سازی مطلوب ، لزوم احداث سازه‌هایی با رفتار لرزه‌ای مطمئن، اقتصادی و مناسب برای جانمایی‌های معماری متفاوت احساس می‌شود. از این رو استفاده از سیستمهای سازه‌ای فولادی با بادبندهای برون محور با شکل پذیری بالا که در سال 1977 توسط پروفیسور پوپوف ابداع شده است، بسیار مناسب به نظر می‌رسد. در این پژوهش به بررسی رفتار واقعی این سیستمها با استفاده از مطالعه بروی ضریب رفتار آنها می‌پردازیم. رویکرد پایه در این پژوهش جهت بررسی ضریب رفتار با توجه به استفاده از استاندارد 2800 ایران، مطالعه اثرات شکل پذیری و اضافه مقاومت موجود در سازه از روی منحنی ظرفیت سازه می‌باشد. در این راستا قابهای ساختمانی منطبق با نیاز ساخت و ساز مرسوم، دارای قاب بادبندی برون محور با خروج از مرکزیت و تعداد طبقات متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشانگر ضعف سازه‌های طراحی شده در این مدل‌ها بر اساس ضوابط شکل‌پذیری آیین نامه 2800 ویرایش سوم (1384) می‌باشند. لذا به منظور حصول رفتار لرزه‌ای مناسب باید از ضریب رفتار کمتر و یا محدودیت تغییر مکان به مقادیر کمتر از ضوابط موجود استفاده کرد.

کلمات کلیدی: عملکرد لرزه‌ای، تحلیل بارافزون، بادبند برون محور، اضافه مقاومت، ضریب رفتار

مقدمه

ضوابط موجود در آیین‌نامه‌های زلزله، به طور ضمنی هدف از طراحی لرزه‌ای برای ساختمان‌ها را به این صورت بیان می‌دارند که زلزله‌های با شدت کم را بدون ایجاد خسارت تحمل کنند و زلزله‌های با شدت متوسط را با ایجاد خسارات بسیار جزئی سازه‌ای و مقداری خسارات غیر سازه‌ای تحمل نمایند و زلزله‌های شدید را بدون فروریزی تحمل کنند و تلفات جانی نداشته باشند. که ساختمانهای با اهمیت زیاد باید علاوه بر ایستایی در سطح بهره‌برداری خود نیز قرار داشته باشند.

بر طبق معیارهای فوق ، توجه اصلی در مقاوم‌سازی در برابر زلزله به ایمنی جانی معطوف است. در حالت کلی تلاش می‌شود که نیل به هدف فوق با فراهم آوردن مقاومت، سختی، شکل‌پذیری، قابلیت اتلاف انرژی و ... به مقدار لازم صورت گیرد [1].

تعیین نیروی طراحی با استفاده از طیف ظرفیت

ضریب رفتار

در روش تحلیل خطی در آیین نامه‌ها، معمولاً رفتار خطی سازه با ضریب R_W به رفتار غیرخطی سازه مرتبط می‌گردد. ضریب رفتار یا ضریب سیستم سازه‌ای به عوامل متعددی وابسته است که از جمله عوامل مهم آن می‌توان به ظرفیت شکل‌پذیری و رفتار غیرالاستیک اعضاء و مصالح سازه به

هنگام زلزله، اضافه مقاومت موجود در سازه به واسطه اعمال ضرایب اطمینان مختلف برای مقاصد طراحی، اجزاء غیرسازه‌ای و ... اشاره کرد. بدین منظور یوانگ [3]، به تعریف ضریب کاهش نیروی زلزله در اثر شکل‌پذیری R_{μ} و ضریب اضافه مقاومت Ω ، اقدام نموده است.

