

کنترل پیش ساختمان های یک طبقه ای نامتقارن جرمی توسط میراگرهای اصطکاکی

جمال الدین بزرویی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

عبدالرضا سروقدمقدم* (استادیار)

بزهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

مطالعات گذشته حاکی از عملکرد مثبت میراگرهای اصطکاکی در کنترل پیش سازه های نامتقارن است. هدف از این مطالعه تعیین پارامترهای مؤثر و مقدار آن ها در کنترل پیش سازه ای نامتقارن جرمی توسط میراگرهای اصطکاکی است. برای این منظور ساختمان های فولادی براساس یک مدل متقارن پایه و به ازای خروج از مرکزیت های مختلف جرمی، توزیع های مختلف میراگر و مشخصات میراگر اصطکاکی و مهاربندهای متصل به میراگر اصطکاکی توسط نرم افزار OpenSees مدل شده و مورد تحلیل قرار گرفته اند. پاسخ های حاصل از ساختمان مجهز به میراگر برای حالات مختلف توزیع مقایسه شده اند و پارامترهای مؤثر و مقدار آن ها در رفتار نظیر حالات بهینه وضعیت قرارگیری میراگرها، بار لغزشی بهینه میراگر اصطکاکی، مهاربند متصل به میراگر اصطکاکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت می توان نتیجه گرفت چنانچه پارامترهای ذکر شده در حالت بهینه در سازه ای نامتقارن مورد استفاده قرار گیرد، میراگرهای اصطکاکی توانایی کنترل پیش ضعیف و قوی سازه های نامتقارن را دارند.

واژگان کلیدی: پیش سازه، ساختمان نامتقارن، استهلاک انرژی، میراگر اصطکاکی، خروج از مرکزیت جرمی.

a.borzouie@iiees.ac.ir
a.sarvghad.moghadam@gmail.com

۱. مقدمه

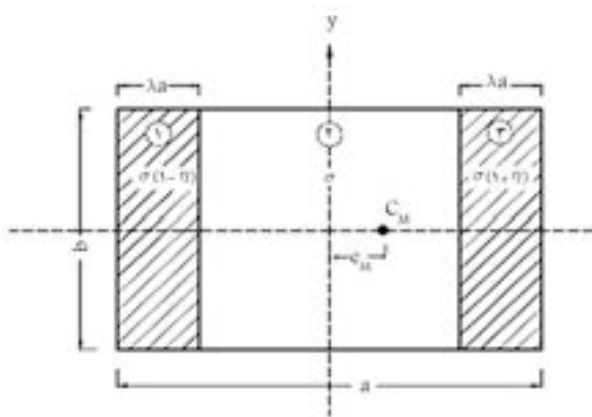
نتایج حاصل از زلزله های گذشته نشان از تمرکز تغییر شکل های خمیری و غیرخمیری در تعدادی از اعضای سازه ای نامتقارن دارد. راه حل آیین نامه ها برای بهبود عملکرد سازه های نامتقارن مبتنی بر تغییر سختی و مقاومت اعضای سازه ای برای افزایش ظرفیت آن در برابر نیروهای حاصل از پیش در زلزله است.^[۱] با توجه به تمرکز تغییر شکل ها در لبه ای نرم، اعضای واقع در این لبه زودتر به تسلیم می رسند و این باعث افزایش خروج از مرکزیت سختی و مقاومت به سمت لبه ای سخت می شود. بنابراین در زلزله ها از اعتبار روش فوق کاسته می شود. لبه ای از دیافراگم که مرکز جرم بین آن لبه و مرکز دوران قرار دارد به عنوان «لبه ای نرم» و لبه ای مقابل به عنوان «لبه ای سخت» نام گذاری می شود. اما روش دیگر، استفاده از مستهلک کننده های انرژی -- نظیر میراگرهای اصطکاکی -- برای تعادل پیشی در سازه های نامتقارن است.

بعد از معرفی اولین میراگر در سال ۱۹۸۲، ساخت انواع میراگرهای اصطکاکی و کاربرد آن ها در بهبود عملکرد سازه گسترش روزافزون یافت.^[۲] در سال ۱۹۸۹

اتصالات پیچ دار و شیاردار مبتنی بر استهلاک انرژی بین ورق های فولادی معرفی شد.^[۳] در سال ۲۰۰۰ نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی با عملکرد مبتنی بر اصطکاک حاصل از دوران مهاربند در قسمت اتصال معرفی شد.^[۴] سازه های مجهز به میراگرهای اصطکاکی به دلیل سختی حاصل از مهاربند تا قبل از لغزش در میراگرهای اصطکاکی و استهلاک انرژی بعد از آن، در زلزله های شدید عملکرد مناسبی نشان داده اند. با معرفی میراگرهای اصطکاکی مختلف، مطالعه ای عملکرد و اصول طراحی سازه ای مجهز به میراگر اصطکاکی گسترش یافت. در سال ۱۹۹۳ محققین به تبیین میرایی بهینه برای یک سازه پرداختند.^[۵] در سال ۱۹۹۳ نیز روشی برای تخمین سریع بار لغزشی میراگرهای اصطکاکی ارائه شد.^[۶] پس از آن در سال ۲۰۰۰ مطالعاتی در زمینه طراحی سازه های مجهز به میراگرهای اصطکاکی، با استفاده از روش بار جانبی انجام شد.^[۷] در ادامه محققین روشی برای طراحی قاب های مهاربندی شده به وسیله میراگرهای اصطکاکی براساس رکورد های مختلف زلزله ارائه کردند.^[۸] همچنین در سال ۲۰۰۶ روشی برای بهسازی سازه های مجهز به میراگر اصطکاکی براساس جابه جایی طبقه ای آخر مطرح شد.^[۹] کاربرد میراگر اصطکاکی برای کنترل پیش سازه ای نامتقارن نیز مورد توجه تعدادی از محققین بوده است. در سال های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۰ مطالعاتی در زمینه ی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۵/۱۴، اصلاحیه ۱۳۸۹/۵/۱۸، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۲۷



شکل ۲. پلان سازه با خروج از مرکزیت جرمی.

