



ارزیابی رفتار عملکردی قاب‌های بتن مسلح مقاومسازی شده با مهاربندهای فولادی هم محور

غلامرضا قادری امیری^۱, ابوالفضل غلامرضا تبار^۲, سید علی رضویان امرئی^۳

چکیده

یکی از روش‌های بهسازی لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح استفاده از مهاربندهای فولادی می‌باشد. در این مقاله چند نمونه قاب خمشی بتن مسلح با شکل پذیری متوسط که برای بارهای لرزه‌ای برآورد شده بر اساس «استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش دوم» طراحی گردیده‌اند مدل‌سازی شدند. به منظور ارزیابی قاب‌ها تحت بارهای لرزه‌ای اصلاح شده، مدل‌ها بر اساس «استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش سوم» مجدداً بارگذاری لرزه‌ای گردیدند. تحلیل مجدد قابها حاکی از آن است که نسبت تنشها در اکثر ستون‌ها از یک تجاوز کرده است. قاب‌های بتن مسلح به کمک مهاربندهای فولادی شورون (CBF) بهسازی لرزه‌ای شدند. قاب‌های مقاومسازی شده با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی منطبق بر دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و سطوح عملکرد تامین شده توسط اعضاء ارزیابی شده است. مفاصل پلاستیک تغییرمکانی و سطوح عملکرد بر اساس ضوابط مدل‌سازی غیرخطی اعضاء، مندرج در دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود تعریف شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد روش بکار گرفته شده امکان بهسازی لرزه‌ای قابها را تا سطح عملکرد آستانه فروریزش برای سطح خطر ۱۰ درصد در ۵۰ سال عمر مفید سازه فراهم می‌آورد. نحوه تشکیل و توزیع مفاصل پلاستیک حاکی از مصون ماندن اکثر ستون‌ها در قابهای بلندتر از سه طبقه در این شیوه می‌باشد.

کلمات کلیدی:

ارزیابی لرزه‌ای، قاب بتن مسلح متوسط، مهاربندهای فولادی، سطوح عملکرد

Evaluation of Performance of Reinforced Concrete Frame Retrofitted Using Concentric Steel Bracing

G. Ghodrati Amiri, A. Gholamrezatabar, M S.A. Razavian Amrei

ABSTRACT

One of seismic retrofitting approach of reinforced concrete (RC) frames is using structural steel brace elements. In current paper some existing moment resisting RC frames with intermediate ductility was designed to withstand seismic loads which were predicted by second edition of Standard No. 2800. In other to evaluate rehabilitated RC frames, models were loaded according to third edition of Standard No. 2800. Analyses of frames show stress ratio in most of columns were exceeded allowable value. Selected RC frames were rehabilitated using concentric inverted V-brace elements. Retrofitted frames were evaluated based on Seismic Rehabilitation Code for Existing Building in Iran. Also formation of plastic hinges and provided performance levels were investigated. Displacement control plastic hinges and performance levels of nonlinear modeling criteria were extracted from Seismic Rehabilitation Code. Results present formed plastic hinges with their performance levels and discuss about used seismic retrofitting approach efficiency for hazard level of 10% earthquake probability of acceptance in 50 years.

Key words:

Seismic Evaluation, RC Frame, Performance Level, Concentric Steel Braces

۱. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران ghodrati@iust.ac.ir

۲. کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه شمال - آمل ab@yahoo.com gholamrezatabar

۳. دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران ali_razavian@iust.ac.ir

و امکان ایجاد بازشوها را فراهم می‌آوردند. Badoux و Jirsa [۱] در سال ۱۹۹۰ یک تست بارگذاری سیکلی را روی قاب‌های مقاوم‌سازی شده با مهاربندهای داخل قابی انجام دادند. برخی دیگر از محققین [۵-۶] تاثیر بکارگیری اعضاء خرپایی را برای مقاوم‌سازی قاب بتن مسلح بررسی نمودند. ناطقی الهی [۶] مهاربندهای فولادی داخلی را برای بهبود ظرفیت باربری ساختمان هشت طبقه در ایران به کار برد. Ghobarah و همکارانش [۷] ساختمان‌های بتن مسلح غیرشکل‌پذیر موجود را به کمک مهاربندهای فولادی ۷-معکوس هم محور و برون محور مقاوم‌سازی نمودند. ماهری و کوهساری [۸] یک تست آزمایشگاهی پوش آور را روی قاب‌های بتن مسلح مهاربندی شده با اعضاء فولادی انجام دادند. در این مطالعه به منظور دستیابی اهداف ابتدا قابهای بتن مسلح برای مقاوم‌سازی، بر اساس ویرایش دوم "آین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله" [۹] بارگذاری لرزه‌ای گردیده و طراحی شدند. سپس بارهای لرزه‌ای افزایش یافته که بر اساس استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش سوم [۱۰] محاسبه شده به قابها اعمال گردیدند. آنگاه مهاربندهای فولادی هم محور شورون (۷- معکوس) به قابهای بتنی اضافه شدند. سطح مقطع بادیندها چنان تعیین گردید که نسبت تنشها در ستونها و بادیندها کوچکتر از یک گردد. مقاله حاضر به ارزیابی لرزه‌ای قاب بتنی مقاوم‌سازی شده بر اساس مفاهیم و ضوابط دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانها موجود" [۱۱ و ۱۲] پرداخته و سطوح عملکرد تامین شده توسط اعضاء را در محل تشکیل مفاصل پلاستیک (Local Performance Level) مورد بررسی قرار می‌دهد.