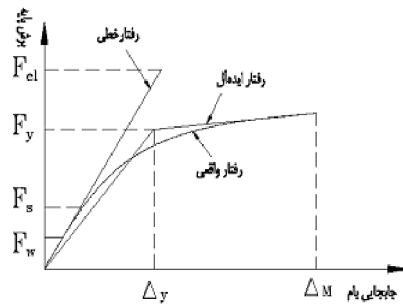
$$R = R_{\mu} \cdot \Omega \quad (1)$$

برای طراحی به روش تنش‌های مجاز همچون *AISC*، یک کاهش نیروی دیگر از تراز نیروی متناظر با اولین مفصل پلاستیک تا نیروی طراحی خطی سازه نظیر تنش‌های مجاز با همین عنوان ضریب تنش مجاز وارد معادله (1) می‌شود.

$$R = R_{\mu} \cdot \Omega \cdot Y \quad (2)$$

کاهش نیروی طراحی در اثر شکل‌پذیری

یک منحنی نمونه بار افقی - تغییر مکان در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل 1: منحنی پاسخ کلی سازه‌ها در تحلیل بارافزون

این نمودار به طیف ظرفیت معروف می‌باشد. اگر از طیف ظرفیت جهت تعیین ضریب شکل‌پذیری (μ) استفاده شده باشد با توجه به شکل (1)، به دلیل وجود شکل‌پذیری و اتلاف انرژی پسماند و میرایی، نیروی خطی سازه F_e می‌تواند بوسیله ضریب کاهش به نام ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری با علامت اختصاری (R_{μ}) تا حد نیروی جاری شدن سازه F_y کاهش پیدا کند. تئوری بالا به رابطه نیومارک [7] مشهور است.

$$R_{\mu} = \frac{F_e}{F_y} \quad (3)$$

از عوامل مختلف در ضریب کاهش نیرو می‌توان به شکل‌پذیری، میرایی، زمان تناوب اصلی سازه، نوع رفتار پسماند و نوع خاک محل احداث بنا، اشاره نمود [4 و 5]. ناسار و کرانیکلر به رابطه ذیل جهت تعیین ضریب کاهش نیروی ناشی از شکل‌پذیری اشاره می‌کنند که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است.

$$R_{\mu} = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (4)$$

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T} \quad (5)$$

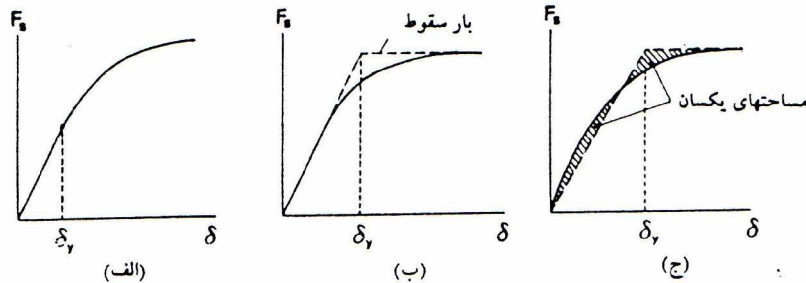
که در آن T پریود اولیه سازه و α مقدار سخت‌شوندگی کرنشی و بصورت درصدی از سختی اولیه سیستم است. a و b کمیت‌های هستند بر حسب α که در جدول (1) ارائه شده‌اند

جدول 1: مقادیر a ، b بر حسب درصد سختی‌شوندگی کرنشی α

$\alpha\%$	a	b
0/0	1/0	0/42
2/0	1/0	0/37
10/0	0/8	0/29

$$\mu = \frac{\Delta_M}{\Delta_y} \quad (6)$$

شکل پذیری ارائه شده در رابطه (6) حاصل تقسیم حداکثر تغییر شکل سازه یا تغییر مکان هدف به تغییر مکان متناظر با حد تسلیم کلی سازه می‌باشد. تغییر مکان هدف سازه در این پژوهش برابر استاندارد 2800 ایران، 2/5 درصد ارتفاع سازه در نظر گرفته شده است. روشهای مختلف تعیین برش پایه و تغییر مکان متناظر با تسلیم کلی سازه در شکل (2) آورده شده است. در این پژوهش از روش ج در شکل (2) استفاده شده است.



