

طراحی یک نوع میراگر اصطکاکی جدید همراه با لنت ترمز

فرشید خالقیان^۱ و محسن تهرانی‌زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، Email: fkaleg@yahoo.com

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده: هدف از این مقاله معرفی یک میراگر اصطکاکی پایدار و مقاوم در برابر بارهای دینامیکی است. وسیله ساخته شده (Friction Brake Pad) که میراگر اصطکاکی FBP نامیده می‌شود به کمک اصطکاک ناشی از لغزش لنت‌های ترمز روی سطوح فولادی، انرژی ارتعاشی را مستهلک می‌کند. در این مقاله با ارائه نتایج آزمایشات، عملکرد ارتعاشی میراگر در اتلاف انرژی نیروهای دینامیکی بررسی شده و مشاهده می‌شود میراگر طراحی شده ظرفیت بالایی در جذب انرژی نیروهای دینامیکی داشته و به کمک آن می‌توان درصد بالایی از انرژی لرزه‌ای را به حرارت تبدیل نمود. نتایج نشان می‌دهند، بار لغزش این میراگر در طول مسیر لغزش آن ثابت بوده و مقدار این بار در سیکل‌های متوالی نیز بدون تغییر است. در این مقاله عملکرد استهلاکی این وسیله در یک قاب پنج طبقه با اتصالات گیردار نیز بررسی شده و با کمک آنالیزهای غیرخطی دینامیکی مشاهده می‌گردد تغییر مکان جانبی قاب با نصب این وسایل به شدت کاهش یافته در حالی که برش پایه قاب نیز کنترل شده است و قاب در زلزله‌های شدید به صورت خطی رفتار کرده و هیچ‌گونه مفصل پلاستیک، در ستون‌ها و عناصر مهاریه آن مشاهده نمی‌شود. بنابراین میراگر اصطکاکی طراحی شده قابلیت‌های ویژه‌ای در کاهش انرژی ارتعاشی یک سازه تحت نیروهای لرزه‌ای داشته و به سادگی نیز قابل استفاده در انواع سازه‌های متعارف است.

کلید واژه‌ها: میراگر اصطکاکی، لنت ترمز، بار لغزش، بارگذاری سیکلی، عملکرد دینامیکی

Design of New Type Friction Damper with Brake Lining Pads

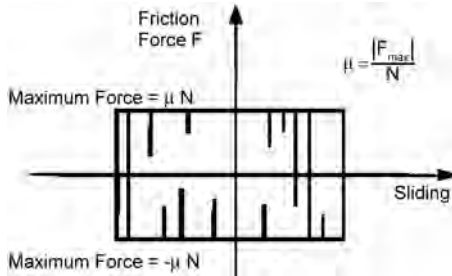
Abstract: The purpose of this paper is to introduce a friction damper that is stable and resistant to dynamic loads. The friction device, called Friction Brake Pad (FBP), dissipates vibration energy through friction and developed brake pads slide over steel surfaces. While presenting the test results, vibration performance of the damper with regard to dissipating dynamic forces energy is reviewed. It is observed that the designed damper has high capacity in absorbing dynamic forces energy and a high percentage of seismic energy may be dissipated into heat. The results show that sliding load of the damper is constant along its sliding path and the quantity is not released throughout sequential cycles. Dissipative performance of this damper is also analyzed through a five story steel frame with moment connections. Non-linear dynamic analyses reveal that lateral displacement of the frame is drastically reduced when damper are installed on it, while base shear at the frame is also controlled. It also shows that the frame has behaved linearly in strong earthquakes and no plastic hinges are developed in the columns or in any frame elements. It may therefore be said that the designed friction damper has special characteristics to reduce vibration energy in a structure subject to seismic forces while it can easily be installed on various types of conventional structures.

۱- مقدمه

به منظور ساخت ساختمان‌های مقاوم در برابر نیروهای زلزله، یکی از روش‌های اقتصادی، استفاده از میراگر یا وسایل اتلاف انرژی است. در این میان میراگرهای اصطکاکی یکی از انواع وسایل اتلاف انرژی است که عملکرد خوبی در کاهش نیروهای دینامیکی ورودی به سازه داشته و از جمله اقتصادی‌ترین آنها نیز به شمار می‌آیند [۱].

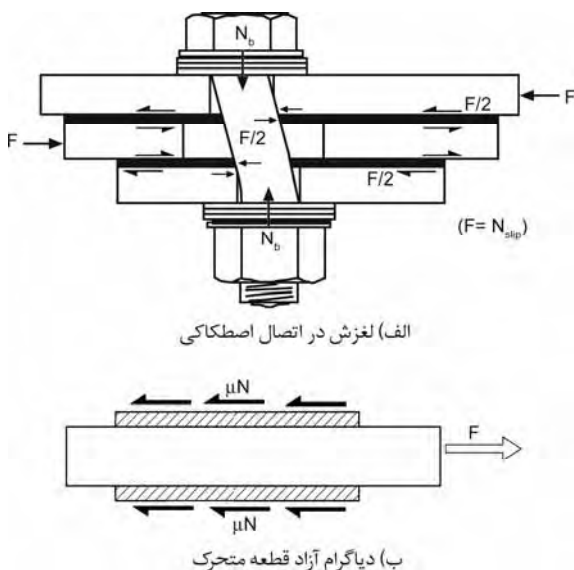
این میراگر در حقیقت یک اتصال ساده با پیچ اصطکاکی است که سوراخ‌های آن لوبیایی شکل با طول بلند است. بدیهی است اصطکاک موجود مابین سطوح تماس، مانع از حرکت اتصال می‌شود. اما هنگامی که اتصال لغزش کند، درصدی از انرژی ورودی صرف مقابله با نیروی اصطکاک شده و تولید انرژی گرمایی و حرارت می‌کند [۲]. به عبارت دیگر درصدی از

اگر نیروی وارده دینامیکی باشد، اصطکاک مابین سطوح متحرک، حرارت و گرمای زیادی را در هر حرکت رفت و برگشتی تولید می‌کند. شکل (۲) انرژی تلف شده از اصطکاک را تحت یک نیروی دینامیکی نشان می‌دهد. این انرژی گرمایی همان استهلاک انرژی است که در یک میراگر اصطکاکی تولید می‌شود [۱۳].



شکل ۲. عملکرد دینامیکی اتصال لوبیایی.

میراگرهای اصطکاکی یکی از ساده‌ترین انواع وسایل اتلاف انرژی در سازه به‌شمار می‌آیند. این‌گونه وسایل اتلاف انرژی با استفاده از یک اتصالات اصطکاکی همراه با سوراخهای لوبیایی شکل مطابق اتصال شکل (۳-الف) طراحی می‌گردند، در صورتی که نیروی اعمال شده به اتصال اصطکاکی از بار لغزش اتصال بزرگتر شود، سطوح به صورت ناگهانی شروع به حرکت می‌کنند. اما پس از حرکت با توجه به جنس سطوح تماس، مقدار نیروی اصطکاک نسبت به شروع حرکت تغییر می‌کند و بسته به دامنه جابه‌جایی نیز این تغییرات متفاوت است، شکل (۱). بنابراین اگر بتوان نیروی اصطکاک مشخصی را در یک اتصال یا یک عضو ایجاد کرد، به طوری که مقدار این نیروی قابل کنترل باشد، میراگر مورد نظر تولید شده است.



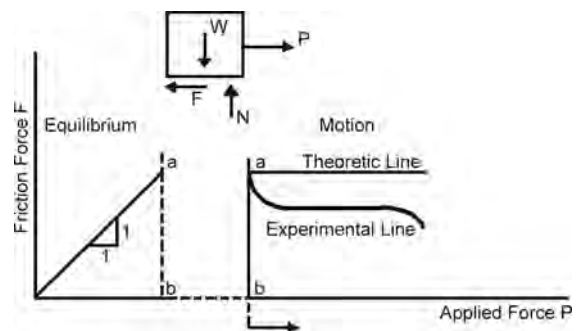
شکل ۳. اتصال اصطکاکی با سوراخ لوبیایی.

