



خصوصیات دینامیکی قاب های فولادی مقاوم خمشی با اتصالات نیمه صلب تحت تحلیل استاتیکی بار افزون و دینامیکی غیر خطی شتابنگاشت زلزله

مجتبی فتحی^۱، فرهاد دانشجو^۲

(دریافت ۹۰/۴/۱۱، پذیرش ۹۱/۷/۱۷)

چکیده

در این تحقیق خصوصیات دینامیکی ساختمانهای فولادی با سیستم قاب خمشی با اتصال نیمه صلب مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور چهار قاب دوطبقه دو دهانه، چهار طبقه سه دهانه، شش طبقه سه دهانه و هشت طبقه چهار دهانه، با تغییر سختی اتصالات از حالت نیمه صلب تا صلب، در دو حالت تحلیل استاتیکی بار افزون و دینامیکی غیر خطی تحت شتابنگاشت زلزله تحلیل و مورد ارزیابی قرار گرفته اند. سپس به بررسی نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب، نحوه انهدام قاب، اتلاف انرژی به صورت میرایی در اعضاء و اتصالات، زمان تناوب قاب، جابجایی حداکثر طبقات و قاب، نیروی برشی پایه، ضریب رفتار، ضریب مقاومت افزون بار طراحی پرداخته شده است. این تحلیل ها نشان دادند که با افزایش سختی اتصالات در قاب ها، نیروی برشی پایه، ضریب مقاومت افزون، افزایش و زمان تناوب، جابجایی نسبی و حداکثر قاب، ضریب رفتار قاب کاهش می یابد.

کلمات کلیدی

قاب فولادی مقاوم خمشی، تحلیل غیر خطی استاتیکی و دینامیکی، اتصال نیمه صلب، ضریب رفتار

Determining of Dynamic Characteristics of Steel Frames with Semi-Rigid Connections by Push-Over Analysis and Nonlinear Dynamic Analysis

ABSTRACT:

Dynamic characteristics of steel structures including flexural frame system with semi-rigid connections are investigated in this study. With this regard, four frames have been modeled including two-span two-story, three-span four-story, three-span six-story and four-span eight-story frames. The frames are analyzed and evaluated for variation of the connections stiffness from semi-rigid to rigid and for both cases of push over static analysis and nonlinear dynamic analysis under earthquake acceleration. After that, plastic hinge formation in the frame, frame failure, energy dissipation in members and connections, maximum displacement of stories and frame, base shear force, behavior coefficient, coefficient of design load increased strength have been investigated.

The results showed that stiffness increase of connections in the frame, increases the base shear force and coefficient of increased strength, and reduces the period, maximum and relative displacement (drift) and coefficient of frame behavior.

Keywords:

Steel Flexural Frame, Nonlinear Push Over and Dynamic Analysis, Semi-rigid Connection, Behavior Factor

۱ استادیار گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی، کرمانشاه (نویسنده مسئول)

۲ استاد گروه سازه دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس، تهران



با مساوی قرار دادن سختی های دو انتهای تیر $K_1 = K_2$

و فرض $m = \frac{K}{EI/L}$ خواهیم داشت:

$$M = \left[\frac{m}{m+2} \right] \frac{\omega L^2}{12} \quad (2)$$

با توجه به معادله (۲) و اینکه $\frac{\omega L^2}{12}$ لنگر گیرداری تیر مربوطه می باشد پس عبارت داخل کروشه، درجه سختی اتصال را نشان می دهد که وابسته به سختی و طول تیر نیز است. [1]

پارامترهای مؤثر در تعیین رفتار سازه در تحلیل استاتیکی بار افزون و تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت به صورت زیر تعریف می شوند. [2]

اتصالات نیمه صلب سبب تعدیل لنگرها در انتها و وسط تیر شده و در طراحی بهینه اعضاء نقش ویژه ای را ایفا می کند. آنچه کار را با سایر اتصالات متفاوت کرده، به هم وابسته بودن سختی اتصال و پارامترهای تحلیل سازه ای است. زیرا با در نظر گرفتن معادلات شیب افت یک تیر تحت بار گسترده ω و سختی EI و طول L با دو فنر انتهایی به سختی های K_1 و K_2 خواهیم داشت:

$$M = \left[\frac{K_1 \left(K_2 + \frac{6EI}{L} \right)}{K_1 K_2 + \frac{4EI}{L} (K_1 + K_2) + 12 \frac{EI}{L}^2} \right] \frac{\omega L^2}{12} \quad (1)$$