۲- مدل‌سازی

به منظور بررسی اهداف مذکور، قاب‌های بتنی سه، پنج، هفت و ده طبقه با شکل‌پذیری متوسط در نرم‌افزار ETABS [۱۳] مدل سازی شدند. چنان که در شکل (۱) نشان داده شده است ساختمان شامل سه دهانه ۴ متری برابر ۱۲×۱۲ متر در پلان می‌باشد. ارتفاع همه طبقات

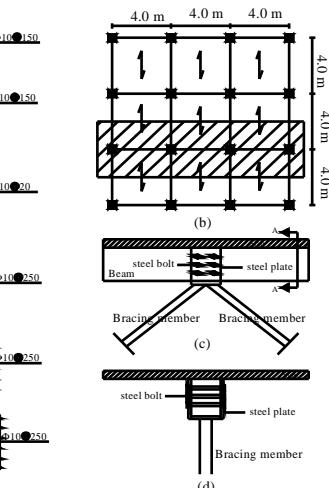
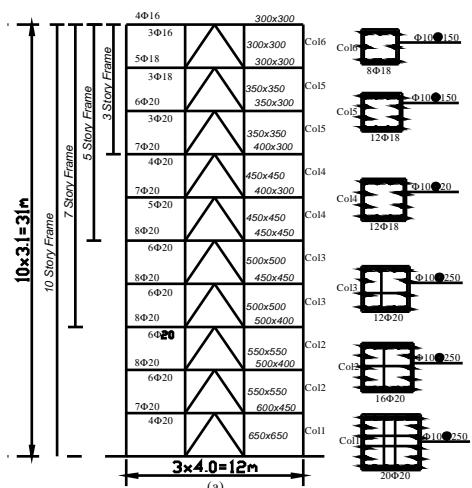
زلزله یکی از پدیده‌های مخرب طبیعی است که تنها طی نیمه قرن اخیر خسارات جانی و مالی زیادی را به جا گذاشته است. کشور ایران به عنوان یکی از کشورهای لرزه‌خیز جهان، طی این دوره دچار خسارات ناشی از این پدیده و عواقب ناشی از آن گردیده است. امکان وقوع زلزله‌های شدید به دلیل شرایط طبیعی زمین ساختاری ایران از یک طرف و همچنین طراحی و ساخت ساختمان‌های بتنی زیادی که ضوابط بارگذاری لرزه‌ای در آنها رعایت نشده است یا به دلیل تغییر این ضوابط، بارهای لرزه‌ای آنها دست پایین برآورد شده از طرف دیگر، ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌ها موجود و نیز بهسازی آنها را ضروری می‌سازد. امروزه یکی از سیستم‌های متداول طراحی ساختمان‌ها در کشور استفاده از سیستم قاب خمثی بتن مسلح می‌باشد. این سیستم به دلیل در دسترس بودن مصالح مورد نیاز و نیز اجراء ساده‌تر به یکی از سیستمهای متداول و مورد نظر در ایران تبدیل شده است. لذا بسیاری از ساختمان‌های ساخته شده در ایران سیستم قاب خمثی بتنی می‌باشد. ارزیابی لرزه‌ای قابهای موجود نشان می‌دهد که به دلیل عدم رعایت ضوابط بارگذاری لرزه‌ای و نیز به خاطر تغییر آین نامه‌ها، ساختمان‌های طرح شده موجود در برابر بارهای لرزه‌ای اصلاح شده مقاوم نمی‌باشند. لذا مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های آینده امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. محققین روشهای مختلفی را برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای قاب‌ها پیشنهاد کردند که هر کدام از آنها دارای مزایا و معایبی می‌باشد. یکی از این روشهای افزودن اعضاء سازه‌ای جدید مانند دیوار برپشی یا مهاربندهای فولادی به ساختمان می‌باشد. استفاده از مهاربندهای فولادی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد؛ چرا که این روش حداقل اضافه وزن را به سازه اعمال می‌کند و ضمناً اجراء آن نسبت به سایر روش‌ها ساده‌تر می‌باشد. همچنین به کارگیری روش مقاوم‌سازی مذکور در مهاربندی‌های نوع ۷ و ۷- معکوس باز و بسته حداقل ممانعت معماري را سبب شده