انرژی ورودی در اتصال مستهلاک می‌گردد. اولین مطالعات آزمایشگاهی در مورد اتصالات لوبیایی SBC به مطالعات ونوتی (Venuti) در سال ۱۹۷۶ و زوتی (Zsutty) در سال ۱۹۸۴ برمی‌گردد. پس از آن در سال ۱۹۸۹ فیتزجرالد (Fitzgerald) نتایج کامل‌تری را در رابطه با میراگرهای اصطکاکی ارائه نمود [۳].

در سال ۱۹۹۳ گرگوریان به منظور افزایش مقاومت سایشی و بالا بردن کارایی میراگرهای اصطکاکی از فلز برنج مابین سطوح لغزش استفاده کرد [۴]. پال و مارش [۵] نیز یک نوع میراگر اصطکاکی بخصوص برای بادبندهای متقاطع با استفاده از اتصال لوبیایی طراحی نمودند. در ادامه و به منظور بررسی دقیق‌تر رفتارهای لرزه‌ای این گروه از میراگرها، مدل‌های متعددی توسط میز ارتعاش شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت، در سال ۱۹۸۷ فیلپاترلوت و چری یک قاب سه طبقه همراه با میراگر اصطکاکی را مورد آزمایش قرار دادند [۶]. آیکن و همکاران [۷] نیز در همان سال یک نوع میراگر اصطکاکی را در یک قاب سه طبقه مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به کارایی و عملکرد مطلوب این میراگرها در بارهای دینامیکی، همچنان مطالعات تئوری و آزمایشگاهی در رابطه با آنها ادامه دارد [۸-۱۰]. با توجه به رضایت بخش بودن نتایج به دست آمده از مطالعات تحقیقاتی، کاربرد عملی و تجاری میراگرهای اصطکاکی نیز مورد توجه قرار گرفته است. بخصوص به منظور مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود، استفاده از این گروه میراگرها یکی از اولویتهای اصلی به‌شمار می‌آید [۱۱-۱۲].

۲- تئوری میراگرهای اصطکاکی

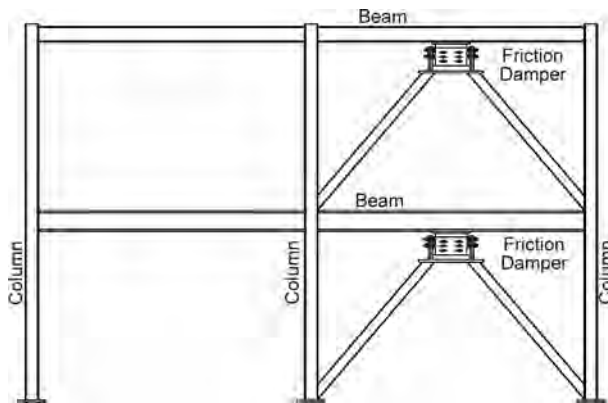
هنگامی که یک جسم مطابق شکل (۱) تحت نیروی جانبی P قرار گیرد، با افزایش نیرو از حد نیروی اصطکاک F ، جسم به صورت ناگهانی شروع به حرکت می‌کند، حرکت جسم از یک سو و نیروی اصطکاک موجود مابین سطوح تماس از سوی دیگر باعث تولید انرژی گرمایی در سطح تماس جسم می‌شود. اکنون



شکل ۱. رابطه نیروی اصطکاکی با نیروی عمود بر سطح.

شده است. مطالعات آزمایشگاهی انجام شده نیز عملکرد مطلوب این میراگر را در بارهای دینامیکی تأیید می‌کند.

از سوی دیگر با انتخاب یک مکان مناسب برای میراگر شرط دوم نیز برای این وسیله استهلاکی تأمین شده است. این وسیله استهلاکی در محل اتصال مهاربندهای ۸ شکل (Chevron Bracing) و تیر طبقه مطابق شکل (۴) نصب می‌گردد. بدیهی است مهاربندهای فوق باعث متمرکز شدن تغییرمکان نسبی طبقه در محل نصب میراگر شده و تحریک‌های اعمال شده به میراگر همان تغییرمکان نسبی طبقه یا ماکزیمم تغییرمکان محتمله سازه در آن طبقه است. باید به این نکته توجه کرد که مهاربندها در این حالت فقط یک نگهدارنده برای میراگر محسوب می‌شوند و دیگر عملکرد مهاربند را در سازه‌های متعارف ندارند. البته همراه با میراگر یک سختی معین و مشخصی را به قاب تحمیل می‌کنند [۳].



شکل ۴. موقعیت میراگر در قاب

با توجه به شکل (۴) مشاهده می‌گردد سختی نگهدارنده میراگر، در عملکرد و میزان اتلاف انرژی آن کاملاً مؤثر است. چنانچه از عناصر ضعیف و لاغر به عنوان نگهدارنده استفاده شود سبب کاهش رفتار لغزشی میراگر شده که در نهایت تقلیل میزان اتلاف انرژی و پایین آمدن راندمان میراگر را به دنبال خواهد داشت. بنابراین باید تاحد امکان، سختی بادبندهای مورد استفاده در سیستم‌های اتلاف انرژی، بزرگ در نظر گرفته شود. بدیهی است مقدار سختی بادبندها یا نگهدارنده میراگر با توجه به بار لغزش مستهلک‌کننده قابل محاسبه است. در این صورت با اعمال یک ضریب اطمینان می‌توان از کمانش آنها در هنگام بارگذاری‌های جانبی جلوگیری کرد.

میراگر *Friction Brake Pad* که به اختصار میراگر *FBP* نامیده می‌شود یک میراگر اصطکاکی است. این میراگر از یک عضو متحرک تی‌شکل "T" ساخته شده که در مسیر مشخصی

نیروی لغزش در اتصال شکل (۳-ب) با توجه به دیاگرام آزاد جسم مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$F_{slip} = 2\mu N \quad (1)$$

با شروع حرکت و تغییرمکان در میراگر اصطکاکی، حرارت و انرژی گرمایی در فصل مشترک دو سطح تولید می‌شود. با توجه به شکل (۲) انرژی حرارتی تولید شده برای یک سیکل کامل بارگذاری به صورت رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$E_d = 4F_{slip}\Delta \quad (2)$$

Δ و F_{slip} به ترتیب طول لغزش و بار لغزش، μ ضریب اصطکاک، N نیروی عمود بر سطح لغزش، و E_d انرژی گرمایی است. بنابراین مطابق رابطه (۲) انرژی حرارتی تولید شده به بار لغزش و طول مسیر لغزش (دامنه جابه‌جایی) وابسته است که با افزایش هر یک از مقادیر جابه‌جایی و یا بار لغزش، انرژی اتلافی نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. اکنون اگر بتوان هر یک از پارامترهای فوق را برای یک سازه محاسبه کرد می‌توان به میرایی مطلوب جهت کنترل ارتعاشات دینامیکی آن دست یافت و در حقیقت میراگر اصطکاکی لازم برای آن سازه طراحی شده است [۶].

۳- معرفی میراگر اصطکاکی *FBP*

در این مقاله یک نوع میراگر اصطکاکی مقاوم و پایدار در برابر نیروهای دینامیکی معرفی می‌گردد، به طوری که با اتلاف درصد بالایی از انرژی ورودی مانع از تخریب و آسیب عناصر باربر سازه‌ای می‌شود. این وسیله جدید باید دارای رفتار دینامیکی یکسان و مشخص در طول مدت بارگذاری بوده و حتی در سیکل‌های متعدد بارگذاری نیز تغییری در عملکرد آن مشاهده نشود. به منظور رسیدن به هدف فوق این میراگر جدید باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که دو عامل مهم در زیر آن تأمین شود: (۱) سطوح تماس از مقاومت لغزشی کافی برخوردار باشد. (۲) امکان حرکت و تغییرمکان کافی در میراگر ایجاد شود.

ساخت مستهلک‌کننده اصطکاکی با عملکرد مطلوب بدون در نظر گرفتن شرایط عنوان شده غیر ممکن است. چنانچه هر دو این عوامل در یک میراگر اصطکاکی فراهم گردد، میراگر کارایی مطلوبی در استهلاک انرژی ارتعاشی خواهد داشت.