شکل 2: تعاریف مختلف تغییر شکل حد تسلیم [2]

کاهش نیروی طراحی در اثر اضافه مقاومت سازه Ω

ضریب اضافه مقاومت بیانگر مقاومت ذخیره شده در سازه به دلیل عوامل مختلف پس از اولین جاری شدن (اولین ایجاد مفصل پلاستیک) در آن می‌باشد که به واسطه آن تخریب سازه به تعویق می‌افتد و مقدار آن برای هر سازه مقداری منحصر به فرد می‌باشد [6].

برای Ω (ضریب اضافه مقاومت سازه) رابطه کمی زیر پیشنهاد شده است. [1]:

$$\Omega = \Omega_0 f_1 f_2 f_3 \quad (7)$$

$$\Omega_0 = \frac{F_y}{F_s} \quad (8)$$

که Ω_0 ضریب اضافه مقاومت اسمی بوده، مقدار آن با توجه به رابطه (8) یعنی حاصل تقسیم برش پایه حد تسلیم کلی سازه بر تنش نظیر تشکیل اولین مفصل پلاستیک در سازه از 1 الی 3 متغیر است.

f_1 نسبت تنش واقعی به تنش تسلیم اسمی است که مقدار آن در حدود 1/05 قابل توصیه است. f_2 اثر سرعت بارگذاری در افزایش تنش تسلیم می‌باشد که مقدار آن در حدود 1/10 قابل توصیه است. f_3 بیانگر تأثیر اجزای غیرسازه‌ای می‌باشد. با تعاریف فوق، مقدار محتمل و متوسط Ω در حدود 1/50 می‌باشد.

کاهش نیروی زلزله توسط ضرایب تنش مجاز سازه

این ضریب در حقیقت نسبت نیروی (برش پایه) متناظر با ایجاد اولین مفصل پلاستیک در سازه به نیروی خطی اعمال شده بر اساس آیین نامه طراحی می‌باشد. که مقدار محتمل و متوسط ضریب تنش مجاز Y در حدود 1/4 تا 1/5 می‌باشد [3].

$$Y = \frac{F_s}{F_w} \quad (9)$$

مدل‌های مورد بررسی و مبانی پژوهش [8]

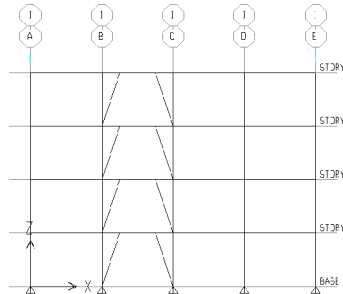
به منظور ارزیابی رفتار غیر خطی سازه به بررسی ضریب رفتار سازه که معرف رابطه بین رفتار خطی و غیرخطی سازه می‌باشد، پرداخته شده است. لذا بدین منظور انواع سازه‌های با بادبندهای برون محور به صورت لینک (تیرپیوند) وسط مورد بررسی قرار گرفته است. جهت محاسبه ضریب رفتار، ابتدا سازه با یک ضریب رفتار فرضی که در این پژوهش ضریب رفتار معرفی شده توسط استاندارد 2800 ایران می‌باشد، تحلیل و طراحی شده است. در طراحی ملاک کنترل تغییر شکلها بند 2-5-3 و 2-5-4 استاندارد مذکور می‌باشد. با تعریف تغییر مکان هدف مطابق بالا و اختصاص مفاصل پلاستیک در نقاط حداکثر تنش با مشخصات مشروحه آیین نامه FEMA273، سازه با ضریب رفتار مذکور تحلیل بارافزون (ستاتیکی غیرخطی) می‌گردد. تعریف مفاصل پلاستیک به شرح ذیل می‌باشد:

الف) جهت ستونهای قاب مهاربندی شده مفصل پلاستیک بار محوری (P) مطابق استاندارد FEMA273 در میانه اعضا داده شده است ($0.5L$).

ب) جهت مهاربندها از آنجایی که تحت کمانش، گسیختگی در آنها اتفاق می افتد، مفصل پلاستیک بار محوری (P) مطابق استاندارد $FEMA273$ در میانه اعضا داده شده است ($0.5L$).