جدول (۱). پارامترهای مؤثر در رفتار سازه در تحلیل استاتیکی بار افزون و تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت

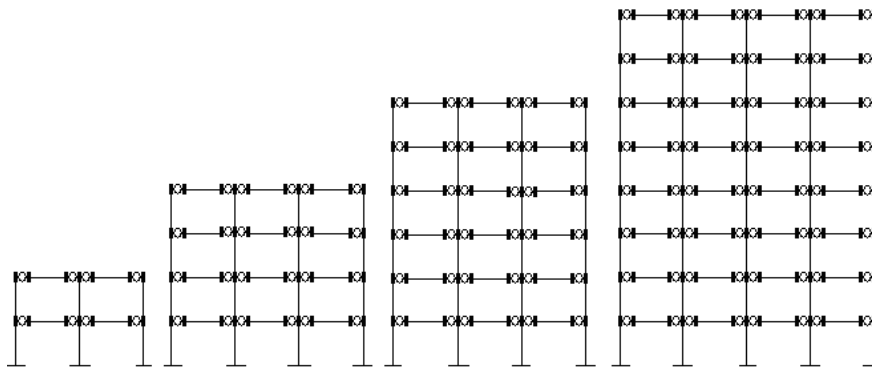
پارامترهای مؤثر در رفتار سازه	تحلیل استاتیکی	تحلیل دینامیکی
ضریب کاهش در اثر شکل پذیری	$R_\mu = \frac{V_e}{V_y}$	$R_\mu = \frac{\lambda_u V_1}{\lambda_y V_y}$
ضریب افزونگی نیروی برشی	$\rho = \frac{V_y}{V_1}$	$\rho = \frac{V_y}{V_1}$
ضریب مقاومت افزون طراحی	$\Omega_d = \frac{V_1}{V_d}$	$\Omega_d = \frac{V_1}{V_d}$
ضریب مقاومت افزون کلی	$\Omega = \rho \cdot \Omega_d$	$\Omega = \rho \cdot \Omega_d$
ضریب کاهش کلی	$R = R_\mu \cdot \Omega$	$R = R_\mu \cdot \Omega$
ضریب رفتار	$q = R_\mu \cdot \rho = \frac{V_e}{V_1}$	$q = R_\mu \cdot \rho = \frac{\lambda_u}{\lambda_1}$

۱- معرفی قاب های مورد مطالعه

برای ارزیابی رفتار دینامیکی قاب های خمشی، با توجه به تغییرات سختی در اتصالات آنها چهار نوع قاب خمشی دوطبقه دو دهانه، چهار طبقه سه دهانه، شش طبقه سه دهانه و هشت طبقه چهار دهانه مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱).
با توجه به تغییرات سختی اتصال 75%، 85%، 90% و 100% مقادیر m برای قابهای نیمه صلب براساس جدول ۲ تعیین می شود.

در روابط فوق V_d نیروی برش پایه طراحی قاب، V_1 نیروی برشی پایه قاب در حالت تشکیل اولین مفصل پلاستیک در قاب، V_e نیروی برشی پایه در سیستم الاستیک معادل با ماکزیمم تغییر مکان بام δ_y در سیستم غیرالاستیک و V_y نیروی برشی پایه قاب در حالت انهدام قاب، λ_u ضریب شتاب در تشکیل اولین مفصل پلاستیک و λ_u ضریب شتاب در حالت انهدام قاب می باشد.





شکل (۱). مدل قاب های مورد مطالعه

جدول (۲). سختی های اتصال نیمه صلب

تیر	(EI_b/L_b)	m=6 (K=%75)	m=12 (K=%85)	m=18 (K=%90)
		0.5<m<8 اتصال نیمه صلب انعطاف پذیر	8<m<18 اتصال نیمه صلب سخت	m>18 اتصال صلب
IPE240	204	1224	2448	3672
IPE270	313	1878	3756	5634
IPE300	438	2628	5256	7884
IPE330	617	3702	7404	11106
IPE360	854	5124	10248	15372

تغییر نموده، نوع خاک محل تپ II است. تحلیل به دو صورت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون و دینامیکی غیرخطی تحت شتابنگاشت زلزله با استفاده از نرم افزار Drain 2DX [3] انجام شده است. برای تحلیل دینامیکی تعداد هفت شتابنگاشت رخداده در خاک نوع دو مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات شتابنگاشت ها در جدول ۳ آمده است. [4]