در این میراگر با انتخاب لنت‌رمز که عنصری بسیار مقاوم و با دوام در برابر لغزش و نیروهای اصطکاکی است، می‌توان خصوصیات مطلوبی در سطوح تماس ایجاد کرد. بدیهی است با انتخاب و طراحی ابعاد هندسی مناسب برای لنت‌ها، متناسب با نیروی اصطکاک یک میراگر اصطکاکی ویژه‌ای طراحی و تولید

سطح لغزش به کلیه لنت‌ها اعمال می‌کنند به طوری که از تمرکز نیرو در اطراف یک لنت جلوگیری شود. با اتصال کافی این عضو به تیر موجود در طبقه، حرکات دیافراگم و کف مورد نظر با عضو "T" شکل یکسان خواهد بود. در این میراگر ورق‌های B و A به گونه‌ای نصب می‌گردند که از قسمت‌های کناری (محل اتصال چپ و راست) قابل تنظیم و تراز کردن باشند، شکل (۵-ب). تعبیه سوراخ‌های لوبیایی در ورق‌های L و R امکان تنظیم صفحات B و A و اعمال یک فشار یکنواخت به روی لنت‌ها را پس از سفت کردن پیچ‌ها سبب می‌شود. در شکل (۵-ب) نحوه استقرار صفحات B و A روی لنت‌ها و تراز کردن آنها مشاهده می‌گردد. به این ترتیب نیروی فشاری یکنواخت و منظمی در تمامی سطوح به لنت ترمزها اعمال می‌گردد.

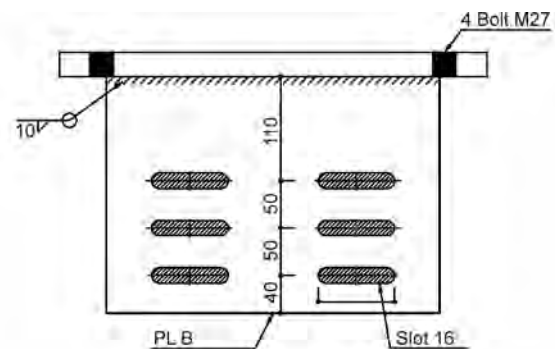
نیروی فشاری عمود بر سطح لغزش به کمک پیچ‌های موجود در صفحات B و A تأمین می‌شود. با اتصال کافی این صفحات به مهاربندها از یک سو و اتصال عضو "T" از سوی دیگر به تیر طبقه، تغییر مکان نسبی طبقه مستقیماً به میراگر منتقل می‌شود. بدیهی است با سفت کردن پیچ‌ها به مقدار معین، نیروی فشاری یا نیروی عمود بر سطح مورد نظر در محل تماس لنت‌ها و عضو "T" شکل ایجاد می‌شود و میراگر آماده بارگذاری می‌گردد. از دیگر پارامترهای مؤثر در رفتار میراگرهای اصطکاکی استفاده از واشرهای مناسب و کافی در تمامی اتصالات اصطکاکی است. تعبیه واشرهای بشقابی (Belleville Washers) و واشرهای با مقاومت بالا (Hardened Washers) در کلیه اتصالات لغزشی به تعداد کافی، از نکات مهم در عملکرد مطلوب میراگرهای اصطکاکی است، مطابق شکل (۵-ب). هنگامی که یک اتصال اصطکاکی تحت بار لغزش می‌کند (خصوصاً در حرکت‌های رفت و برگشتی)، به سرعت پیچ‌های اتصال پس از اولین حرکت شل شده و کاهش مقاومت می‌دهند در حالی که با قراردادن واشرهای بشقابی لازم در هر پیچ و افزایش فنریت در اتصال اصطکاکی، نیروی پیش‌تنیدگی موجود در پیچ کاهش نمی‌یابد، و در حرکت‌های سیکلی و رفت و برگشتی نیروی موجود در پیچ همچنان ثابت مانده و اتصال مقاومت خود را از دست نمی‌دهد. به منظور تأمین شرایط مناسب در یک میراگر و ایجاد عملکرد مطلوب برای آن، باید نوع و تعداد واشرهای لازم برای هر پیچ محاسبه و خصوصیات و شرایط لازم مطابق دستورالعمل‌های مربوطه رعایت گردد [۱۴-۱۶].

۴- معادلات حاکم بر میراگر اصطکاکی FBP

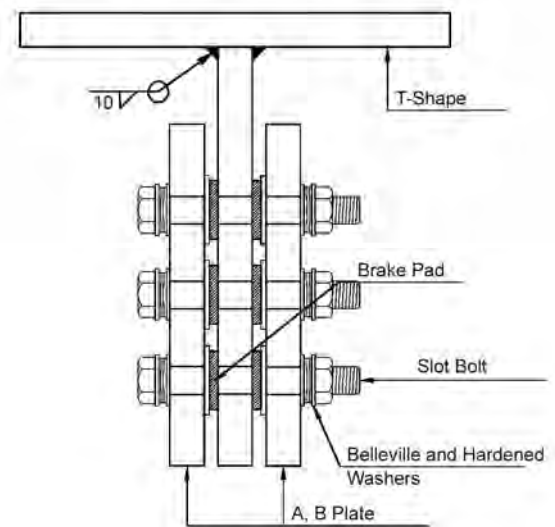
وسیله استهلاکی FBP برای تعداد حداکثر شش عدد پیچ

حرکت می‌کند. تعبیه سوراخ‌های لوبیایی شکل بلند در این عضو، امکان لغزش در امتداد مورد نظر را فراهم می‌آورد، شکل (۵-الف). عضو فوق، مطابق شکل (۴) به زیر تیر طبقه و در محل بادبند نصب می‌شود.

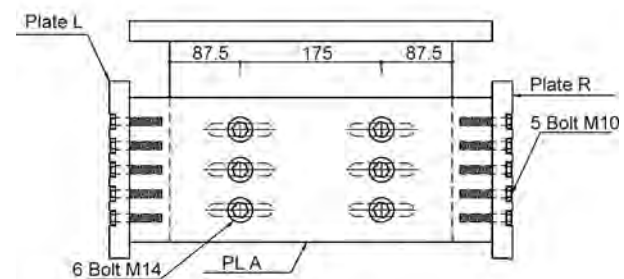
در این میراگر از ۱۲ عدد لنت ترمز استفاده شده است، مطابق شکل (۵-ب). لنت ترمزها به صورت متقارن در طرفین عضو "T" شکل قرار گرفته و برای هر پیچ دو عدد لنت به کار می‌رود. کلیه لنت‌ها توسط دو ورق نسبتاً ضخیم A و B که در دو سمت عضو "T" شکل قرار دارند، پوشانده می‌شوند، شکل (۵-ب). این صفحات یک نیروی فشاری یکنواخت و معین را در



الف) قطعه متحرک میراگر عضو "T" شکل

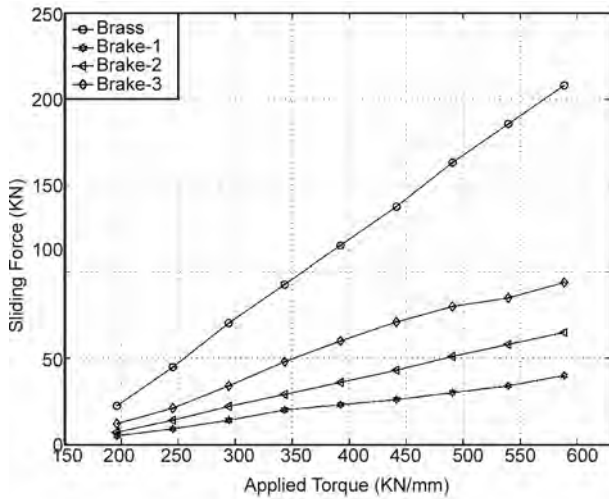


ب) مقطع عرضی میراگر اصطکاکی



پ) نمای روبروی میراگر اصطکاکی

شکل ۵. جزئیات کامل میراگر اصطکاکی FBP.