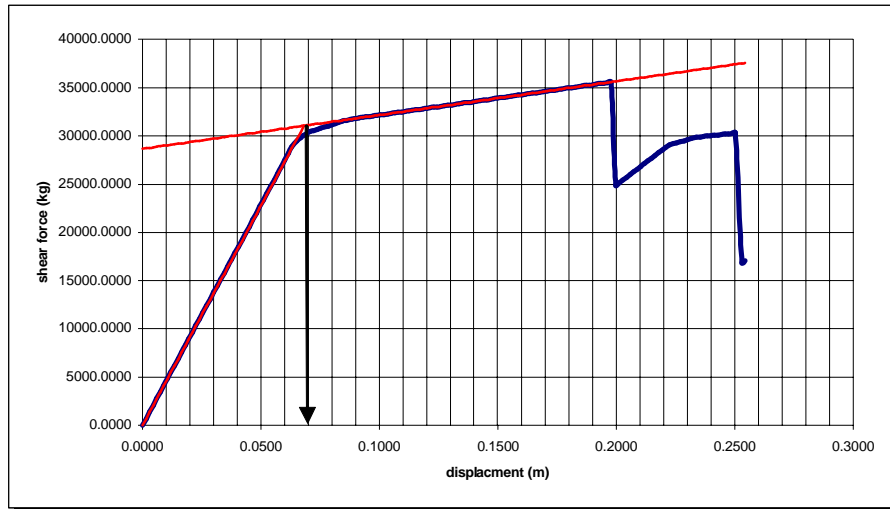
ج) جهت تیرهای متصل به مهاربندها مفصل پلاستیک برشی و خمشی (M_3 و V_2) مطابق استاندارد $FEMA273$ به ترتیب در میانه اعضا و محل اتصال مهاربندها پیش بینی شده است.

با استفاده از روابط عنوان شده در بخش 2، ضریب رفتار جدید سازه بدست آمده و مجددا اعمال یاد شده، انجام می شود. تکرار عملیات تا همگرایی جوابها ادامه پیدا می کند.



شکل 3: قابهای مدل سازی شده و موقعیت بادبندها در آنها

نمونه ای از منحنی بارافزون و نتایج استخراج شده از آن به ترتیب در شکل (4) و جدول (2) آمده است.



شکل 4: منحنی بارافزون سازه سه طبقه با $e/L=0.5$ و $R=7$

ملاک پذیرش سازه ورود به محدوده ایمنی جانی در نظر گرفته شده است. پارامترهای جدول 2 عبارتند از: V_d ، برش پایه طراحی سازه براساس یک فرضی R یا پیشنهادی آیین نامه ها، Δ_d ، تغییر مکان سازه در حالت تحلیل خطی، V_s ، برش پایه نظیر تشکیل اولین مفصل پلاستیک در سازه Δ_s ، تغییر مکان نظیر تشکیل اولین مفصل پلاستیک در سازه، V_y ، برش پایه متناظر با تشکیل تسلیم کلی در سازه، Δ_y ، تغییر مکان متناظر با تشکیل

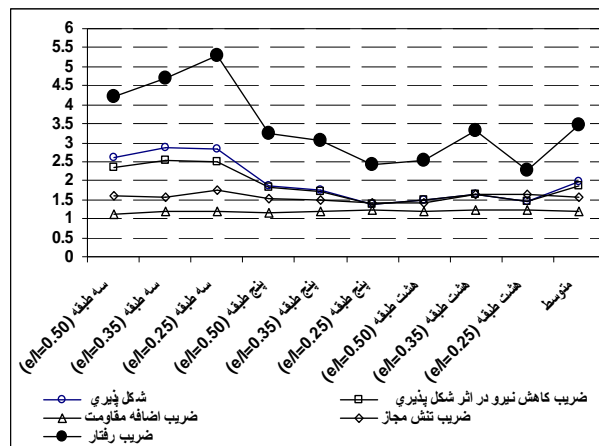
جدول 2: نقاط کلیدی سازه سه طبقه با $e.L=0.50$ و $R=7$