تحلیل و طراحی لرزه ای قاب ها براساس آئین نامه بارهای وارده ایران و طراحی مقاطع براساس مقررات ملی ساختمان ایران انجام شده است. طول هر دهانه 4 متر و ارتفاع هر طبقه 3.2 متر، عرض بارگیر هر تیر 4 متر، بار مرده طبقات 700 Kg/m² بار زنده طبقات 200 Kg/m²، مقاطع ستون ها از نیمرخ IPB140 تا نیمرخ IPB400 و تیرها از نیمرخ IPE240 تا نیمرخ IPE360

جدول (۳). خصوصیات شتابنگاشت های مورد مطالعه

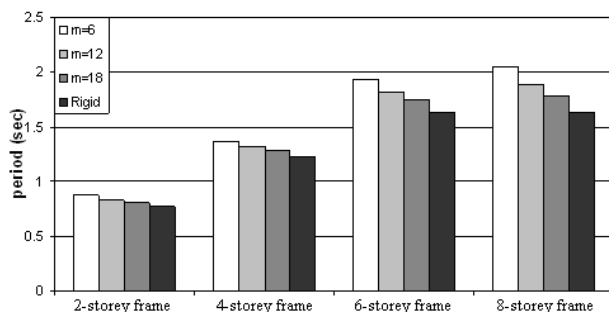
Earthquake, Station/Component	Magnitude (M)	Distance (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Period (sec)	EPA (g)	scaling factor	scaled PGA(g)
Chi-Chi, Taiwan 1999, TCU095 / W	7.6	43.44	0.378	62	51.75	1.05	0.377	0.928	0.351
Kern County 1952, Taft Lincoln School / TAF021	7.4	41	0.156	15.3	9.25	0.628	0.152	2.303	0.359
Kobe 1995, KJMA / KJM000	6.9	0.6	0.821	81.3	17.68	0.634	0.707	0.495	0.406
Kocaeli, Turkey 1999, Sakarya / SKR090	7.4	3.1	0.376	79.5	70.52	1.354	0.306	1.144	0.43
Landers 1992, 22170 Joshua Tree / JOS090	7.3	11.6	0.284	43.2	14.51	0.974	0.278	1.259	0.358
Northridge 1994, 90013 Beverly Hills / MUL279	6.7	19.6	0.516	62.8	11.08	0.779	0.558	0.627	0.324
San Fernando 1971, 128 Lake Hughes / L12021	6.6	20.3	0.366	17	1.65	0.297	0.306	1.144	0.419

۲- نتایج تحلیل های انجام شده

۳.۱. اثر سختی اتصال بر زمان تناوب ارتعاش

کاهش در قاب‌های دو و چهار طبقه حدود 10% و در قاب‌های شش طبقه به ترتیب 15% و در قاب‌های هشت طبقه حدود 20% است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که میزان تأثیر سختی اتصالات بر زمان تناوب قاب، با افزایش ارتفاع قاب، بیشتر می‌شود.

شکل ۲ تغییرات زمان تناوب ارتعاشی قاب‌های مورد مطالعه را با توجه به تغییرات سختی اتصالات آنها نشان می‌دهد. در قاب‌های مورد مطالعه با افزایش سختی اتصالات، مقدار زمان تناوب قاب‌ها کاهش می‌یابد. این

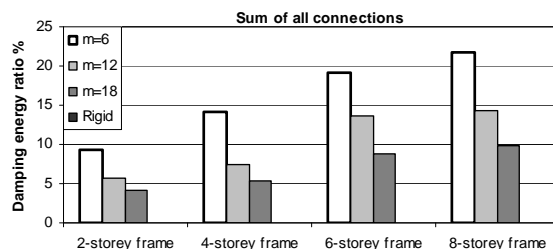
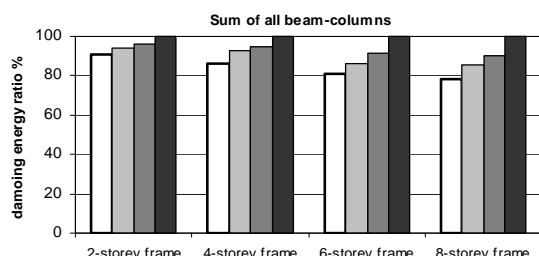


شکل (۲). تغییرات زمان تناوب ارتعاشی قاب‌ها با توجه به تغییرات سختی اتصالات

اتصالات کم و در اعضا زیاد می‌شود. کاهش اتلاف انرژی به صورت میرایی در اتصالات در قاب‌های دو طبقه 9%، در قاب‌های چهار طبقه 14%، در قاب‌های شش طبقه 19% و در قاب‌های هشت طبقه ۲۲% است.