می‌شود نخست جرم سازه به‌طور یکنواخت با چگالی سطحی σ در پلان توزیع شده است و سپس چگالی سطحی نواری با عرض مشخص در سمت راست سازه افزایش یافته و چگالی سطحی نواری در سمت مقابل آن به‌همان میزان کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که جرم کل پلان ثابت باقی می‌ماند. پلان سازه به ابعاد a در جهت x ، و b در جهت y مطابق شکل ۲ با چگالی جرمی σ مد نظر است.

مبدأ مختصات در مرکز سطح در نظر گرفته شده، و مقدار چگالی سطحی در نواری به عرض λa ($0 < \lambda < 0.5$) -- در سمت راست سازه -- برابر $\sigma(1 + \eta)$ و در نواری سمت مقابل آن برابر $\sigma(1 - \eta)$ فرض می‌شود. در این روابط عبارت η ($-1 < \eta < 1$) نشان‌گر مقدار افزایش چگالی است. در این حالت مقدار خروج از مرکزیت نرمالیزه شده نسبت به مرکز مختصات مطابق معادله ۱ است. بیشینه خروج از مرکزیت جرمی با مشتق‌گیری از معادله ۱ به‌ازای $\eta = \pm 1$ و $\lambda = 0.5$ برابر $e_m = \pm 0.25$ خواهد شد. مدل‌های نامتقارن براساس خروج از مرکزیت جرمی در جهت X - ایجاد شده‌اند. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. در این جدول e_m خروج از مرکزیت جرمی، T_y زمان تناوب جانبی، T_θ زمان تناوب پیچشی و T_1, T_2 زمان تناوب اول و دوم سازه است. با مقایسه T_y و T_θ درمی‌یابیم که تمام مدل‌ها سخت پیچشی‌اند. مقدار ممان اینرسی حول مرکز جرم ثانویه مطابق معادله ۲ و ۳ است: [۱۶]

$$e_m = \frac{1}{a} \left(\frac{\sigma(1 + \eta)\lambda ab \times \left(\frac{a}{\lambda} - \frac{\lambda a}{\lambda}\right) + \sigma(1 - \eta)\lambda ab \times \left(-\frac{a}{\lambda} + \frac{\lambda a}{\lambda}\right)}{\sigma ab} \right) = \eta\lambda(1 - \lambda) \quad (1)$$

$$I_{CM} = I_{1CM} + I_{2CM} + I_{rCM} \quad (2)$$

$$I_{CM} = M_1 \left[\frac{(\lambda^2 a^2 + b^2)}{12} + \left(\frac{a}{\lambda} - \frac{\lambda a}{\lambda} + ae_m\right)^2 \right] + M_2 \left[\frac{(a - 2\lambda a)^2 + b^2}{12} + a^2 e_m^2 \right] + M_3 \left[\frac{(\lambda^2 a^2 + b^2)}{12} + \left(\frac{a}{\lambda} - \frac{\lambda a}{\lambda} - ae_m\right)^2 \right] \quad (3)$$

که در آن I_{1CM} و I_{2CM} و I_{rCM} به‌ترتیب ممان اینرسی جرمی بخش‌های ۱، ۲ و ۳ است. شکل ۳ تغییرات I_{CM} را برحسب e_m برای سازه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد. یادآور می‌شود که I_{CM} مستقل از λ است.

کنترل پیش‌سازه‌ی نامتقارن به‌وسیله‌ی میراگر اصطکاکی انجام شد که نتایج آن منجر به ارائه‌ی مکان بهینه‌ی میراگر و بار لغزشی بهینه شد. [۱۱] در سال ۲۰۰۵ نیز مطالعاتی پیرامون کنترل پیش‌سازه‌ی نامتقارن با استفاده از میراگرهای اصطکاکی انجام شد که به معرفی مرکز تعادل تجربی به‌عنوان شاخص مناسب عملکرد سازه‌ی مجهز به میراگر اصطکاکی و بررسی مکان بهینه‌ی مرکز تعادل تجربی منجر شد. [۱] این مطالعه در ادامه‌ی مطالعات مربوط به کنترل پیش‌سازه‌ی نامتقارن، که پیش‌تر در زمینه‌ی سازه‌های با خروج از مرکزیت سختی گزارش شده، انجام شده است. [۱۲] در این مطالعه عملکرد میراگرهای اصطکاکی و مهاربندهای متصل به میراگرهای اصطکاکی در تعادل پیش‌سازه‌های نامتقارن جرمی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور میراگرهای اصطکاکی با بارهای لغزشی متفاوت، چیدمان‌های مختلف، و سختی مهاربندهای مختلف متصل به میراگرهای اصطکاکی -- به‌منظور کنترل پیش‌سازه‌ی نامتقارن با خروج از مرکزیت‌های جرمی مختلف -- اضافه شده و توسط برنامه‌ی OpenSees تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تحت هفت زلزله‌ی مختلف بر روی آن‌ها انجام شده است. [۱۳] در نهایت بار لغزشی و مرکز بار لغزشی بهینه‌ی میراگرهای اصطکاکی و سختی بهینه‌ی مهاربندهای متصل به میراگرهای اصطکاکی برای تعادل پیش‌سازه‌ی ضعیف و قوی سازه با خروج از مرکزیت‌های جرمی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل‌های تحلیلی

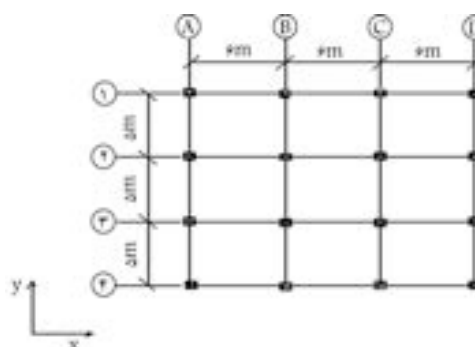
۲.۱. مدل متقارن پایه

در این مطالعه سازه‌ی فولادی قاب خمشی با مهاربند مجهز به میراگر اصطکاکی در طبقه‌ی به‌ارتفاع ۳/۳ متر که در هر راستا ۳ دهانه دارد مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).