شکل ۶. رابطه نیروی لغزش نسبت به گشتاور در میراگر اصطکاکی.

$$M_t = k.F_{slip} \quad (4)$$

M_t گشتاور لازم جهت تولید نیروی پیش تنیده در پیچ و F_{slip} نیز معرف نیروی لغزش در اتصال اصطکاکی است پارامتر k نیز نشان دهنده نسبت $\frac{M_t}{F_{slip}}$ است که در حقیقت بیان کننده جنس و خصوصیات سطوح تماس (μ) ضریب اصطکاک) و مشخصات هندسی پیچ است. به عبارت دیگر، با کمک رابطه (۴) می توان مقدار لنگر لازم جهت سفت کردن پیچ ها را با توجه به جنس سطوح تماس و نیروی لغزش میراگر برآورد نمود.

۵- بار گذاری مدل

به منظور بررسی رفتار آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی از یک قاب آزمایشگاهی مطابق شکل (۷) استفاده شده است. میراگر طراحی شده روی بادبندها و زیر تیر در یک مکان مشخص نصب می شود. این قاب از یک سمت با یک جک به ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن تحت بارگذاری جانبی قرار می گیرد. این جک می تواند هر نوع بارگذاری دینامیکی با حداکثر فرکانس ۱۰ هرتز را به مدل اعمال نماید.

این قاب با اتصالات کاملاً مفصلی طراحی شده و تقریباً هیچ گونه مقاومت سازه ای در برابر بارهای جانبی در آن مشاهده نمی شود. بنابراین نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد خالص میراگر بوده و قاب کوچکترین تأثیری در نتایج به دست آمده ندارد. از سوی دیگر به منظور ایجاد شرایط دیافراگم صلب، از پروفیل IPB-240 به عنوان تیر استفاده شده است. بدیهی است بادبندهای به کار رفته نیز دارای مقاومت فشاری نسبتاً بالایی بوده و در طول مدت بارگذاری نیز کوچکترین ناپایداری در آنها مشاهده نشده است. شرایط مهارهای جانبی

مطابق شکل (۵) طراحی شده است. با توجه به دیاگرام آزاد مطابق شکل (۳-ب) برای هر پیچ، حداکثر نیروی لغزش در صورتی که کلیه پیچ ها بسته شده باشند برابر است با:

$$F_{total} = 12\mu.N \quad (3)$$

قابل ذکر اینکه نیروی فوق حداکثر نیروی لغزش است که در میراگر FBP قابل تولید است. بدیهی است با کم کردن تعداد پیچ ها به دو عدد می توان نیروی لغزش را به $\frac{1}{3}$ مقدار رابطه (۳) تقلیل داد. بنابراین محدود وسیعی از نیروی لغزش را برای این میراگر می توان در نظر گرفت که یکی از ویژگی های این وسیله به جهت کاربرد گسترده در صنعت ساختمان سازی است.

با توجه به رابطه (۳) به منظور برآورد نیروی لغزش باید دو پارامتر ضریب اصطکاک سطوح لغزش μ و نیروی عمود بر سطح N را محاسبه نمود. از سوی دیگر نیروی عمود بر سطح نیز وابسته به میزان نیروی پیش تنیدگی پیچ ها است که با توجه به گشتاور لازم جهت سفت کردن پیچ ها برآورد می گردد. در میراگر فوق با برآورد یک رابطه تقریبی بین گشتاور لازم جهت سفت کردن پیچ از یک سو و نیروی لغزش از سوی دیگر می توان یک رابطه ساده جهت تخمین نیروی لغزش به دست آورد.

شکل (۶) رفتار میراگر اصطکاکی FBP با چندین سطوح لغزشی نشان داده می شود. در حالت اول از فلز برنج مابین سطوح استفاده شده و در مدل های دیگر نیز از لنت ترمز مابین سطوح استفاده شده است. مدل دوم ($Brake-1$) که یک نوع لنت ترمز معمولی است و دارای مقاومت پایین فشاری و لغزشی است. در این مدل، μ یا ضریب اصطکاک نزدیک به $0/1$ به دست می آید. مدل دیگر از یک لنت مقاوم ($Brake-2$) استفاده شده در این حالت μ ضریب اصطکاک برابر $0/11$ برآورد شده است.

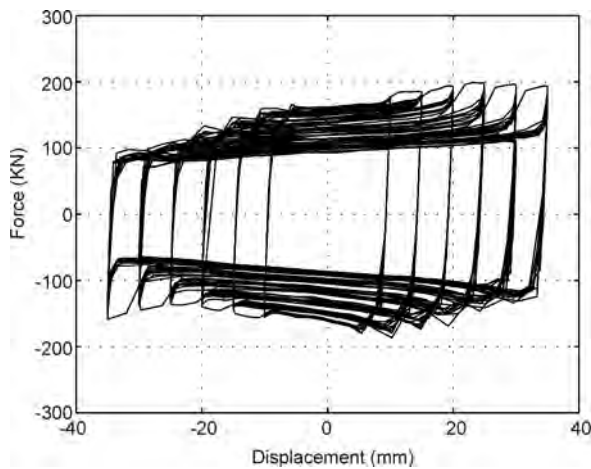
در نهایت برای مدل سوم ($Brake-3$) نیز از همان لنت مدل دوم استفاده شده، با این تفاوت که با مضرس کردن عضو متحرک مقاومت اصطکاکی نمونه افزایش یافته است که در این حالت μ ضریب اصطکاک برابر با $0/16$ محاسبه می گردد. این مدل تقریباً نصف مدل با صفحات برنجی است که مقدار μ ضریب اصطکاک آن برابر $0/34$ برآورد گردیده است.

باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات با سطوح سایشی مختلف مشاهده می گردد، یک رابطه خطی بین میزان لنگر پیچشی و نیروی لغزشی برای هر نوع پیچ می توان متصور بود. این رابطه خطی بیان کننده نیروی اصطکاکی به ازای گشتاور پیچشی اعمال شده به یک پیچ در اتصال اصطکاکی است و به صورت رابطه (۴) بیان می شود.

محل تماس می‌گردد. زیرا لغزش متمادی سطوح روی یکدیگر سبب ساییدگی و صاف شدن سطوح شده و در نهایت تغییر در شرایط اولیه را سبب می‌شود.

سطوح تماس در میراگر اصطکاکی باید قابلیت اینکه مداوماً روی یکدیگر ساییده شوند را داشته باشند و علاوه بر این در مدت بارگذاری، تغییری در نیروی لغزش آن نیز ایجاد نگردد. از این رو استفاده از عناصر مقاوم در فصل مشترک سطوح تماس میراگرهای اصطکاکی مطرح می‌گردد و توجه به این نکته در ساخت یک میراگر اصطکاکی، بسیار ضروری است.

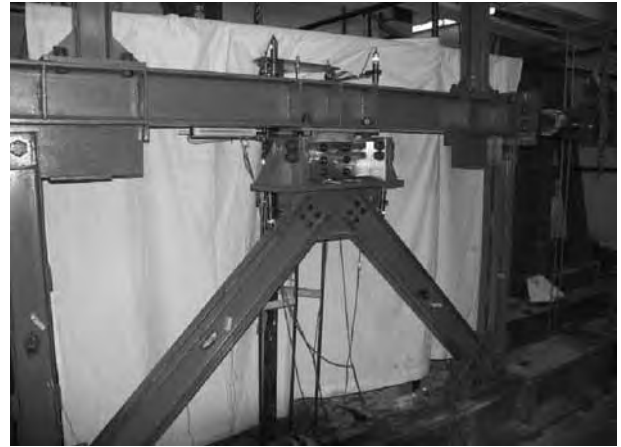
در میراگر جدید شرایط و خصوصیات سطوح تماس به صورتی در نظر گرفته شده که یک میراگر مقاوم و پایدار در برابر بارهای سیکنی و دینامیکی ساخته شود. به این منظور ابتدا از فلز برنج که آلیاژی مقاوم در برابر سایش است استفاده گردید. در این حالت کلیه قسمت‌هایی که روی یکدیگر ساییده می‌شوند با آلیاژی از جنس برنج پوشیده شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد نسبی سطوح سایشی است؛ اما همچنان کاهش مقاومت در سیکل‌های متمادی مشاهده می‌گردد، مطابق شکل (۹).