۳.۲. اثر سختی اتصال بر اتلاف انرژی در اعضا و اتصالات

شکل ۳ تأثیر سختی اتصال بر اتلاف انرژی بصورت میرایی در اعضا و اتصالات قاب‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست با افزایش سختی اتصالات در قاب، اتلاف انرژی به صورت میرایی در



شکل (۳). تأثیر سختی اتصال بر اتلاف انرژی به صورت میرایی در تیر-ستون‌ها و اتصالات

دینامیکی را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان گفت که

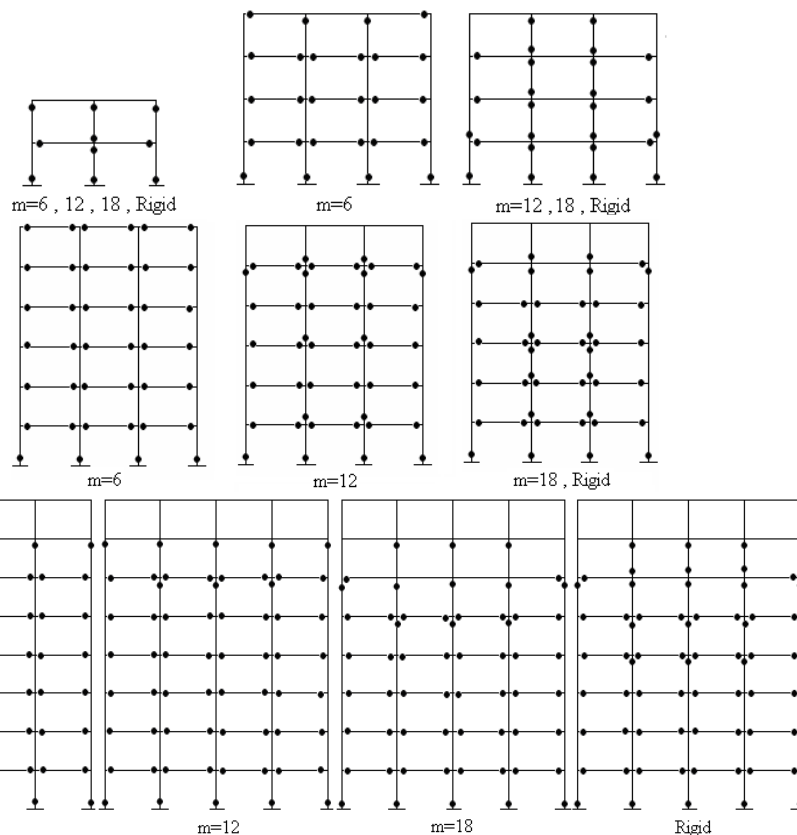
۳.۳. اثر سختی اتصال بر نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک

شکل ۴ تأثیر سختی اتصال بر نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در آنالیز استاتیکی بار افزون را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۴ مقایسه بین تعداد مفاصل پلاستیک در آنالیز استاتیکی بار افزون و میانگین نتایج تحلیل



پلاستیک ایجاد شده است. به طور کلی در قاب های نیمه صلب شکل و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضاء دارای توزیع بهتری است.

با افزایش سختی در اتصالات تیر به ستون در قاب، مفاصل پلاستیک بیشتری در ستون ها تشکیل شده و با توجه به اینکه در طراحی، فلسفه ستون قوی- تیر ضعیف در نظر گرفته شده است اما با این حال در ستون ها مفاصل