سازه‌ی اولیه به‌صورت قاب خمشی متوسط براساس آیین‌نامه‌ی فولاد ایران و آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ زلزله‌ی ایران برای حالت متقارن در منطقه‌ی با پهنه‌ی خطر نسبی بسیار زیاد ($A = 0.35 g$) و خاک سخت ($T_s = 0.5 sec$) طراحی شده است. [۱۴] در این طراحی از ضوابط کاهش برش پایه برای سیستم‌های مجهز به میراگر براساس آیین‌نامه‌ی FEMA ۴۵۰ (۲۰۰۳) استفاده شده است. [۱۵]

۲.۲. مدل‌های نامتقارن

به‌منظور ایجاد خروج از مرکزیت جرمی، جابه‌جایی مرکز جرم سازه نسبت به مرکز سطح ضروری است. در این تحقیق برای ایجاد نامتقارنی جرمی حول محور y فرض



شکل ۱. پلان سازه‌ی مورد مطالعه.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های ۱ تا ۶.

شماره مدل	e_m %	مقاومت جاری شدن (ton)	T_y (sec) (غیرهمبسته)	T_θ (sec) (غیرهمبسته)	T_1 (sec)	T_p (sec)
۱	-۵%	۱۵۲٫۸	۰٫۳۸۴	۰٫۲۹۸	۰٫۳۸۹	۰٫۲۹۶
۲	-۱۰%	۱۵۲٫۸	۰٫۳۸۴	۰٫۲۹۵	۰٫۴۰۳	۰٫۲۸۷
۳	-۱۵%	۱۵۲٫۸	۰٫۳۸۴	۰٫۲۹	۰٫۴۲۱	۰٫۲۷۷
۴	-۲۰%	۱۵۲٫۸	۰٫۳۸۴	۰٫۲۸۴	۰٫۴۴۳	۰٫۲۶۶
۵	-۲۵%	۱۵۲٫۸	۰٫۳۸۴	۰٫۲۷۷	۰٫۴۶۸	۰٫۲۵۶

خروج از مرکزیت بار لغزشی، چهار روش برای استقرار میراگرهای اصطکاکی در سازه‌ی نشان داده شده در شکل ۱ می‌توان متصور شد:

- الف) برای خروج از مرکزیت بار لغزشی ۵۰٪ که در این حالت تنها قاب در راستای D مجهز به میراگر اصطکاکی است؛
- ب) برای خروج از مرکزیت بار لغزشی ۳۸٪ تا ۵۰٪ که در این حالت قاب‌های در راستای C, D مجهز به میراگر اصطکاکی است؛
- ج) برای خروج از مرکزیت بار لغزشی ۲۷٪ تا ۳۸٪ که در این حالت قاب‌های در راستای B, C, D مجهز به میراگر اصطکاکی است؛
- د) برای خروج از مرکزیت بار لغزشی ۰٪ تا ۳۸٪ که در این حالت قاب‌های در راستای A, B, C, D مجهز به میراگر اصطکاکی است.

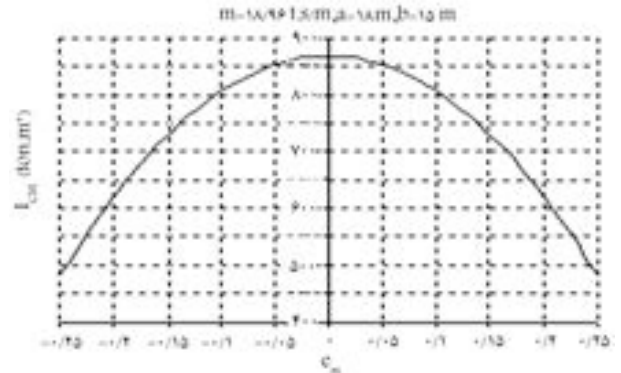
به منظور بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی، مرکز بار لغزشی بین $e_d = +0,5D$ تا $-0,5D$ تغییر می‌کند. مرکز بار لغزشی در هر مرحله برابر است با:

$$e_d = \frac{1}{\sum SL_i} \left(\sum_{i=1}^4 SL_i \times X_i \right) \quad (4)$$

که در آن SL برابر بار لغزشی میراگر اصطکاکی (تن) و X فاصله‌ی میراگر اصطکاکی (متر) و مرکز سطح و D بعد سازه (متر) در جهت X است. بنابراین توزیع میراگرهای اصطکاکی مطابق شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل ۴ در هر مرحله، بار لغزشی میراگر ۱ براساس درصدی از مقاومت جانبی کل سازه اختصاص می‌یابد و در مرحله‌ی بعد به‌ازای $-0,5D \leq e_d \leq +0,5D$ با گام‌های $\Delta e_d = 0,55D$ مرکز بار لغزشی و در نتیجه بار لغزشی میراگرهای شماره‌ی ۲، ۳ و ۴ تغییر می‌یابد. به‌عنوان مثال در حالت خروج از مرکزیت بار لغزشی +۴ متر که در قسمت IV شکل ۴ قرار می‌گیرد، تمام دهانه‌ها مجهز به میراگر اصطکاکی است و با فرض توزیع خطی بار لغزشی بین میراگرهای اصطکاکی و بار لغزشی بیشینه‌ی معادل ۱۰ تن، توزیع بار لغزشی بین میراگرهای اصطکاکی مطابق شکل ۵ است.