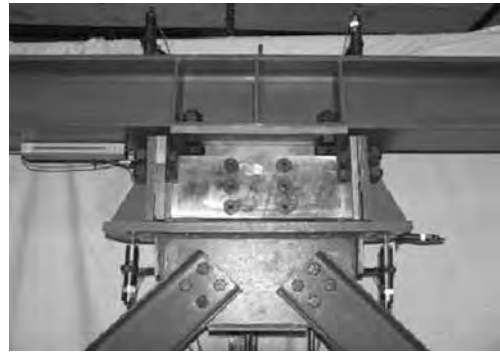
شکل ۹. حلقه‌های هیسترتیک میراگر اصطکاکی سطوح لغزش از آلیاژ برنج.

با توجه به نتایج به دست آمده و به منظور بهبود رفتار لغزشی میراگر از مواد با مقاومت سایشی بالا مانند لنت ترمز در محل تماس استفاده گردید. مطابق شکل (۱۰) نتایج رفتار میراگر اصطکاکی فوق با استفاده از لنت ترمز نشان داده شده است. با مقایسه نتایج شکل‌های (۹) و (۱۰) عملکرد مطلوب میراگر اصطکاکی هنگام استفاده از مصالح با مقاومت سایش زیاد مانند لنت ترمز مشاهده می‌گردد. بعلاوه نیروی لغزش به دست آمده برای میراگر با سطوح لغزش از فلز برنج تقریباً دو برابر نیروی

در قاب مطابق شکل (۸) به کمک المان‌های قائم که روی تیر نصب شده تأمین می‌شود. در این حالت تیر و قاب فقط می‌تواند در امتداد صفحه خود حرکت کند.



شکل ۷. قاب و میراگر اصطکاکی در بارگذاری جانبی (Set up).



شکل ۸. موقعیت میراگر اصطکاکی در قاب.

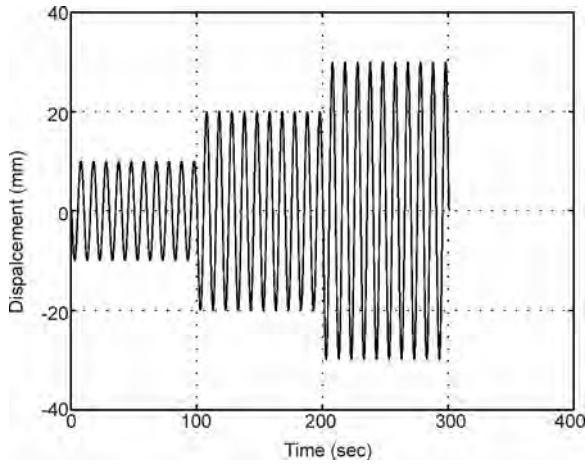
مقدار، شکل و نحوه اعمال بار به قاب و میراگر بر اساس دستورالعمل ارائه شده در ATC-24 انجام شده است [۱۷]. بنابراین در کلیه نمونه‌ها، مراحل بارگذاری بر اساس روش کنترل تغییرمکان انجام گرفته است. سرعت بارگذاری در کلیه آزمایشات، آرام و با فرکانس ۰/۱ هرتز انجام شده است.

۶- ارائه نتایج

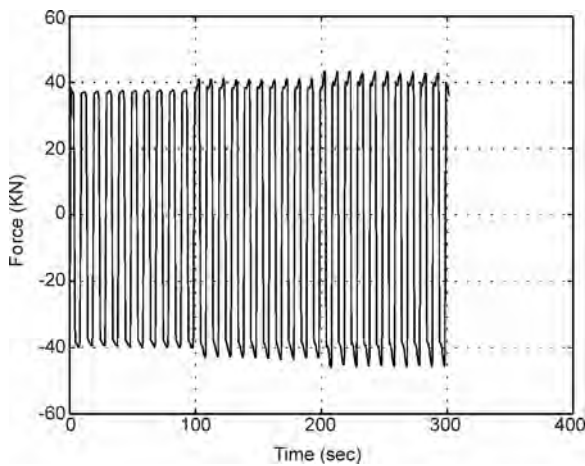
همان‌گونه که بیان گردید از عوامل مهم در عملکرد میراگر اصطکاکی وضعیت سطوح تماس است. به این منظور در این تحقیق شرایط مختلفی از سطوح تماس در نظر گرفته شده و بررسی‌های لازم جهت انتخاب سطوح مقاوم در مقابل لغزش انجام گرفته است.

در بارگذاری‌های دینامیکی هنگامی که دو سطح روی یکدیگر مرتباً ساییده شوند اصطکاک موجود بین سطوح تماس باعث تغییر در خصوصیات، زبری و کاهش نیروی اصطکاک در

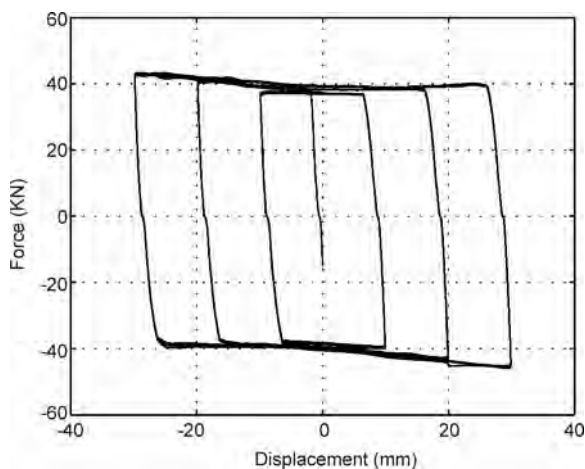
۳۰ میلی متری را تحمل کرده و کوچکترین ناپایداری و افت بار لغزش در آن دیده نشده است. پس از اتمام بارگذاری نیز کلیه بخش‌های میراگر از نظر فیزیکی و مکانیکی بررسی شده و اثری از آسیب دیدگی در آن مشاهده نشد. بنابراین، وسیله استهلاکی



شکل ۱۰. تغییر مکان میراگر *FBP* در دامنه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متری.

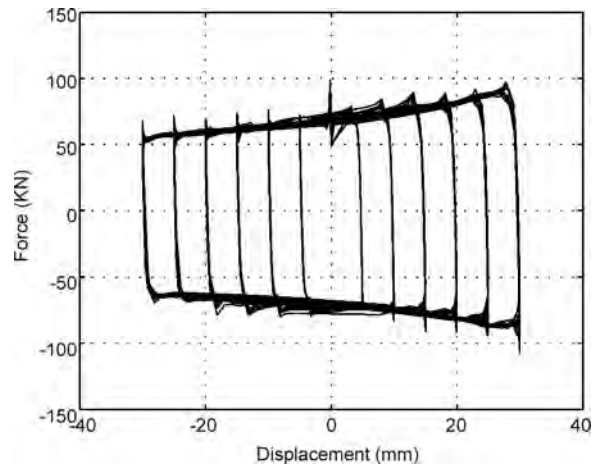


شکل ۱۱. تغییر مکان میراگر *FBP* در دامنه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متری.



شکل ۱۲. نیروی لغزش میراگر *FBP* در دامنه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متری.

شکل ۱۳. رفتار هیستریزیس میراگر *FBP* در دامنه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متری.

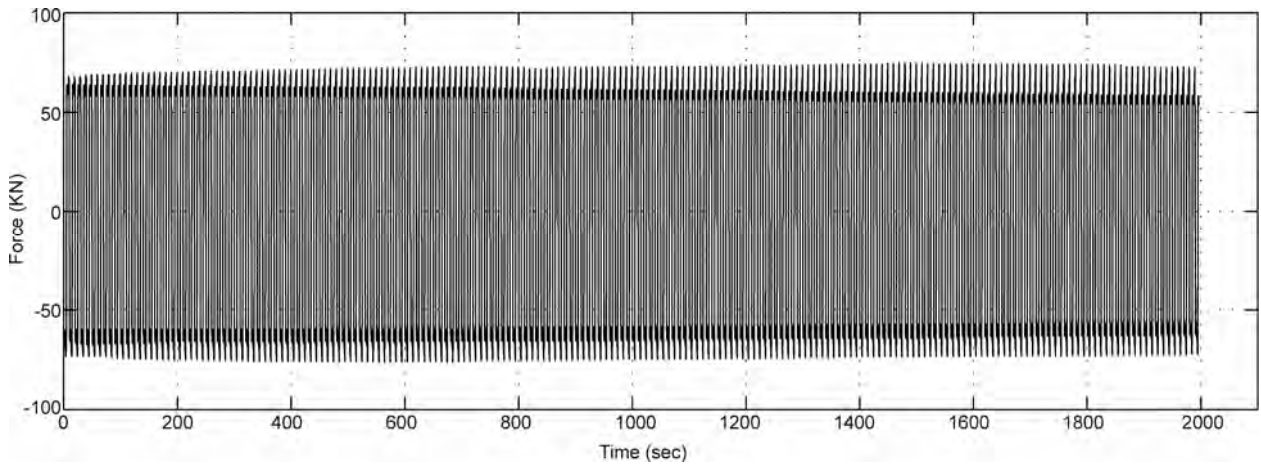


شکل ۱۳. حلقه‌های هیستریزیک میراگر اصطکاکی سطوح لغزش از لنت ترمز.