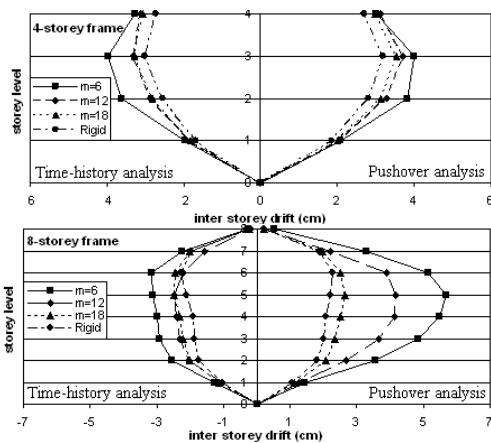
شکل (۴). شکل کلی مفاصل پلاستیک تشکیل شده در قاب ها در حالت مکانیسم تحلیل استاتیکی بار افزون

جدول (۴). مقایسه تعداد مفاصل پلاستیک در تحلیل استاتیکی بار افزون و میانگین نتایج تحلیل دینامیکی

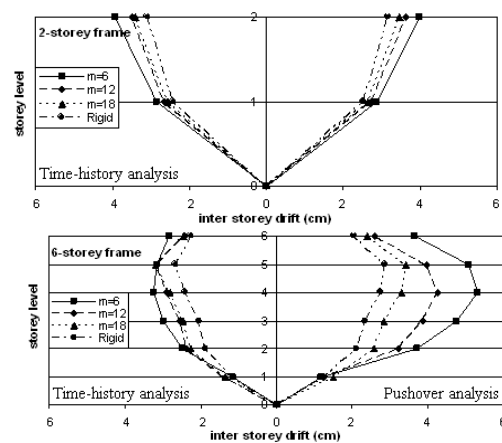
میانگین تحلیل دینامیکی شتابنگاشت		تحلیل استاتیکی بار افزون		نوع قاب
تعداد مفاصل پلاستیک در ستون	تعداد مفاصل پلاستیک در تیر	تعداد مفاصل پلاستیک در ستون	تعداد مفاصل پلاستیک در تیر	
8	2	8	2	m=6
8	2	8	2	m=12
8	2	8	2	m=18
8	2	8	2	Rigid
6	20	6	20	m=6
18	7	20	6	m=12
18	6	20	6	m=18
19	6	20	6	Rigid
4	36	4	36	m=6
18	30	14	30	m=12
21	24	18	26	m=18

24	23	18	26	Rigid	هشت طبقه چهار دهانه
15	48	10	48	m=6	
16	48	13	48	m=12	
24	45	16	42	m=18	
28	46	22	42	Rigid	

در قاب های هشت طبقه 56% است. با توجه به نتایج فوق می توان گفت با افزایش تعداد طبقات، تأثیر سختی اتصال بر جابجایی نسبی طبقه ای بیشتر می شود. اما این تأثیر در هر قاب، در طبقات میانی آن بیشتر از طبقات پایینی و بالایی است. به عبارت دیگر مقدار جابجایی نسبی طبقه ای در طبقات میانی بیشتر از سایر طبقات قاب است. همچنین براساس شکل های فوق می توان نتیجه گیری کرد که با افزایش ارتفاع قاب، اختلاف بین نتایج تحلیل استاتیکی بار افزون و تحلیل دینامیکی به خصوص در طبقات میانی بیشتر می شود.

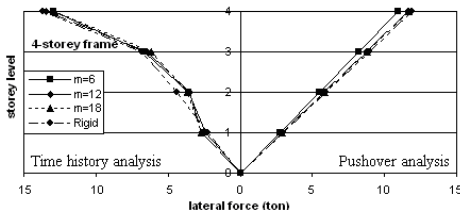


۳.۴. اثر سختی اتصال بر جابجایی نسبی طبقه ای
نمودارهای شکل ۵ مقایسه بین نتایج تحلیل استاتیکی با میانگین نتایج حاصل از شتابنگاشت های را برای جابجایی نسبی در قاب های مورد مطالعه نشان می دهد. با افزایش سختی اتصالات، بیشینه جابجایی نسبی طبقه ای کاهش می یابد. مقدار این کاهش در تحلیل استاتیکی در قاب های دو طبقه حدود 20%، در قاب های چهار طبقه حدود 24%، در قاب های شش و هشت طبقه حدود 27% و در تحلیل دینامیکی قاب ها در قاب های دو و چهار طبقه حدود 21%، در قاب های شش طبقه 48% و