است، لذا ظرفیت تیرها در آنها قابل ملاحظه می باشد، بنابراین اقدام به نصب مهاربندها به صورت ۷- معکوس گردید تا علاوه بر فراهم آوردن امکان تعییه بازشوها از ظرفیت قابل توجه تیرها نیز استفاده گردد. ضمناً تاکید می گردد که نصب این گونه مهاربندهای با سه اتصال به اعضاء قاب بتن مسلح انجام می گردد که خود از مزیت روش مهاربندی به کار گرفته شده در مقایسه با روش مهاربندی ضربدری می باشد. جزئیات اتصال مهاربندها به تیر در شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. بعد از مدل سازی قاب بتن مسلح در حالت مهاربندی شده و انجام تحلیل سطح مقاطع بادینهای به دست آمده است. بر این اساس ابتدا ابعاد اولیه مهاربندها برای $1/5$ برابر نیروی زلزله به دست آمده آنگاه طی تحلیل های غیرخطی برای رسیدن به توزیع بهتر مقاصل پلاستیک و سطح عملکرد بالاتر آنها، ابعاد اندکی اصلاح گردید.

۳- ارزیابی لرزمای قاب های موجود و مهاربندی شده
بعد از مدل سازی قاب ها و قبل از انجام تحلیل های غیرخطی باید بارهای جانبی بر اساس دستورالعمل محاسبه و به سازه اعمال گردد. همچنین پارامترهای مدل سازی غیرخطی و نیز معیارهای پذیرش بر اساس ضوابط دسته، العما بساز، ل؛ء، ساختمناع، مهـد" [۱۱]

تعریف گردیده است.



شکل (۱) : (a) ابعاد و سطح مقطع تیرها و ستونها در قاب های بتن مسلح مقاوم سازی شده (b) پلان و قاب مورد بررسی (c) جزئیات اتصال مهاربیندها به تیر (d) پرش A-A اتصال

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۱۹

۳-۱-۳- بارگذاری لرزاگی قاب ها

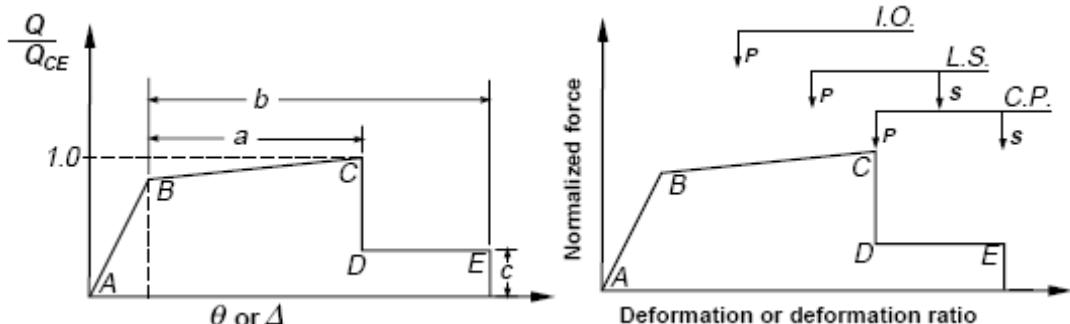
به منظور ارزیابی لرزاگی قاب ها و روش بهسازی به کار گرفته شده، قاب های مهاربندی شده بر اساس دستورالعمل بارگذاری لرزاگی گردیدند. بر این اساس باید حداقل دو نوع توزیع بار جانی بر سازه اعمال گردد:

الف- توزیع مناسب با بارجنبی در روش استاتیکی خطی برای قاب ها با پریود زیر یک ثانیه و توزیع مناسب با تحلیل دینامیکی خطی طیفی برای قاب های باپریود بالای یک ثانیه.

ب- توزیع یکنواخت مناسب با وزن طبقه.