لغزش در میراگر با لنت ترمز است که به علت بالا بودن ضریب اصطکاک سطوح در میراگر با سطح لغزش از آلیاژ برنجی است. با طراحی صحیح لنت‌های ترمز، حلقه‌های هیستریزیک به دست آمده دارای شکلی یکنواخت و منظم بوده و پس از اعمال سیکل‌های متمادی نیز کوچکترین افت و کاهشی در نیروی لغزش آن مشاهده نمی‌شود و میراگر می‌تواند تغییر مکان‌های بزرگ با شکل‌های گوناگون را تحمل کرده و درصد بالایی از انرژی ارتعاشی را به حرارت تبدیل کند.

در ادامه نتایج به دست آمده از آزمایشات مختلف میراگر *FBP* ارائه شده است. مطابق شکل (۱۱) تغییر مکان‌های اعمال شده به میراگر با دامنه‌های مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی متر در یک بارگذاری سینوسی نشان داده شده است. در شکل (۱۲) نیز نیروی لغزش ایجاد شده جهت رسیدن به تغییر مکان مفروض مشاهده می‌گردد. در این میراگر جدید با افزایش دامنه بارگذاری در سیکل‌های متمادی، هیچ‌گونه تغییری در مقدار بار لغزش ایجاد نشده و منحنی هیستریزیس میراگر اصطکاکی فوق در شکل (۱۳) دلیلی بر این مدعا است. با بررسی رفتار به دست آمده این نکته قابل ذکر است که مقدار بار لغزش در طول مسیر لغزش ثابت بوده و حتی مقدار آن در کل مدت بارگذاری نیز بدون تغییر بوده است. از سوی دیگر با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری نیز افت و کاهشی در میزان بار لغزش این میراگر مشاهده نمی‌شود.

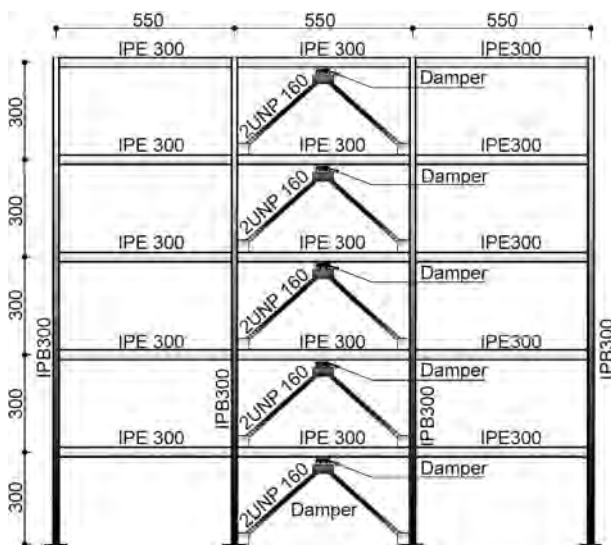
به منظور بررسی مقاومت و توانایی میراگر *FBP* در برابر تعداد بارگذاری‌های زیاد، آزمایشات تکمیلی دیگری انجام شده است. در شکل (۱۴) نشان داده می‌شود که میراگر پس از تحمل تعداد سیکل‌های زیاد همچنان تخریب نشده و در اتلاف انرژی هنوز مؤثر است. آزمایش فوق نشان می‌دهد، مستهلک کننده اصطکاکی مذکور بیش از ۲۰۰ سیکل بارگذاری سینوسی با دامنه جابه‌جایی



شکل ۱۴. نمودار نیرو زمان میراگر FBP برابر تعداد سیکل‌های زیاد (ماکزیمم دامنه ۳۰ میلی‌متر).

مفروض مطابق شکل (۱۶) ارائه شده است. این قاب با ارتفاع طبقات ۳ متر و با دهانه‌های یکسان ۵/۵ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده طبقات ۲۱/۶ کیلونیوتن بر متر و بار زنده نیز ۵/۴ کیلونیوتن بر متر که در کلیه طبقات یکسان فرض شده و در هنگام زلزله ۲۰٪ آن مؤثر خواهد بود. کلیه اتصالات در قاب گیردار بوده و مهاربندها فقط جهت اتصال میراگر اصطکاکی به قاب به کار می‌روند. این قاب همراه با میراگر اصطکاکی تحت شتاب‌نگاشت زلزله طیس با ماکزیمم شتاب $0.19g$ بررسی و نتایج آنالیز دینامیکی غیرخطی قاب با میراگر اصطکاکی FBP و بدون آن بررسی شده است.

با انجام آنالیزهای غیرخطی متعدد مقدار بهینه نیروی لغزش برای میراگرهای اصطکاکی محاسبه شده است. نیروی لغزش میراگرهای به کار رفته در تمامی طبقات یکسان و برابر ۱۵۰ کیلونیوتن در نظر گرفته شده است.

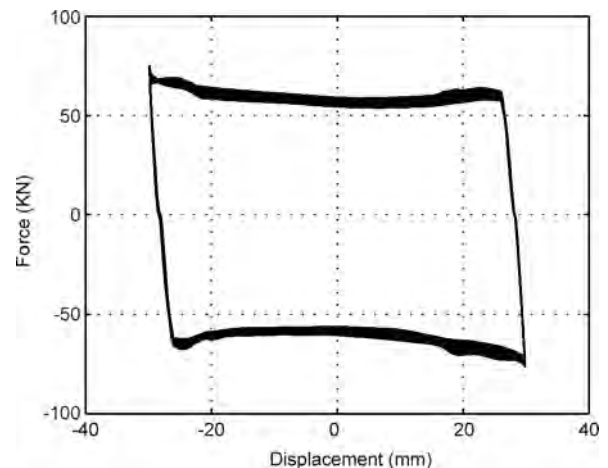


شکل ۱۶. قاب پنج طبقه مفروض.

فوق همچنان می‌تواند انرژی لرزه‌ای را به انرژی حرارتی تبدیل کند. با توجه به نتیجه به دست آمده در شکل (۱۵) میراگر FBP دارای رفتار هیستریزیس یکسان در برابر تعداد سیکل‌های بسیار بالا بوده و شکل و ماهیت حلقه‌های هیستریک آن تغییر نمی‌کند، به عبارت دیگر بارلغزش آن یک مقدار ثابت بوده و در طول دامنه لغزش نیز تغییری نمی‌کند.

از سوی دیگر با بررسی حلقه‌های به دست آمده، استفاده از مدل استهلاکی کلمب (اصطکاک خشک) برای میراگر FBP جهت مدلسازی عددی این وسیله از دقت کافی برخوردار خواهد بود. به طوری که با افزایش دامنه و یا با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، رفتار و عملکرد میراگر ثابت و مشخص بوده و تا پایان بارگذاری دینامیکی رفتار وسیله تغییر نمی‌کند و راندمان میراگر در اتلاف انرژی لرزه‌ای یکسان خواهد بود و در هر سیکل بارگذاری ماکزیمم انرژی مستهلک شده برای میراگر به دست می‌آید.

به منظور ارزیابی رفتار این میراگر همراه با قاب نتایج به دست آمده از تحلیل غیرخطی دینامیکی یک قاب پنج طبقه



شکل ۱۵. عملکرد هیستریک میراگر FBP پس از ۲۰۰ سیکل بارگذاری.