۴.۲. مدل‌سازی میراگر اصطکاکی

برای مدل‌سازی میراگر اصطکاکی، لازم است میراگر اصطکاکی و مهاربند به‌صورت یک المان ترکیبی در نظر گرفته شود. تا قبل از لغزش میراگر اصطکاکی، سختی المان کل برابر سختی مهاربند است. بعد از لغزش، سختی مجموع صفر است. همچنین با توجه به این که بار لغزشی در میراگر در بیشترین حالت کم‌تر از بار کم‌انشی مهاربند فرض شده، نقطه‌ی تسلیم این المان دوخطی برابر بار لغزشی میراگر

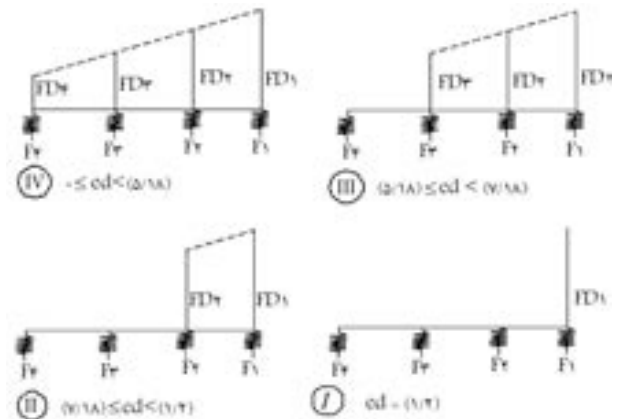


شکل ۳. منحنی تغییرات ICM بر حسب e_m .

۳.۲. توزیع میراگرها

میراگرهای اصطکاکی با استقرار در مهاربندها راستای Y به سیستم اضافه شده‌اند. پیش‌فرض‌های توزیع میراگرها بین مدل‌های مختلف عبارت است از:

- ۱. با گذشت زمان، تغییرات دما و اثرات محیطی باعث تغییر در مقدار بار لغزشی به‌میزان حداکثر ۱۵٪ \pm می‌شود. بنابراین بار لغزشی نهایی میراگرهای اصطکاکی ۱۵٪ کم‌تر از بار کم‌انشی مهاربند فرض می‌شود.
- ۲. برای اعمال خروج از مرکزیت بار لغزشی، توزیع بار لغزشی بین میراگرهای اصطکاکی مطابق شکل ۴ به‌صورت خطی فرض شده است. براساس مقدار



شکل ۴. توزیع میراگرها براساس مکان مرکز بار لغزشی با فرض توزیع خطی بار لغزشی بین میراگرهای اصطکاکی.

نوع دورازگسل^۱ بوده و بر روی خاک سخت نوع B (طبق مشخصات NEHRP) برداشت شده‌اند.

۳. نتایج تحلیل

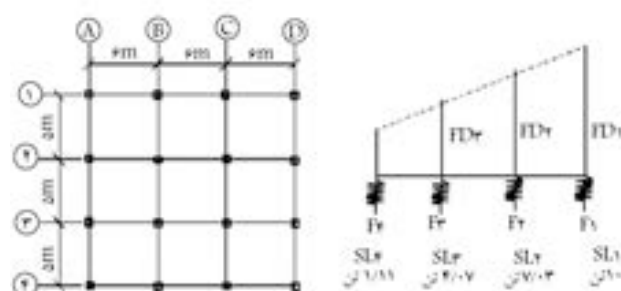
برای بررسی عملکرد میراگر اصطکاکی، مدل‌های ۱ تا ۵ طبق جدول ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر مدل مرکز بار لغزشی از ۹- متر تا ۹+ متر (۱۹ نقطه) تغییر می‌کند، و بار لغزشی میراگر ۱ (بیشترین بار لغزشی در هر مرحله) برابر نسبتی از مقاومت جانبی کل سازه، و در هر مدل مهاربند با سه نسبت سختی مهاربند به قاب در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تعادل پیشگی ضعیف در سازه نامتقارن، اختلاف بیشینه تغییر مکان لبه‌ی نرم و سخت در حالت سازه‌ی مجهز به میراگر اصطکاکی نسبت به سازه‌ی بدون میراگر اصطکاکی (معادله ۵) مورد مطالعه قرار گرفت؛ همچنین برای بررسی تعادل پیشگی قوی، دوران مرکز هندسی در حالت سازه‌ی مجهز به میراگر اصطکاکی نسبت به سازه‌ی بدون میراگر اصطکاکی (معادله ۶) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. u_{right} تغییر مکان لبه‌ی سخت، u_{left} تغییر مکان لبه‌ی نرم و θ_{cm} دوران مرکز هندسی است. تحلیل‌ها در مورد هفت زلزله انجام شده و نتایج حاصله میانگین حاصل از این هفت زلزله است.

در شکل ۷ پاسخ بهینه‌ی سازه (اختلاف تغییر مکان دو لبه و دوران مرکز سطح) برای مقادیر مختلف بار لغزشی و سختی مهاربند مختلف در خروج از مرکزیت جرمی ۵٪ تا ۲۵٪ نشان داده شده است. پاسخ بهینه عبارت است از کم‌ترین پاسخ سازه برای بار لغزشی، سختی مهاربند و خروج از مرکزیت جرمی ثابت برای مرکز بار لغزشی مختلف (۹m، -۹m) است.