۲-۳- تعریف مفاصل پلاستیک و سطوح عملکرد

مفاصل پلاستیک تغییرمکانی قبل از انجام تحلیل های غیرخطی تعریف می‌گردد. این مفاصل برای مدل سازی غیرخطی اعضاء به کار می‌روند. چنانکه در شکل (۲) نشان



شکل (۲) : نمودار نیرو- تغییرمکان تعیین یافته و سطوح عملکرد متناظر [۱۱]

مهاربندها از فصل پنجم و در تیرها و ستون ها بتئی از فصل ششم این دستورالعمل [۱۱] استخراج گردید. مقادیر در جداول (۱) تا (۳) خلاصه شده است.

در جداول (۱) تا (۳) ρ , ρ' , ρ_{bal} به ترتیب درصد فولادهای کششی، فشاری و تعادل مقطع می‌باشد. V برش طراحی عضو، b_w عرض مقطع، d ارتفاع مقطع و f_c تنش فشاری بتن می‌باشد. P و A_g به ترتیب نیروی فشاری و سطح مقطع ناخالص ستون می‌باشد. مقادیر پارامترهای مدل سازی را می‌توان به طور مستقیم و یا در صورت لزوم با درونیابی خطی از جداول (۱) تا (۳) استخراج نمود. با

تعریف سطوح عملکرد مفاصل پلاستیک نیز بر اساس دستورالعمل انجام گرفته است. این سطوح شامل سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)، سطح عملکرد آستانه فرو ریزش (CP) و سطح عملکرد اینمی جانی (LS)، متناظر با دورانها و تغییر مکانهای پلاستیک اعضاء می‌باشد. این سطوح نیز به برش طراحی عضو، نیروی محوری، خصوصیات هندسی و نیز خصوصیات مکانیکی بتن و درصد میلگردهای طولی وابسته است. پارامترهای مدل سازی و معیارهای کمی پذیرش در روشهای غیرخطی برای تعریف مفاصل پلاستیک و سطوح عملکرد آنها در

طی یک زلزله تجربه کند. تغییر مکان هدف برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های مقاوم‌سازی شده به کار می‌رود. این تغییر مکان بسته به نوع بارگذاری و نیز سطح عملکرد مورد نظر به کمک رابطه پیشنهادی دستورالعمل محاسبه می‌گردد. بر این اساس بارهای جانبی به طور تدریجی افزایش داده شده تا ساختمان به تغییر مکان مورد نظر برسد. این تغییر مکان به صورت فرمول شماره (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۱۱]:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

توجه به حجم زیاد عملیات محاسباتی برای کنترل نسبت ارائه شده برای درصد میلگردها و نسبت برش در همه المانها تحت بارگذاری‌های مختلف، برنامه کامپیوترا در نرم‌افزار Excel [۱۴] تهیه شد تا کنترلهای مورد نیاز را انجام داده و مقادیر پارامترها را برای تیرها، ستون‌ها و مهاربندها به طور مستقیم و یا با درون یابی از جداول (۱) تا (۳) استخراج نماید.

۳-۳- تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover)

براساس تعریف تغییر مکان هدف (Target Displacement) حداقل تغییر مکان نسبی است که ممکن است ساختمان

جدول (۱) : پارامترهای مدل سازی و معیارهای کمی پذیرش برای روش‌های غیرخطی - تیرهای بتن مسلح [۱۱]

تیرهایی که با خمس کنترل می‌شوند			a	b	c	IO	LS	CP
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	آرماتور عرضی	$3.77 \frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}}$						
<=0.0	NC	<=3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02
<=0.0	NC	>=6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01
>=0.5	NC	<=3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01
>=0.5	NC	>=6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005

جدول (۲) : پارامترهای مدل سازی و معیارهای کمی پذیرش برای روش‌های غیرخطی - ستون‌های بتن مسلح [۱۱]

ستونهایی که با خمس کنترل می‌شوند			a	b	c	IO	LS	CP
$\frac{P}{A_g f_c}$	آرماتور عرضی	$3.77 \frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}}$						
<=0.1	NC	<=3	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006
<=0.1	NC	>=6	0.005	0.012	0.2	0.005	0.004	0.005
>=0.4	NC	<=3	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003
>=0.4	NC	>=6	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002

جدول (۳) : ابعاد مهاربندهای فولادی به کار رفته، پارامترهای مدل سازی و معیارهای کمی پذیرش برای روش‌های غیرخطی [۱۱]