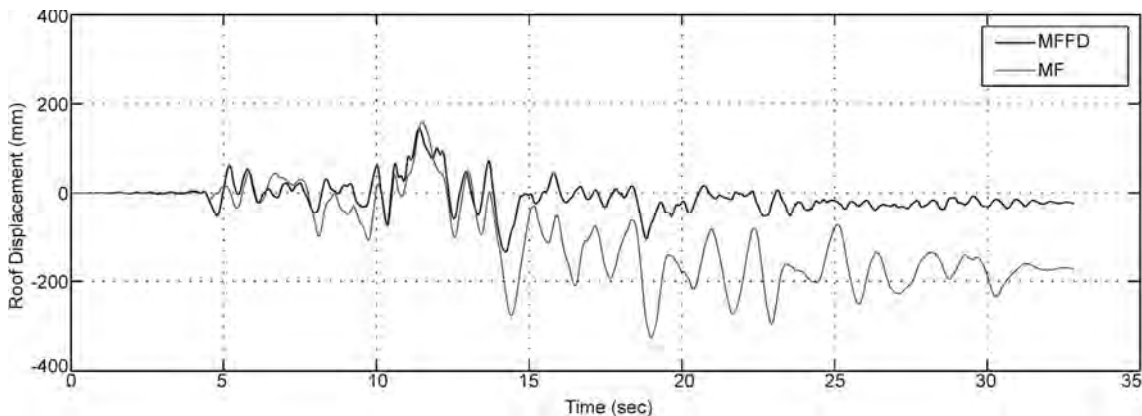
حالت با افزایش شدت نیروی اعمال شده عناصر اصلی در قاب خمشی به سرعت پلاستیک شده و با افزایش تعداد مفاصل پلاستیک، تغییرمکان‌ها طبقات نیز به شدت افزایش یافته است.

اما با افزودن میراگر اصطکاکی به طبقات قاب، با افزایش شدت نیروی زلزله، میراگرهای فوق لغزش کرده و با رفتار استهلاکی خود درصد بالایی از انرژی ورودی را به حرارت و انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند. بنابراین تغییرمکان قاب کاهش می‌یابد و قاب در بارگذاری‌های شدید، رفتار و عملکرد کنترل شده‌ای از خود نشان می‌دهد. شکل (۱۸) نیز بیان کننده تغییرمکان نسبی طبقه سوم در زمان وقوع زلزله است. ماکزیمم مقدار تغییرمکان نسبی ۸۴ میلی‌متر و در زمان ۱۹ ثانیه ثبت شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقدار به دست آمده برای تغییرمکان نسبی مقدار قابل توجه‌ای است در حالی که مقدار این تغییرمکان در قاب همراه با میراگر حداکثر به ۴۲ میلی‌متر در زمان ۱۱/۴ محدود شده است. مقدار فوق نصف حالت قاب صلب تنها است و در محدوده قابل قبولی از تغییرمکان برای یک سازه محسوب می‌شود.

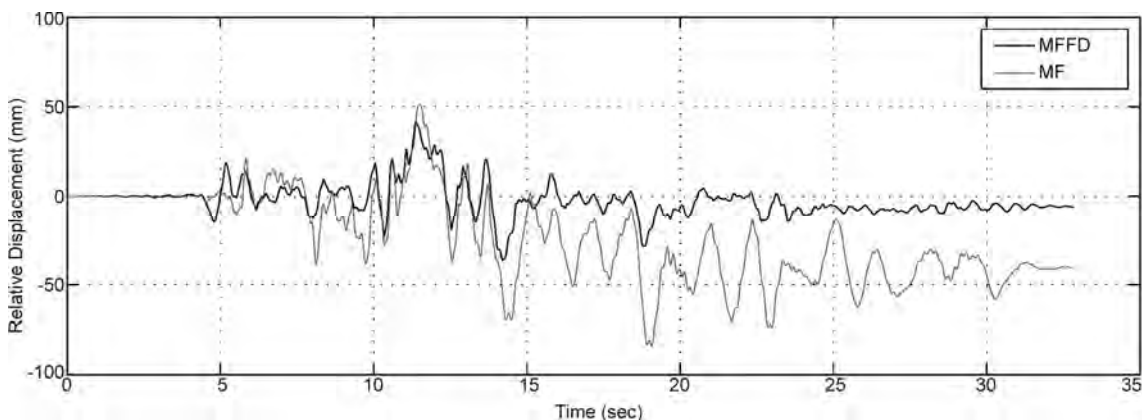
با مقایسه نتایج، بهبود رفتار دینامیکی قاب با نصب میراگر در آن کاملاً مشخص می‌شود. در حقیقت با افزودن این وسیله به قاب حجم انرژی مستهلک شده هنگام بارگذاری دینامیکی افزایش چشمگیری یافته و مانع از تخریب عناصر سازه‌ای شده است.

با مقایسه زمان تناوب قاب در مدل قاب خمشی تنها که ۱/۴۵ ثانیه به دست می‌آید با قاب همراه با میراگر که ۰/۴۴۸ ثانیه برآورد شده است، می‌توان نتیجه گرفت با افزودن میراگر به قاب سختی قاب افزایش یافته است. باید به این نکته توجه کرد که کاهش تغییرمکان‌های ایجاد شده و بهبود رفتار قاب ناشی از افزایش سختی نبوده بلکه به جهت افزایش میرایی و استهلاک انرژی در قاب است.

شکل (۱۷) ماکزیمم تغییرمکان قاب یا تغییرمکان بام را در زمان بارگذاری لرزه‌ای نشان می‌دهد، مقدار حداکثر تغییرمکان بام بدون میراگر در این شکل ۳۲۵ میلی‌متر برآورد می‌شود که ۱۹ ثانیه پس از وقوع زلزله اتفاق افتاده است در حالی که این تغییرمکان با افزودن میراگر به قاب به مقدار ۱۴۵ میلی‌متر (پس از ۱۱/۴ ثانیه از وقوع زلزله) محدود شده است. در این



شکل ۱۷. تغییرمکان بام در دو حالت قاب با میراگر و بدون میراگر.



شکل ۱۸. تغییرمکان نسبی طبقه سوم در دو حالت قاب با میراگر و بدون میراگر.

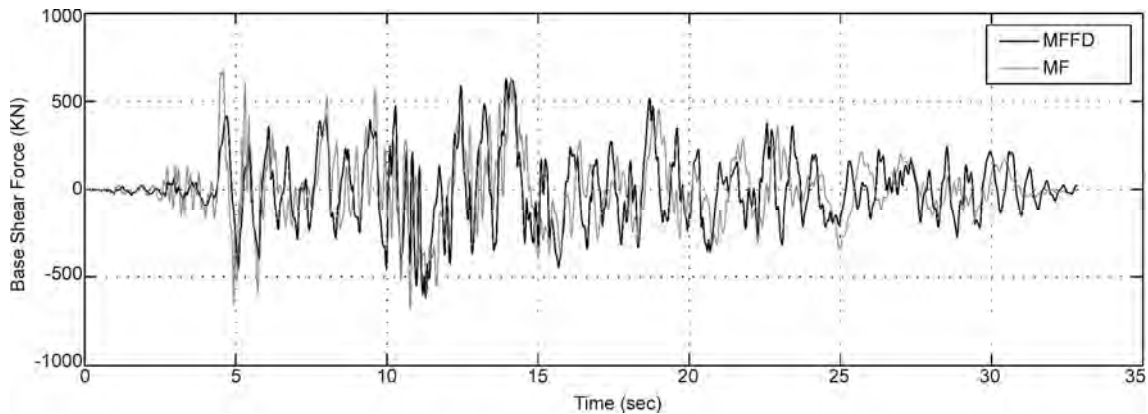
لنگرها در محدوده خطی قرار دارند. مطابق شکل‌های (۲۱) و (۲۲) حلقه‌های هیسترتیک میراگر اصطکاکی قاب در طبقات اول و پنجم ارائه شده است. بدیهی است حلقه‌ها نشان دهنده میزان اتلاف انرژی و عملکرد این وسیله استهلاکی تحت زلزله طیس برآورد شده است که با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای و شبیه‌سازی قاب همراه با میراگر به دست آمده است. علاوه بر این در شکل (۲۳) روابط انرژی برای قاب ترسیم شده است که مقدار انرژی ورودی و انرژی مستهلک شده نشان داده می‌شود. در این شکل دیده می‌شود نزدیک به ۷۵ درصد از انرژی ورودی در میراگرهای اصطکاکی به حرارت تبدیل شده و مانع از ایجاد مفصل پلاستیک در قاب شده است.