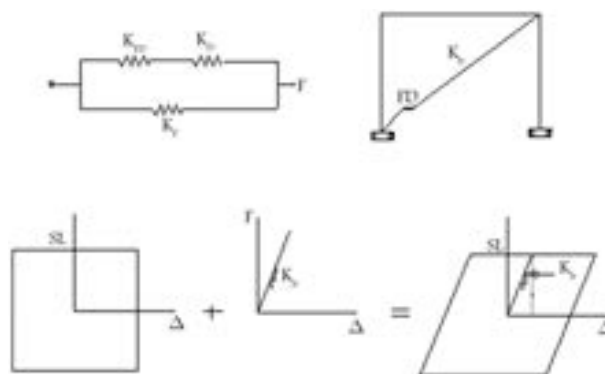
$$RATIO_1 = \frac{(|E(u_{left})_{max}| - |E(u_{right})_{max}|)_{withFD}}{(|E(u_{left})_{max}| - |E(u_{right})_{max}|)_{withoutFD}} \quad (5)$$

$$RATIO_2 = \frac{(\theta_{cm})_{withFD}}{(\theta_{cm})_{withoutFD}} \quad (6)$$

با توجه به شکل ۷ مشخص است که در نسبت‌های پایین سختی مهاربند به قاب ($\frac{K_b}{K_f} = 2$)، با افزایش بار لغزشی پاسخ سازه کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت سختی مهاربند به قاب (۳ یا ۴) $(\frac{K_b}{K_f})$ مفهومی به نام «بار لغزشی بهینه» و «حد بهینه‌ی بار لغزشی» برای میراگر اصطکاکی تعریف می‌شود. کم‌ترین مقدار پاسخ در بار لغزشی بهینه به دست می‌آید. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش خروج از



شکل ۵. توزیع بار لغزشی بین میراگرهای اصطکاکی با فرض بار لغزشی بیشینه برابر ۱۰ تن و خروج از مرکزیت بار لغزشی برابر ۴ متر.



شکل ۶. نحوه‌ی مدل‌سازی المان مجموع مهاربند و میراگر اصطکاکی.

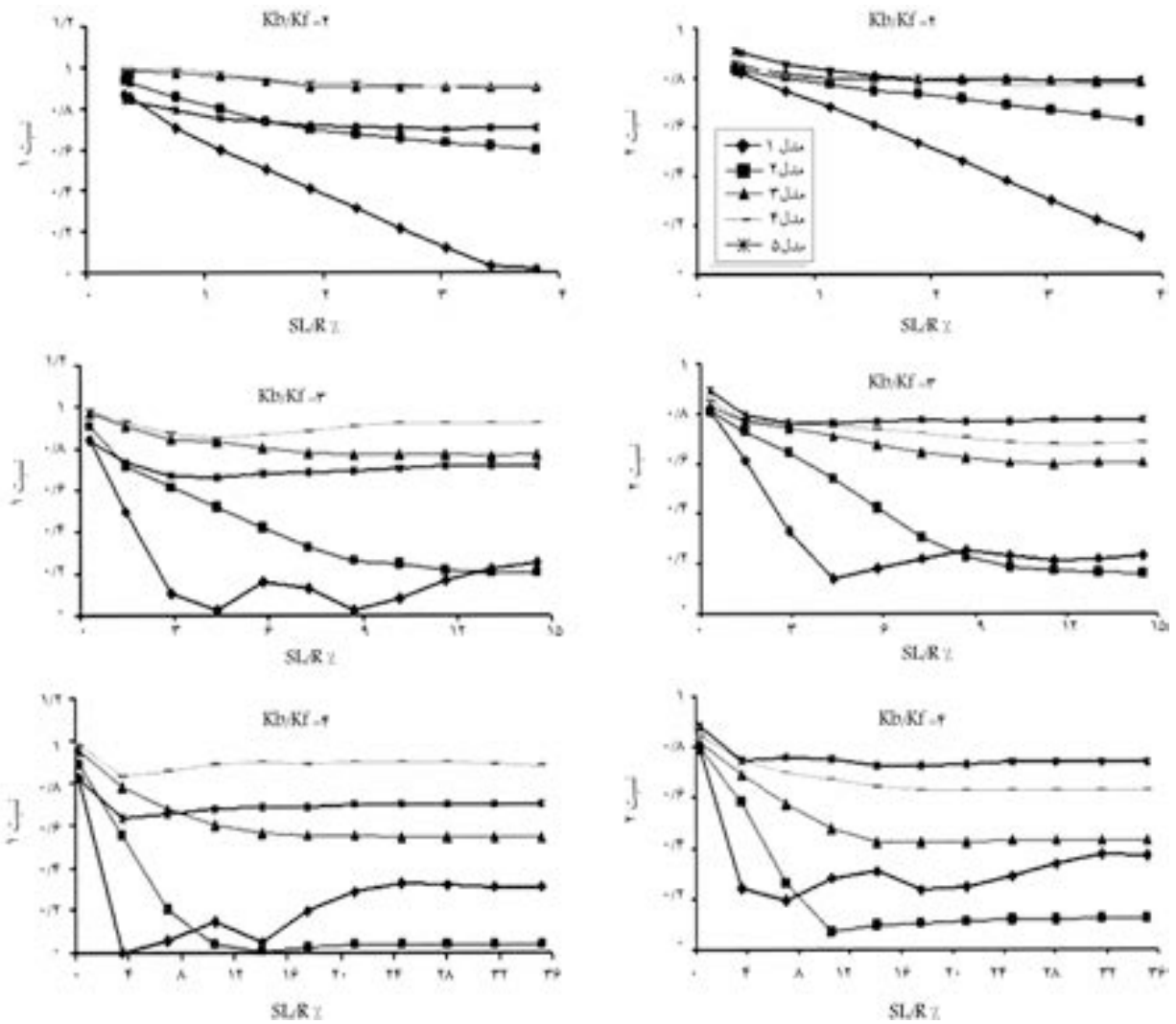
اصطکاکی است. برای مدل‌سازی المان ترکیبی در برنامه‌ی OpenSees از المان خرپا با اختصاص مواد هیستریک برای مدل دوخطی استفاده شده است. برای مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان فیبری و فولاد با مقاومت سخت‌شونده استفاده شده است. مدل‌سازی ترکیب میراگر و قاب در شکل ۶ نشان داده شده است. K_b معرف سختی مهاربند، K_f سختی قاب، P_s بار لغزشی میراگر اصطکاکی، K_{FD} سختی میراگر اصطکاکی برابر بی‌نهایت است.