پارامترهای مدل‌سازی غیرخطی (BOX) قطعه	d/t	فشاری						کششی					
		a	b	c	IO	LS	CP	a	b	c	IO	LS	CP
80×80×5	16	0.5	7	0.4	0.25	3.00	4.00	11	14	0.8	0.25	7	9
90×90×5	18	0.5	6.37	0.36	0.25	3.68	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9
100×100×8	12.5	0.5	7	0.4	0.25	3.00	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9
120×120×8	15	0.5	7	0.4	0.25	3.00	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9
140×140×10	14	0.5	7	0.4	0.25	3.00	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9
160×160×10	16	0.5	7	0.4	0.25	3.00	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9
160×160×16	11.25	0.5	7	0.4	0.25	3.00	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9
200×200×17.5	11.43	0.5	7	0.4	0.25	3.00	3.61	11	14	0.8	0.25	7	9

۴- ارزیابی نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و سطوح عملکرد آنها در قاب های مقاوم سازی شده

چنانکه در شکل (۳) نشان داده شده بعد از مقاوم سازی قاب ها به کمک مهاربندهای فولادی مفاصل پلاستیک در تیرهای تمام طبقات در تغییر مکان هدف تشکیل شده است. در بارگذاری نوع اول بیشترین خسارات بعد از مقاوم سازی قاب ها متوجه تیرها بوده و عموماً ستون ها تحت این بارگذاری از خسارات مصون ماندند. در اکثر موارد اعضاء توانسته اند سطح عملکرد CP را تامین نمایند. حداکثر خسارات در تیرهای دهانه مهاربندی شده مشاهده شده است که حداقل سطح عملکرد را نشان می دهند. مهاربندهای فشاری در تمام طبقات دچار کمانش شده اند. مشاهده بارگذاری گام به گام حاکی از آن است که با کمانش مهاربندها، مفاصل پلاستیک در تیرهای دهانه مهاربندی شده ایجاد می گردد و با افزایش تدریجی بار دورانهای پلاستیک تیرهای دهانه میانی افزایش یافته و با تداوم بارگذاری جانی مفاصل پلاستیک به تیرهای مجاور گسترش می یابد. مهاربندهای کششی طبقه سوم در پوش نوع اول در تغییر مکان هدف جاری شدند.

در بارگذاری نوع دوم یا بارگذاری متناسب با وزن طبقات شکل (۳)، حداکثر خسارات متوجه پای ستون های طبقه اول می باشد. سطح عملکرد تامین شده در محل تشکیل مفاصل پلاستیک حاکی از آن است که این ستون ها خسارات قابل توجهی خواهند دید. در این نوع بارگذاری و در پوش نوع اول مهاربند کششی طبقه اول جاری شده است. قاب پنج طبقه مهاربندی شده طی مراحل مشابه با قاب سه طبقه ارزیابی لرزه ای گردید. نتایج نشان می دهد شکل (۴) که همچنان بیشترین خسارات در تیرهای دهانه مهاربندی شده ایجاد می گردد. البته توزیع مفاصل پلاستیک و سطح عملکرد آنها خسارات را در حد قابل قبول و کنترل شده ارزیابی می کند. حداقل سطح عملکرد تامین شده توسط اعضاء CP می باشد.

که در آن C_0 ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی، C_1 ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکانهای غیر ارتجاعی سیستم، C_2 ضریب اصلاح برای اعمال اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضاء سازه ای بر پاسخ تغییر مکانهای حداکثر به دلیل رفتار چرخشی آنها، C_3 ضریب اصلاح برای اعمال اثرات P-Δ با رفتارهای غیر ارتجاعی مصالح، S_a شتاب طیفی و T_e زمان تناوب موثر اصلی ساختمان در جهت مورد بررسی می باشد.

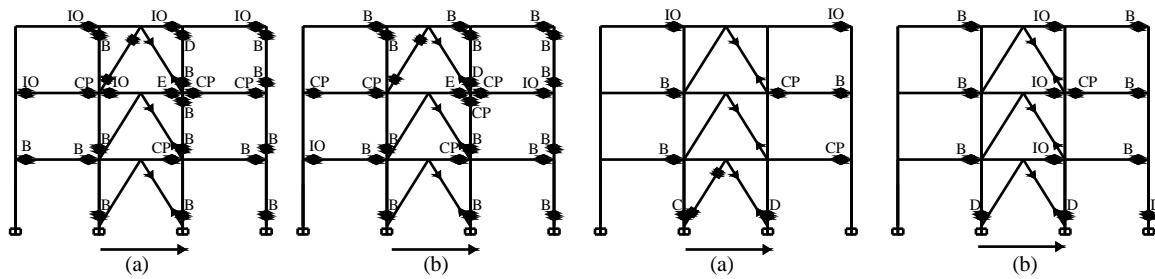
به منظور محاسبه تغییر مکان هدف یک تحلیل استاتیکی غیر خطی اولیه انجام گرفته، آنگاه بر اساس نمودار برش پایه در مقابل تغییر مکان، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه تغییر مکان هدف تعیین می گردد. بر این اساس پارامترهای C_3 تا C_0 از دستورالعمل بهسازی لرزه ای استخراج شده و مقادیر تغییر مکان هدف برای انجام تحلیل های استاتیکی غیر خطی محاسبه شده و در جدول (۴) آورده شده است. ترکیبات بارگذاری ثقلی و جانی در تحلیل های انجام گرفته منطبق بر ضوابط "دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود" بوده که حد بالا و پایین اثرات بار ثقلی، Q_G ، در دستورالعمل به صورت زیر داده شده است:

$$Q_G = 1.1(Q_D + Q_L)$$

$$Q_G = 0.9Q_D$$

که در آن Q_D بار مرده و Q_L بار زنده موثر بر اساس استاندارد ۵۱۹ می باشد.

بدین ترتیب برای ارزیابی لرزه ای قاب های مهاربندی شده برای هر نوع بارگذاری دو نوع تحلیل پوش آور انجام گرفته است که بار جانی به دنبال هر یک از پوش های بار ثقلی فوق اعمال می گردد.

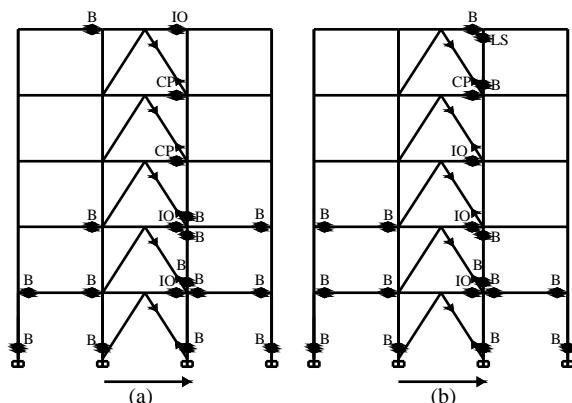


بارگذاری نوع اول

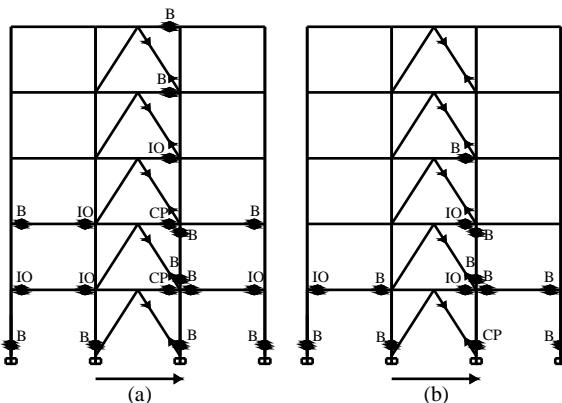
بارگذاری نوع دوم

شکل(۴). پایین ترین سطح عملکرد تامین شده در محل تشکیل مفاصل پلاستیک، سطح عملکرد CP می باشد. در هیچ یک از بارگذاری ها مهاربند های کششی جاری نشدن. برای درک بهتر عملکرد روش مقاوم سازی به کار گرفته شده قابهای هفت و ده طبقه نیز ارزیابی لرزه ای شده است ، اشکال (۵) و (۶).

مفاصل پلاستیک در تیرهای طبقات میانی سطح عملکرد پایین تری را نشان می دهد بدین معنی که در این طبقات میزان دوران ها و تغییر مکان های پلاستیک بیشتر بوده است. کمانش مهاربند ها در تمام طبقات دیده می شود. به مانند قاب سه طبقه در بارگذاری مناسب با وزن طبقات خسارات در پای ستون های طبقه اول دیده می شود