تحلیل خطی $R=7$		اولین مفصل پلاستیک (B)		نقطه تسلیم کلی سازه		ورود به محدوده ایمنی جانی (LS)		خروج از محدوده ایمنی جانی (CP)	
$V_d(kg)$	$\Delta_d(cm)$	$V_S(kg)$	$\Delta_S(cm)$	$V_y(kg)$	$\Delta_y(cm)$	$V_{LS}(kg)$	$\Delta_{LS}(cm)$	$V_C(kg)$	$\Delta_C(cm)$
18335	0/4	28875	3/6	30093	81/6	34414	48/16	35566	78/19
محل تشکیل مفصل		تیر لینک طبقه دوم		---		تیر لینک طبقه دوم		تیر لینک طبقه دوم	

تسلیم کلی در سازه، V_{LS} ، برش پایه نظیر ورود به محدوده عملکرد ایمنی جانی در سازه، Δ_{LS} ، تغییر مکان نظیر ورود به محدوده عملکرد ایمنی جانی در سازه، V_{CP} ، برش پایه متناظر با تشکیل مکانیزم در سازه، Δ_{CP} ، تغییر مکان متناظر با تشکیل مکانیزم در سازه.

- نتایج پارامترهای رفتار لرزه‌ای قاب‌های EBF و بررسی تحلیلی آنها [8]

در جدول (3) خلاصه نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی بارافزون مدل‌های تشریح شده، آورده شده است. به اختصار می‌توان نسبت موجود بین این ارقام را در مدل‌های مختلف به صورت شکل (5) نشان داد.

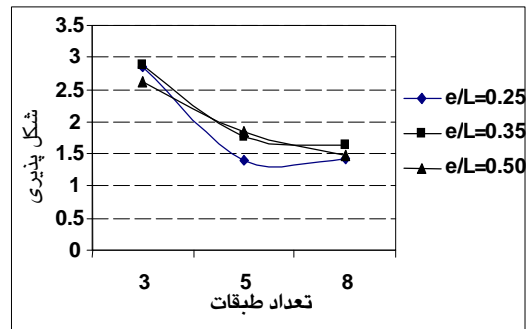
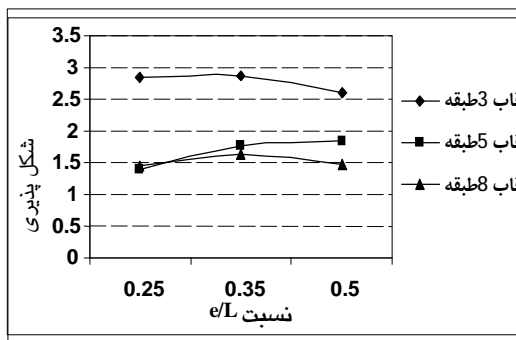


شکل 5: مقایسه پارامترهای رفتار غیرخطی در انواع مدل‌های تحلیل غیرخطی بارافزون

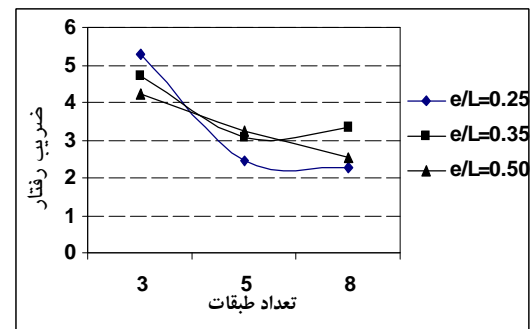
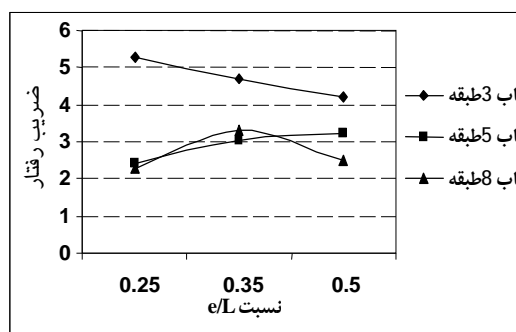
نمودارهای مقایسه‌ای از پارامترهای مهم رفتار لرزه‌ای سازه‌های مدل شده متأثر از تغییر ارتفاع قاب و تغییر خروج از مرکزیت در اشکال (6) و (7) آمده است.