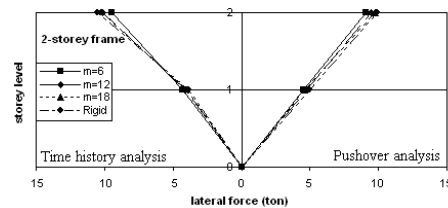


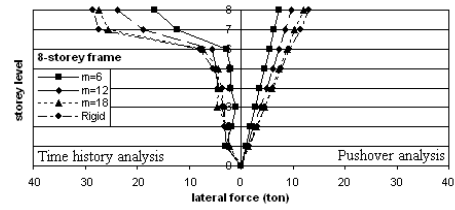
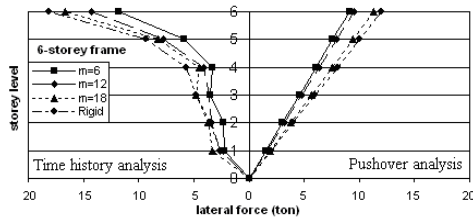
شکل (۵). مقایسه میانگین نتایج تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت و استاتیکی بار افزون برای بیشینه جابجایی نسبی طبقه ای

دینامیکی، در کلیه قاب ها به صورت منحنی بوده و با افزایش ارتفاع در قاب شیب منحنی از حالت ملایم خارج شده و با شیب بیشتری افزایش پیدا می کند. بنابراین می توان گفت که در نظر گرفتن توزیع بار جانبی به صورت مثلث وارونه، برای قاب های با ارتفاع بالا دارای تقریب در جهت عدم اطمینان است.



۳.۵. اثر سختی اتصال بر نیروی جانبی طبقات
شکل ۶ نمودارهای تغییرات نیروی جانبی طبقات را در دو حالت تحلیل استاتیکی بار افزون و دینامیکی تحت شتابنگاشت را نشان می دهد. تغییرات بار جانبی در ارتفاع قاب در تحلیل استاتیکی بار افزون به صورت مثلثی افزایشی می باشد اما این تغییرات، برای تحلیل



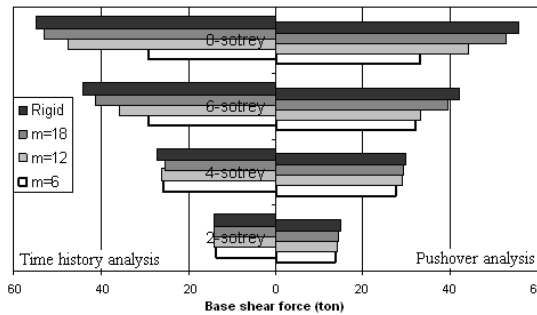


شکل (۶). مقایسه میانگین نتایج تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت و استاتیکی بار افزون برای بیشینه نیروی جانبی طبقات

پایه قاب می شود. این افزایش در تحلیل استاتیکی در قاب های دو طبقه 8%، در قاب های چهار طبقه 12%، در قاب شش طبقه 24% و در قاب هشت طبقه 44% است. همچنین در تحلیل دینامیکی قاب ها این افزایش در قاب های دو و چهار طبقه حدود 8%، در قاب های شش طبقه 24% و در قاب های هشت طبقه 40% است.

۳.۶. اثر سختی اتصال بر نیروی برشی پایه

شکل ۷ مقایسه بین نتایج تحلیل استاتیکی بار افزون با میانگین نتایج حاصل از شتابنگاشت ها را برای بیشینه نیروی برشی پایه قاب های مورد مطالعه در حالت الاستیک نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست افزایش سختی در اتصالات سبب افزایش در نیروی برشی