۵.۲. مشخصات رکورد زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل

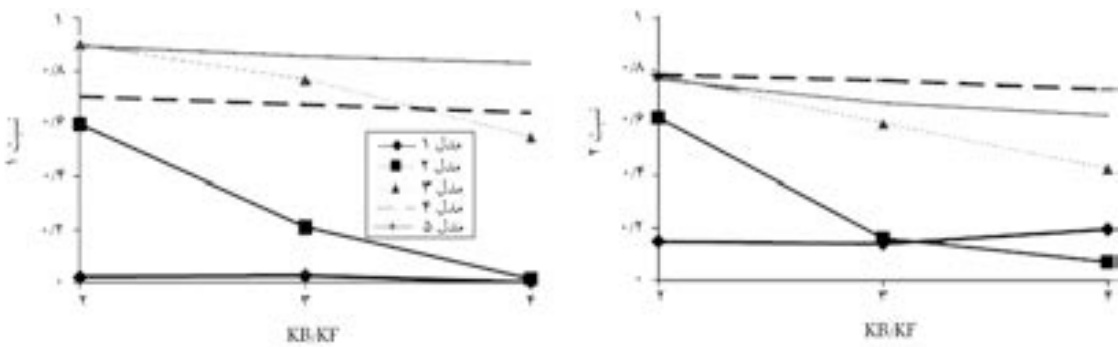
تحلیل تاریخی‌ی زمانی تحت زلزله‌های جدول ۲ انجام شده، که به شتاب $g/0.75$ هم‌پایه شده‌اند و به مدل‌ها در راستای Y اعمال شده‌اند. تمامی شتاب‌نگاشت‌ها از

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل تاریخی‌ی زمانی.

شماره	زلزله	سال	بزرگا	مدت (sec)	PGA (g)	ساخترگاه	فاصله (km)
۱	چی - چی	۱۹۹۹	۷٫۶ m	۳۵	۰٫۴۱۳	TCU۰۴۷	۳۳
۲	منچیل	۱۹۹۰	۷٫۴ mw	۲۵	۰٫۱۸۴	قزوین	۴۹
۳	امپریال ولی	۱۹۷۹	۶٫۵ m	۴۰	۰٫۱۶۹	سرپریتو	۲۶٫۵
۴	کرن کانتی	۱۹۵۲	۷٫۴ mw	۲۵	۰٫۱۷۵	تفت	۴۱
۵	شمال پالم اسپرینگ	۱۹۸۶	۶ m	۲۰	۰٫۲۲۸	سن جسنینو	۳۲
۶	نورت‌تریچ	۱۹۹۴	۶٫۷ m	۲۰	۰٫۲۵۶	کانتی لس آنلس	۲۵٫۴
۷	سن فرناندو	۱۹۷۱	۶٫۶ m	۲۰	۰٫۳۲۴	کستیک	۲۵



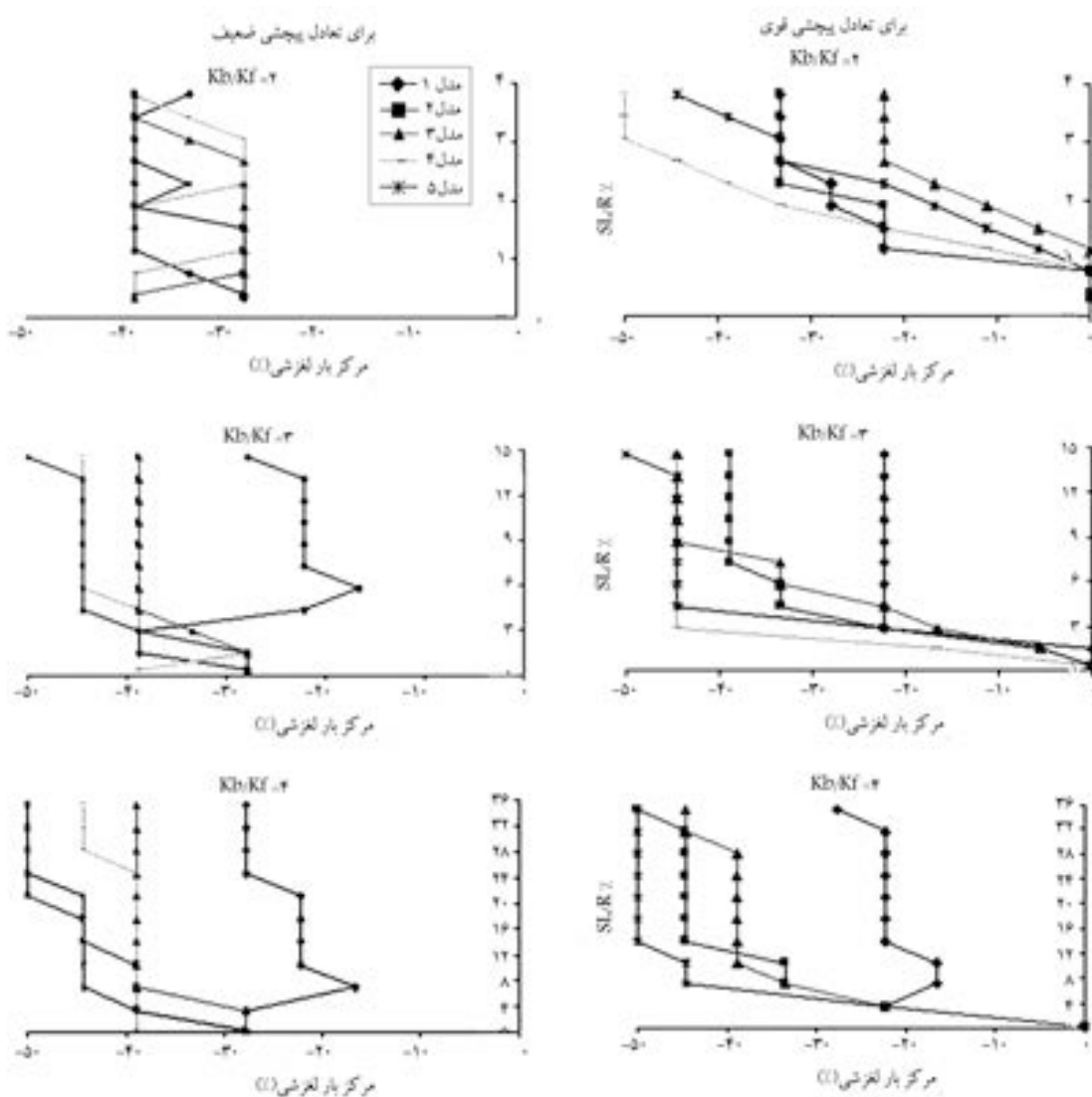
شکل ۷. نمودار بار لغزشی بهینه برای تعادل پیچشی قوی و ضعیف برای مدل‌های ۱-۵ به ازای نسبت سختی مهاربند به قاب ۳، ۲ و ۴.