جدول 3: خلاصه و میانگین پارامترهای تحلیل غیرخطی بارافزون مدل‌ها

مشخصات مدل	μ	$R\mu$	Ω	Y	R
سه طبقه ($e/l=0.50$)	2/618	2/349	1/113	1/609	4/211
سه طبقه ($e/l=0.35$)	2/866	2/528	1/194	1/558	4/705
سه طبقه ($e/l=0.25$)	2/842	2/511	1/192	1/764	5/283
پنج طبقه ($e/l=0.50$)	1/846	1/81	1/164	1/534	3/236
پنج طبقه ($e/l=0.35$)	1/753	1/724	1/194	1/482	3/055
پنج طبقه ($e/l=0.25$)	1/39	1/381	1/237	1/423	2/433
هشت طبقه ($e/l=0.50$)	1/476	1/478	1/208	1/415	2/527
هشت طبقه ($e/l=0.35$)	1/634	1/637	1/229	1/645	3/314
هشت طبقه ($e/l=0.25$)	1/437	1/439	1/226	1/628	2/287
متوسط مقادیر	1/9847	1/873	1/1952	1/562	3/4501

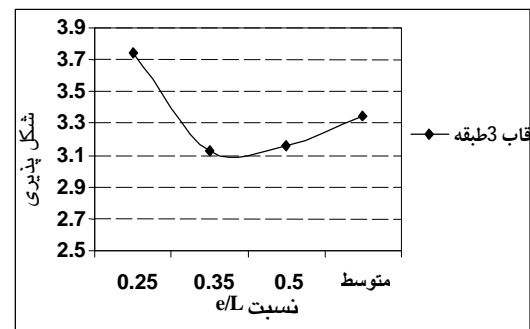
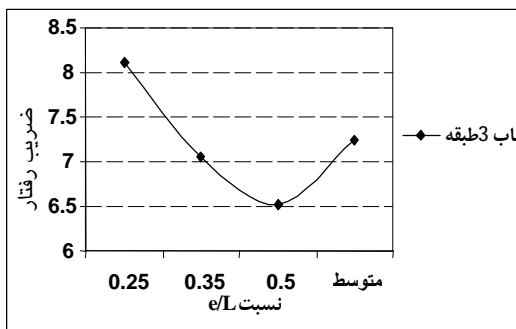


شکل 6: مقایسه شکل پذیری سازه در مدل‌های غیرخطی با خصوصیات هندسی متفاوت



شکل 7: مقایسه ضریب رفتار سازه در مدل‌های غیرخطی با خصوصیات هندسی متفاوت

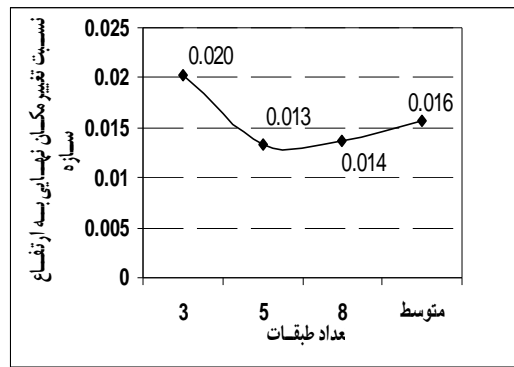
در مدل‌های بررسی شده با وجود تغییر مکان مناسب در تحلیل خطی و طراحی مناسب سازه، اعضای از سازه در تحلیل غیر خطی، وارد محدوده ایمنی جانی فراتر رفته‌اند. حال با طراحی هدفمند به دنبال استقرار سازه طرح شده در محدوده ایمنی‌جانی که همان عملکرد مناسب لرزه ای مد نظر می‌باشد، هستیم. طرح چنین سازه‌ای با سعی و خطای زیاد همراه بوده‌است. متوسط مقدار اضافه مقاومت و ضریب تنش مجاز در این سازه‌ها به ترتیب 1/33 و 1/93 برآورد شده است.