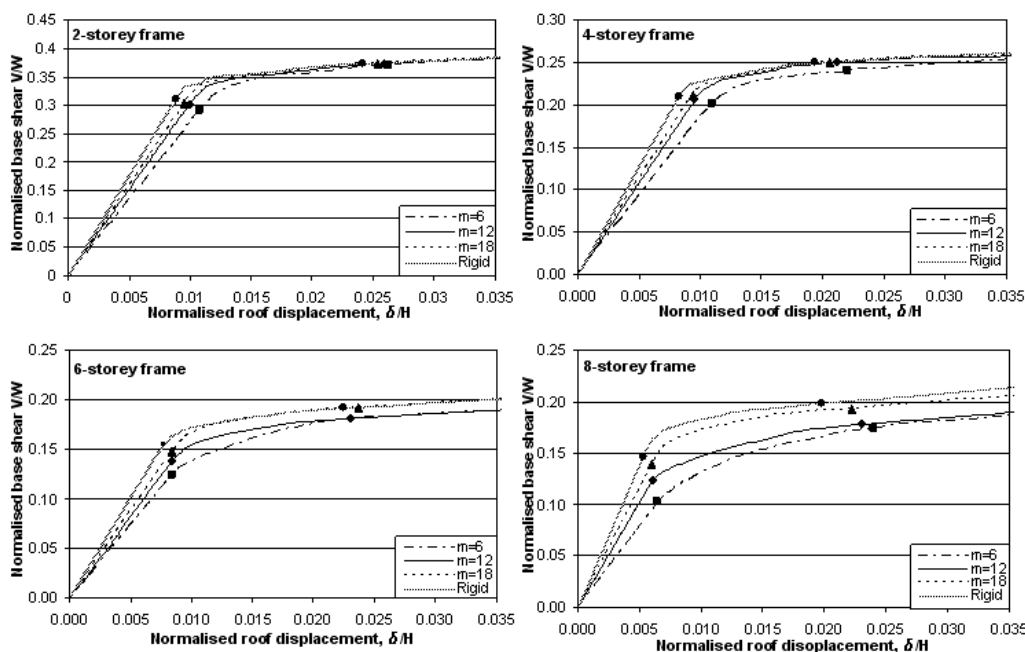


شکل (۷). مقایسه میانگین نتایج تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت و استاتیکی بار افزون برای بیشینه نیروی برشی پایه

حدود 20% کاهش یابد. در حالیکه نیروی برشی پایه ایجاد شده متناظر با بیشینه جابجایی الاستیک قاب حدود 22% و در حالت انهدام 12% افزایش را نشان می دهد. این نشان می دهد که نیروی برشی ایجاد شده در قاب های نیمه صلب در مقایسه با قاب های صلب دارای مقدار کمتری است.

۳.۷. تغییرات نیروی برشی پایه برای بیشینه جابجایی قاب

شکل ۸ نمودار نتایج نیروی برشی نرمال شده در مقابل تغییر مکان بام نرمال شده در قاب های مورد مطالعه را نشان می دهد. افزایش سختی در قاب های مورد مطالعه سبب شده که بیشینه جابجایی قاب در حالت تشکیل اولین مفصل در قاب حدود 18% و در حالت انهدام قاب

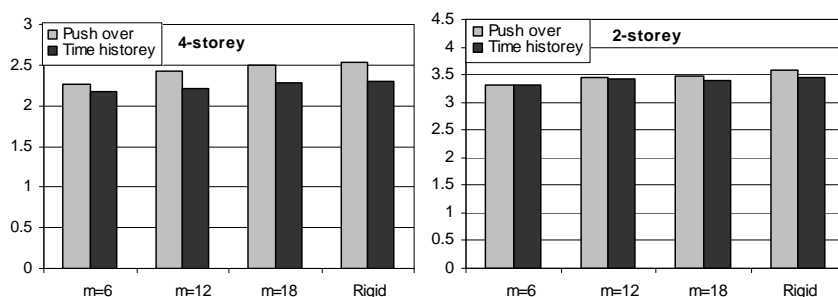


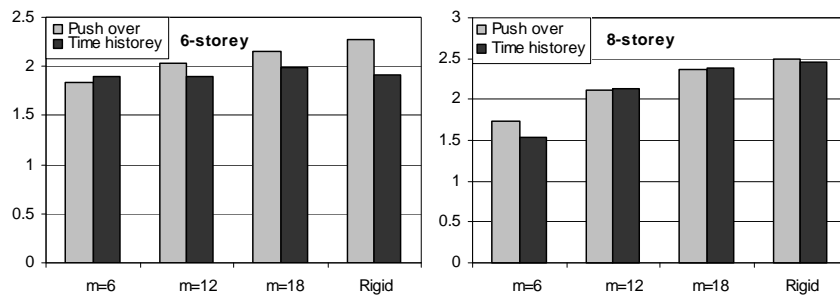
شکل ۸. نمودار تغییرات نیروی برشی پایه نرمال شده بر حسب تغییر مکان بیشینه بام نرمال شده

مقایسه تغییرات ضریب رفتار R در شکل ۱۰ بررسی شده است. تغییرات در این ضریب نسبت به تغییرات سختی نتایج تقریباً یکسانی را در تحلیل استاتیکی بار افزون و میانگین نتایج تحلیل دینامیکی نشان می دهد. با افزایش سختی در اتصالات سختی تغییرات رفتار کاهش پیدا می کند. این کاهش در تحلیل استاتیکی بار افزون حدود ۱۸٪ و در تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت حدود ۲۳٪ است.