شکل ۸. نمودار نسبت سختی مهاربند به قاب بهینه برای تعادل پیچشی قوی و ضعیف برای مدل‌های ۱-۵.

در شکل ۸ به ازای نسبت سختی مهاربند به قاب ثابت، بهترین پاسخ سازه (اختلاف تغییر مکان دو لبه و دوران مرکز سطح) در بار لغزشی بهینه، در مدل‌های دارای خروج از مرکزیت جرمی ۵٪-۲۵٪ نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۸ نشان داده شده، برای خروج از مرکزیت‌های کم ($e_m \leq 5\%$) در صورت انتخاب بار لغزشی و مرکز بار لغزشی بهینه، پاسخ سازه با تغییر سختی

مرکزیت جرمی بار لغزشی بهینه افزایش می‌یابد. در خروج از مرکزیت‌های جرمی زیاد، حد بهینه‌ی بار لغزشی برابر ۱۰٪ مقاومت جانبی کل سازه است و چنانچه میراگرها در مکان بهینه قرار گرفته باشند، به ازای بارهای لغزشی بعد از این حد اختلاف چندانی در پاسخ سازه مشاهده نمی‌شود. براساس شکل ۶، نتایج ذکر شده در تعادل پیچشی قوی و تعادل پیچشی ضعیف، هردو، صادق است.



شکل ۹. نمودار مرکز بهینه بار لغزشی به‌ازای نسبت سختی مهاربند به قاب (۲، ۳ و ۴) برای مدل‌های ۱-۵ برای تعادل پیش‌سختی قوی و ضعیف.

می‌شود. برای مقادیر بار لغزشی زیاد ($\frac{SL}{R} \leq 0.5$) در تعادل پیش‌سختی ضعیف و قوی مرکز بهینه بار لغزشی با افزایش مقدار خروج از مرکزیت جرمی در فاصله‌ی بیشتری نسبت به مرکز هندسی قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش بار لغزشی برای خروج از مرکزیت جرمی ثابت مرکز بهینه بار لغزشی افزایش می‌یابد. در بارهای لغزشی پایین ($\frac{SL}{R} \geq 0.5$) اثر سختی مهاربند در رفتار سازه ناچیز است، و میزان استهلاک انرژی به دلیل بار لغزشی کم نتایج مرکز بهینه بار لغزشی روال منظمی ندارد. در بارهای لغزشی کم برای تعادل پیش‌سختی قوی، این مرکز همواره در لبه نرم و به‌ازای خروج از مرکزیت جرمی ثابت با افزایش بار لغزشی افزایش می‌یابد؛ برای تعادل پیش‌سختی ضعیف نیز مرکز بهینه بار لغزشی همواره در لبه نرم و در محدوده‌ی ۳۰٪-۴۰٪ بعد سازه قرار دارد.

۴. نتیجه‌گیری

۱. بار لغزشی، مرکز بار لغزشی، نسبت سختی مهاربند متصل به میراگر اصطکاکی،

مهاربند تغییر محسوسی نمی‌کند و به‌وسیله‌ی مهاربندهای با نسبت سختی کم نیز می‌توان به تعادل پیش‌سختی رسید. اما با افزایش مقدار خروج از مرکزیت جرمی سازه، علاوه بر انتخاب بهینه‌ی مقدار بار لغزشی میراگر اصطکاکی و مرکز بار لغزشی میراگرهای اصطکاکی، افزایش سختی مهاربند باعث افزایش تعادل پیش‌سختی (قوی و ضعیف) در سازه‌ی نامتقارن می‌شود.