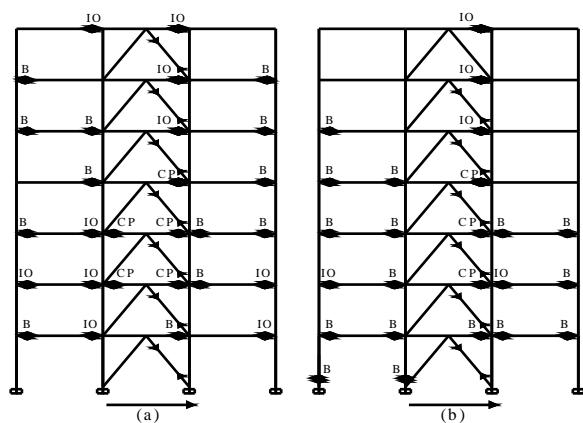


بارگذاری نوع اول

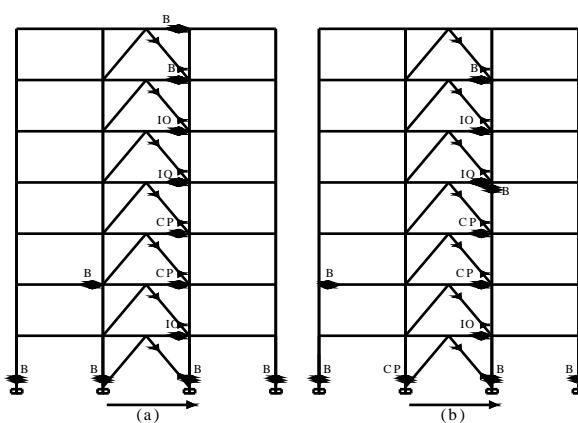


بارگذاری نوع دوم

شکل(۴) : نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و سطح عملکرد اعضاء (a)پوش نوع اول (b)پوش نوع دوم- قاب پنج طبقه

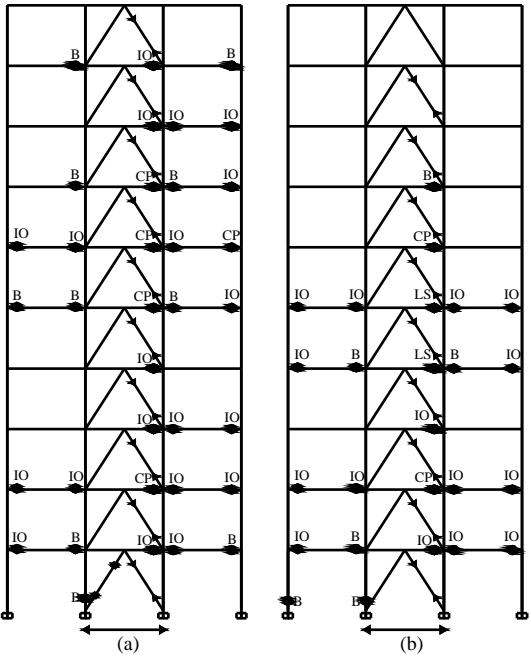


بارگذاری نوع اول

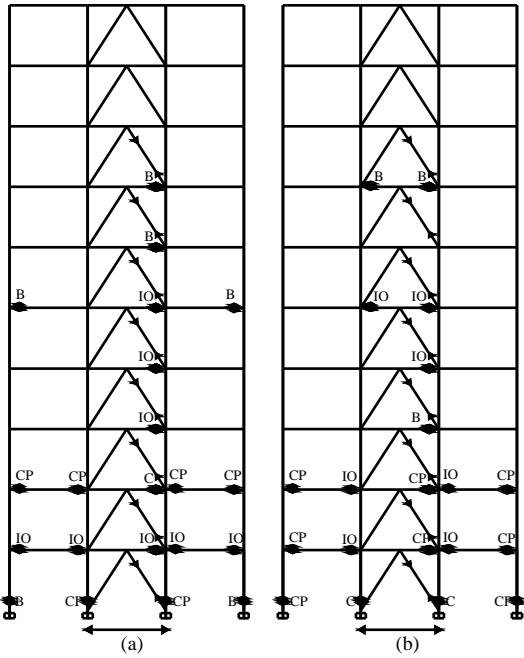


بارگذاری نوع دوم

شکل(۵) : نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و سطح عملکرد اعضاء (a)پوش نوع اول (b)پوش نوع دوم- قاب هفت طبقه



بارگذاری نوع اول



بارگذاری نوع دوم

شکل (۶) : نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و سطح عملکرد اعضاء (a) پوش نوع اول (b) پوش نوع دوم - قاب ده طبقه

۵- نتایج

نتایج حاکی از آن است که:

- ۱- افزودن مهاربندهای فولادی به قابهای بتنی، بارهای خمشی واردہ بر ستونها را محوری نموده لذا نسبت تنشها را در آنها به کمتر از یک تقلیل می‌دهد.
- ۲- محوری شدن بارهای لرزه‌ای علاوه بر کاهش نسبت تنش‌ها در ستون‌ها به تنش مجاز، سبب انتقال مفاصل پلاستیک از ستون‌ها به تیرها شده است. لذا بیش از ۸۰٪ ستون‌ها در قابهای بلندتر از سه طبقه در این شیوه مقاوم‌سازی از خسارات شدید مصون ماندند.
- ۳- بدلیل کمانش و جاری مهاربندها در قاب سه طبقه بیش از ۶۰٪ ستونها صدمه دیده‌اند.
- ۴- در بارگذاری نوع اول بیشترین خسارات در تیرهای دهانه مهاربندی شده مشاهده گردید، به طوری که در ۱۰۰٪ این تیرها مفاصل پلاستیک با سطح عملکرد CP یا بالاتر تشکیل گردید.
- ۵- در بارگذاری نوع دوم خسارات در پای ستون‌های طبقه اول ایجاد می‌گردد. البته مفاصل پلاستیک تشکیل

نتایج ارزیابی لرزه‌ای قاب هفت و ده طبقه حاکی از آن است که بیشترین خسارات در تیرهای طبقات میانی و در دهانه‌های مهاربندی شده ایجاد گردیده است، اشکال (۵) و (۶). مفاصل پلاستیک تشکیل شده در این تیرها در سطح عملکرد CP باقی ماندند. البته با افزایش بار تا رسیدن به تغییر مکان هدف مفاصل پلاستیک به تیرهای مجاور نیز گسترش می‌یابند. مشاهده گام به گام توزیع خسارات نشان می‌دهد که مفاصل پلاستیک بعد از تیرهای دهانه مهاربندی، در تیرهای طبقاتی که تغییر مکان نسبی آنها بیشتر است ایجاد می‌گردد. مهاربند طبقه آخر در قاب ده طبقه دچار کمانش نشده است که حاکی از اضافه مقاومت طبقه آخر در این قاب‌ها می‌باشد. ضمناً حذف این مهاربندها سبب تشکیل مفاصل پلاستیک با سطح عملکرد IO در تیرهای طبقه آخر می‌گردد. بارگذاری نوع دوم سبب ایجاد مفاصل پلاستیک در پای ستون‌های طبقه اول با سطح عملکرد CP و گاه پایین‌تر شده است.

قباب به تغییر مکان هدف اتفاق می‌افتد (بین ۷۰٪ تا ۷۵٪ تغییر مکان هدف)، اما مهاربندهای کششی بندرت جاری شدند.

شده در ۹۵٪ موارد سطح عملکرد CP را تامین می‌کنند. قاب سه طبقه از این قاعده مستثنی می‌باشد.
۶- کمانش مهاربندها در اکثر طبقات قبل از رسیدن

مراجع:

- ۹- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «آینین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)- ویرایش دوم»، ۱۳۷۸.
- ۱۰- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، «آینین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)- ویرایش سوم»، ۱۳۸۴.
- ۱۱- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، «دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود (نشریه شماره ۳۶۰)»، ۱۳۸۵.
- ۱۲- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، «تفسیر دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود»، ۱۳۸۱.
- 13- Computer & Structure Inc, ETABS Structural Program, 2000, Berkeley, California.
- 14- Microsoft Office Software Corporation, EXCEL, 2007.

- 1- Badoux M, Jirsa JO. Steel bracing of RC frames for seismic retrofitting. *J Structural Engineering ASCE* 1990; 116(1): 55–74.
- 2- Higashi Y, Endo T, Shimizu Y. Experimental studies on retrofitting of reinforced concrete structural members. In: Proceedings of the second seminar on repair and retrofit of structures. Ann Arbor (MI): National Science Foundation; 1981. p.p. 126–155.
- 3- Rodriguez M, Park R. Repair and strengthening of reinforced concrete buildings for seismic resistance. *Earthquake Spectra* 1991; 7(3): 439–459.
- 4- Masri AC, Goel SC. Seismic design and testing of an RC slab–column frame strengthened by steel bracing. *Earthquake Spectra* 1996; 12(4): 645–666.
- 5- Ohishi H, Takahashi M, Yamazaki Y. A seismic strengthening design and practice of an existing reinforced concrete school building in Shizuoka city. In: Proceedings of the ninth world conference on earthquake engineering. Vol. VII. 1988. p.p. 415–420.
- 6- Nateghi-Alahi F. Seismic strengthening of eight-storey RC apartment building using steel braces. *Engineering Structure* 1995; 17(6): 455–461.
- 7- Ghobarah A., Abou Elfatih H. Rehabilitation of a reinforced concrete frame using eccentric steel bracing. *Engineering Structure* 2001; 23:745–755
- 8- Maher MR, Kousari R, Razazan M. Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames. *Engineering Structure* 2003; 25(13): 1697–1705.