شکل 9: مقایسه ضریب رفتار سازه و شکل پذیری در مدل‌های با عملکرد مناسب لرزه‌ای با خصوصیات هندسی متفاوت

تخمین تغییر مکان غیرخطی سازه در قابهای EBF [8]

در شکل (10) تغییر مکان غیرخطی سازه به طور متوسط در انواع سیستم‌های مهاربندی برون محور برابر 1/6% ارتفاع سازه می‌باشد. این نسبت در سازه‌هایی که براساس عملکرد مناسب لرزه‌ای طراحی شده‌اند، 2/23% محاسبه شده که نزدیک به رقم آیین نامه 2800 می‌باشد.



شکل 10: نسبت‌های تغییر مکان نهایی سازه به ارتفاع موثر سازه

خلاصه نتایج [8]

مقادیر پارامترهای اضافه مقاومت سازه و ضریب تنش مجاز در انواع سازه‌های مدل شده از نظم خوبی برخوردار بوده و این نظم از دقتی که در طراحی سازه انجام شده و یکنواختی طراحی نشأت می‌گیرد.

متوسط مقادیر حاصله جهت اضافه مقاومت و ضریب تنش مجاز سازه‌های طرح شده مطابق معمول به ترتیب $1/195$ و $1/562$ به دست آمده است. شکل پذیری و ضریب کاهش نیروی ناشی از آن با افزایش تعداد طبقات از 3 طبقه به 8 طبقه به میزان $67/7\%$ کاهش یافته است. در مدل‌های با نسبت خروج از مرکزیت متفاوت، تغییرات در حدود 8 الی 9 درصد می‌باشد. به طور متوسط برای سازه‌های نمونه، ضریب رفتار $3/45$ مشاهده شده که این مقدار نسبت به عدد پیشنهادی استاندارد 2800 ایران به میزان $50/71$ درصد تفاوت دارد. در سازه‌های با عملکرد مناسب لرزه‌ای ضریب رفتار بین 7 الی $7/5$ بوده و این ارقام با عدد پیشنهادی آیین نامه 2800 ایران کمتر از 3 درصد تفاوت داشته است. مشروط بر دارا بودن اضافه مقاومت به میزان 40 الی 60 درصد به طور متوسط تغییر مکان‌های غیر خطی $1/6\%$ ارتفاع سازه بدست آمده است.

مراجع

- 1- چوپرا، آنیل. ک؛ "دینامیک سازه ها و تعیین نیروهای زلزله"، ترجمه شاپور طاحونی، انتشارات علم و ادب، تهران، 1377.
- 2- تهرانی زاده، محسن؛ ضروریان، حمید؛ "مقایسه رفتار خطی و غیرخطی دینامیکی سیستم‌های مختلف سازه‌ای بر اساس پارامتر شکل‌پذیری" دومین کنفرانس بین‌المللی زمین لرزه و مهندسی زلزله، تهران، 1374.
- 3- همراه، حامد؛ "بررسی عوامل موثر بر ضریب رفتار در قاب‌های فولادی ساده با بادبند برون محور"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، 1385.
- 4- Wakabayashi, M.; "design of earthquake resistant buildings", Mc Graw-Hill, 1986.
- 5- Osteras, J. D.; Karwinkler, H.; "seismic design based on strength of structures", proc.4 U.S National conf. On earthquake engineering, vol.2, pp.955-964, 1990
- 6- Federal Emergency Management Agency (FEMA273), "Techniques for Seismically Rehabilitation Existing", March 1997.
- 7- Fajfar, P.; "Design spectra for the new generation of code: Eurocode 8 achieve the halfway mark", Proc. 10th european conference on earthquake engineering, Duma, pp.2965-2974, 1995.
- 8- Newmark, N.M.; Hall, W.Y.; "Earthquake spectra and design", EERI, 1982.