مرکز بار لغزشی بهینه به‌ازای مقادیر مختلف خروج از مرکزیت جرمی سازه و سختی‌های مختلف مهاربند در بارهای لغزشی مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. مرکز بار لغزشی در یک سازه با خروج از مرکزیت جرمی ثابت به‌ازای سختی مهاربند و بار لغزشی میراگر اصطکاکی ثابت از مقدار ۹- متر تا ۹+ متر با گام‌های ۱ متر تغییر می‌کند. مرکز بار لغزشی نظیر کم‌ترین مقدار پاسخ سازه در این ۱۹ گام برابر مرکز بهینه بار لغزشی است.

در شکل ۹ محور افقی مرکز بهینه بار لغزشی نسبت به بعد سازه در جهت خروج از مرکزیت است. با توجه به این که خروج از مرکزیت جرمی در جهت X- به سازه اعمال شده، مشخص است که مرکز بهینه بار لغزشی برای تعادل پیش‌سختی قوی و ضعیف همواره در لبه نرم قرار دارد و براساس مقدار بار لغزشی تعیین

۴. مرکز بهینه‌ی بار لغزشی در تمام حالات در لبه‌ی نرم قرار دارد.
۵. در تعادل پیچشی قوی و ضعیف برای مقادیر بار لغزشی بالا ($\frac{SL}{R} \leq 0.5$) مرکز بهینه‌ی بار لغزشی با افزایش خروج از مرکزیت جرمی در فاصله‌ی بیشتری نسبت به مرکز هندسی قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش بار لغزشی برای خروج از مرکزیت جرمی ثابت مرکز بهینه‌ی بار لغزشی افزایش می‌یابد.
۶. در تعادل پیچشی قوی در بارهای لغزشی پایین ($\frac{SL}{R} \leq 0.5$) مرکز بهینه‌ی بار همواره در لبه‌ی نرم قرار دارد. همچنین با افزایش بار لغزشی مرکز بهینه‌ی بار لغزشی در فاصله‌ی بیشتری نسبت به مرکز هندسی برای خروج از مرکزیت جرمی ثابت قرار می‌گیرد.
۷. مرکز بهینه‌ی بار لغزشی برای تعادل پیچشی ضعیف به‌ازای بارهای لغزشی پایین ($\frac{SL}{R} \leq 0.5$) در محدوده‌ی ۳۰٪ تا ۴۰٪ بعد پلان قرار می‌گیرد.
۲. مقدار خروج از مرکزیت سازه، پارامترهای مؤثر در کنترل پیچش سازه‌ی نامتقارن جرمی توسط میراگر اصطکاکی است.
۳. مقدار بار لغزشی بهینه با افزایش خروج از مرکزیت جرمی افزایش می‌یابد. برای خروج از مرکزیت‌های جرمی بالا ($e_{m=0.20, 0.25}$) حد بهینه‌ی بار لغزشی مقدار ۱۰٪ مقاومت جانبی سازه است که در صورت استقرار میراگرها در مکان بهینه، به‌ازای بارهای لغزشی بعد از این حد اختلاف چندانی در پاسخ سازه مشاهده نمی‌شود.
۳. برای تعادل پیچشی در سازه با خروج از مرکزیت‌های جرمی پایین تنها نیاز به تعیین بهینه‌ی بار لغزشی و مرکز بار لغزشی است، اما با افزایش خروج از مرکزیت جرمی نسبت سختی مهاربند متصل به میراگر اصطکاکی به قاب نیز اهمیت می‌یابد.

پانویس

1. far field

منابع

- De la lera, J.C. and et al. "Torsional balance asymmetric structures with frictional dampers: Analytical results", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**, pp. 1089-1108 (2005).
- Pall, S. and Marsh. C. "Response of friction damped braced frames", *Journal of Structural Engineering*, **108**(6), pp. 1313-1323 (1982).
- Fitzgerald, T.F. and et al. "Slotted bolted connection in a seismic design for concentrically braced connections", *Earthquake Spectra*, **5**(2), pp.383-391 (1989).
- Mualla, I.H., *Experimental and Computational Evaluation of Novel Friction Damper Device*, PHD Thesis Dept of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark (2000).
- Scholl, R. "Fundamental design issues for supplemental damping applications" *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp.627-636 (1993)
- Cherry, S. and Filiatrault, A. "Seismic response control of buildings using friction dampers", *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp.447-466 (1993).
- Yoamin, F.U. and Sheldon, C. "Design of friction damped structures using lateral force procedure", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**, pp. 989-1010 (2000).
- Levy, R.; Lavan, O. and Rutenberg, A. "Seismic design of friction-damped braced frames based on historical records", *Earthquake Spectra*, **21**(3), pp. 761-778 (2005).
- Kim, J. and Choi, H. "Displacement based design of supplemental dampers for seismic retrofit of a framed structure", *Journal of Structural Engineering*, **132**(6), p.p. 873 (2006).
- Pekau, O. and Grimond, R. "Controlling seismic response of eccentric structures by friction dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **20**, pp. 505-521 (1991).
- Pekau, O. and et al. "Improved deployment of friction dampers in asymmetric multistory buildings", 12 WCEE (2000).
- بزرگویی، جمال‌الدین؛ منصور، محمدرضا و سروقد مقدم، عبدالرضا «پارامترهای مؤثر در کنترل پیچش ساختمان‌های نامتقارن توسط میراگرهای اصطکاکی»، نشریه‌ی سازه و فولاد (در انتظار چاپ).
- Pacific Earthquake Engineering Research Center, *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, (2005). Homepage web site: <http://opensees.berkeley.edu>.
- Permanent Committee for Revising the Standard 2800, Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Building and Housing Research Centre, Tehran, Iran (1999).
- FEMA, 450, NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. (2003).
- بزرگویی، جمال‌الدین کنترل پیچش سازه‌ی نامتقارن با استفاده از میراگرهای اصطکاکی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (شهریور ۱۳۸۸).