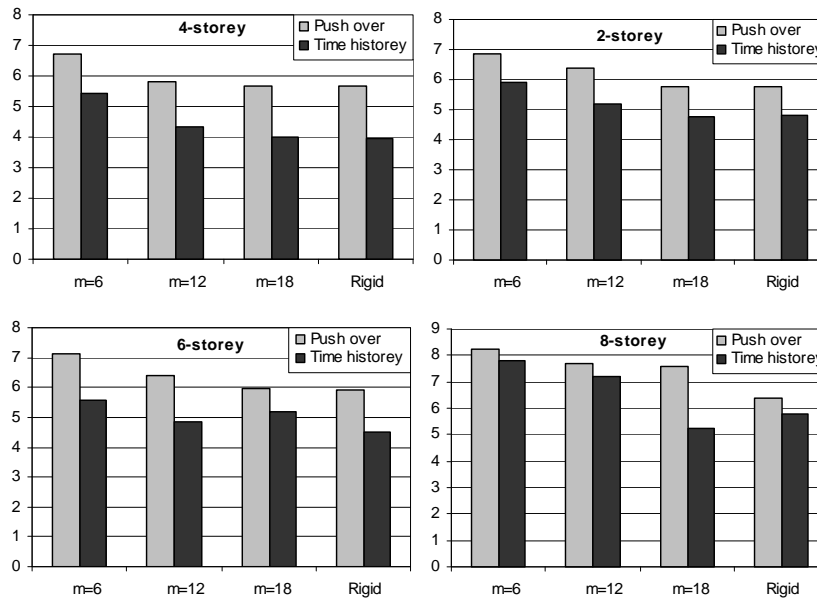
۸.۳ اثر سختی اتصال بر ضریب مقاومت افزون و ضریب رفتار قاب

شکل ۹ نمودار تغییرات ضرایب مقاومت افزون بار طراحی Ω_d در قاب های مورد مطالعه را نشان می دهد. همانطور که پیداست، افزایش سختی اتصالات سبب افزایش ضریب مقاومت افزون بار طراحی قاب ها می شود. این افزایش در تحلیل استاتیکی بار افزون حدود ۲۲٪ و در تحلیل دینامیکی تحت شتابنگاشت حدود ۱۸٪ است.





شکل (۹). ضریب مقاومت افزون بار طراحی (Ω_d) در تحلیل استاتیکی بار افزون و میانگین نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی



شکل (۱۰). ضریب کاهش رفتار (R) در تحلیل استاتیکی بار افزون و میانگین نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی

moment-resisting steel frames with semi-rigid connections; Engineering Structures, 28, 514-531.

- 2- Mazzolani F.M. (2000) Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas, Design and Reliability, E & FN SPON, London, UK.
- 3- Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S. (1993) DRAIN-2DX User Guide V.1.10, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
- 4- PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
- 5- Kim J., Choi H., (2005) Response modification factors of chevron-braced frames, Engineering Structures, 27, 285-300.
- 6- Nader, M.N. and Astanek-Asl, A. (1992) Seismic Behavior and Design of Semi-Rigid Steel Frames, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC92/06, University of California at Berkeley.

نتیجه گیری

استفاده از اتصالات نیمه صلب سبب بهبود رفتار لرزه‌ای قاب می‌شود. تأثیر سختی اتصال در قاب‌های بلند مرتبه بیشتر از قاب‌های کوتاه مرتبه است. در این نوع قاب‌ها بیشترین تغییر مکان نسبی طبقه ای در طبقات میانی قاب رخ می‌دهد. افزایش سختی در اتصالات سبب افزایش نیروی برشی پایه، ضریب مقاومت افزون و کاهش زمان تناوب، جابجایی نسبی و ضریب رفتار در قاب‌ها می‌شود. با افزایش ارتفاع و کاهش سختی اتصال، اختلاف بین نتایج تحلیل استاتیکی بار افزون و تحلیل دینامیکی بیشتر می‌شود. همچنین تأثیر سختی اتصال در اتلاف انرژی به صورت میرایی در قاب‌ها با افزایش ارتفاع بیشتر می‌شود.

مراجع

- 1- Fathi, M., Daneshjoo, F., Melchers, R.E.; (2006) A method for determining the behaviour factor of