از سوی دیگر محاسبات انجام شده مقدار میرایی معادل قاب همراه با میراگر اصطکاکی را ۲۴ درصد برآورد می‌کند که مقدار قابل توجه‌ای از میرایی برای یک قاب فلزی به شمار می‌آید، در صورتی که ماکزیمم میرایی برای یک سازه حداکثر به ۵ درصد محدود می‌گردد.

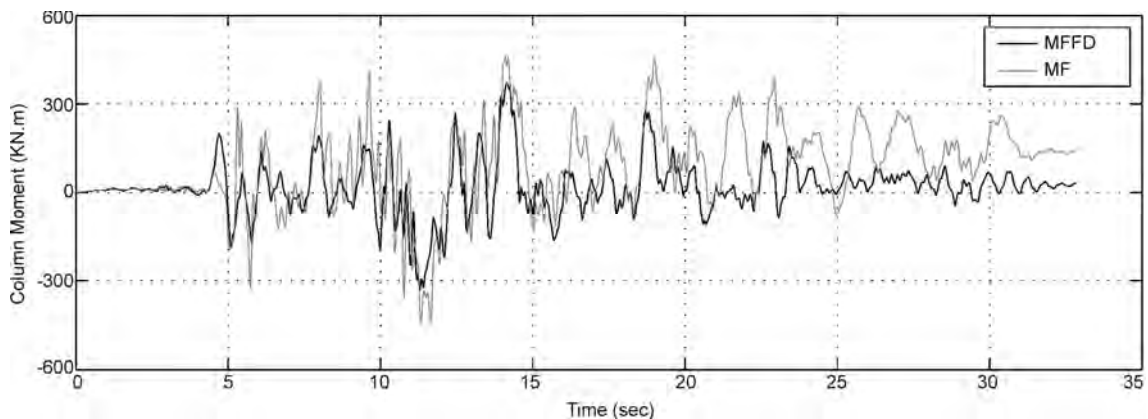
در شکل (۱۹) نیروی برش پایه قاب در مدت زلزله مشاهده می‌گردد. مقدار نیروی برشی و یا حداکثر نیروی جانبی قاب در حالتی که میراگر به قاب اضافه شده است کمتر از برش پایه قاب بدون میراگر است. به عبارت دیگر با توجه به اینکه سختی قاب با اضافه کردن میراگر بیشتر شده اما همچنان نیروی برشی پایه کاهش یافته است.

شکل (۲۰) نیز نشان دهنده نمودار لنگر خمشی ستون کناری قاب در مدت بارگذاری زلزله است. با توجه به این شکل می‌توان بیان نمود لنگر ستون در قاب با افزودن میراگر کاهش یافته است. این تاریخچه زمانی نیز کاهش نیروی جانبی قاب با اضافه کردن میراگر را تأیید می‌کند.

مقدار حداکثر لنگر پس از ۱۴ ثانیه از وقوع زلزله در قاب خمشی ایجاد می‌شود و مقدار آن ۴۵۷ کیلو نیوتن بر متر است در حالی که مقدار این لنگر ۳۶۹ کیلو نیوتن بر متر در قاب همراه با میراگر به دست می‌آید. قابل ذکر اینکه لنگر پلاستیک مقطع ۳۹۵ کیلو نیوتن بر متر برآورد گردیده است. بنابراین قاب همراه با میراگر هنگام زلزله رفتاری خطی داشته و نیروها و



شکل ۱۹. برش پایه قاب در دو حالت با میراگر و بدون میراگر.



شکل ۲۰. لنگر ستون کناری قاب در دو حالت با میراگر و بدون میراگر.

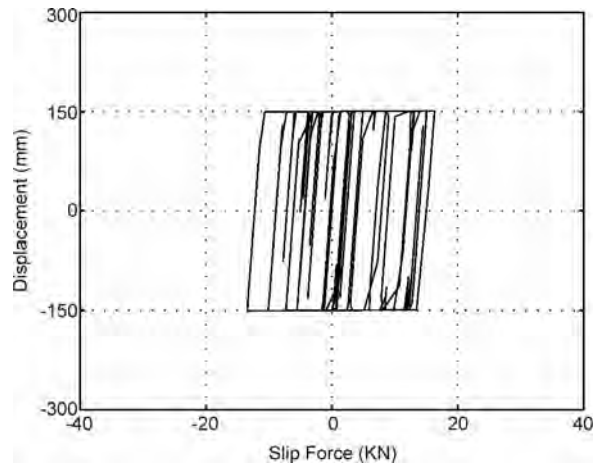
طراحی شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. با توجه به کاربردی بودن این وسیله باید مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی عملکرد دینامیکی میراگر صورت گیرد.

با مقایسه نتایج عملکرد سطوح مختلف سایشی مانند فلز برنج و لنت ترمز مشخص گردید مواد با مقاومت سایشی بالا مانند لنت ترمز تا چه اندازه در عملکرد میراگر مؤثر است و در سیکل‌های زیاد میزان اتلاف انرژی میراگر بدون تغییر بوده و منحنی‌های هیستریزیس آن دارای شکل منظم و کاملاً یکنواختی است. در حالی که در میراگر با صفحات آلیاژ برنجی، به هیچ وجه عملکرد میراگر با لنت ترمز را ندارد. قابل ذکر اینکه مقدار ضریب اصطکاک برای لنت ترمز ۰/۱۶ و برای آلیاژ برنج ۰/۳۴ برآورد گردید. به منظور کنترل نیروی لغزش در میراگر یک رابطه تجربی نیز ما بین نیروی لازم جهت لغزش و لنگر اعمال شده به پیچ‌های اصطکاکی ارائه شده است. این رابطه وابستگی کامل به ضریب اصطکاک سطوح و مشخصات هندسی پیچ در اتصال اصطکاکی دارد.

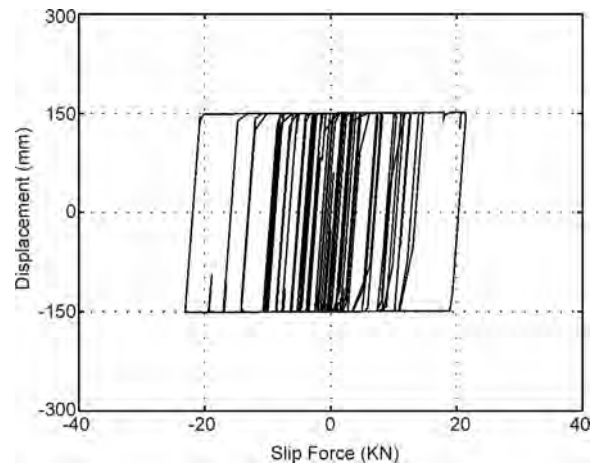
استفاده از لنت ترمز به عنوان یک عنصر مقاوم در رفتار سایشی، از نکات مهم و با اهمیت در این مطالعه محسوب می‌گردد. در حقیقت رفتار یکنواخت و منظم این وسیله استهلاکی در حرکت‌های سیکلی متوالی، نشان‌دهنده مقاومت سطوح لغزشی در مدت بارگذاری است. با ارزیابی نتایج به دست آمده در مطالعه آزمایشگاهی، ویژگی‌های زیر را می‌توان برای میراگر اصطکاکی *FBP* نام برد.

- ۱- پایداری در برابر تغییر مکانهای مختلف؛
 - ۲- پایداری در تعداد سیکل‌های زیاد؛
 - ۳- وابستگی خطی انرژی اتلافی با تغییر مکان؛
 - ۴- مستقل بودن عملکرد نسبت به فرکانس‌های بارگذاری؛
 - ۵- یکنواخت بودن بار لغزش در طول مدت جابه‌جایی؛
 - ۶- ایجاد محدوده وسیعی از بار لغزش در میراگر.
- با توجه به مشخصات عنوان شده برای میراگر فوق، کاربرد میراگر *FBP* جهت مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر نیروهای دینامیکی، بسیار مؤثر و مفید است.

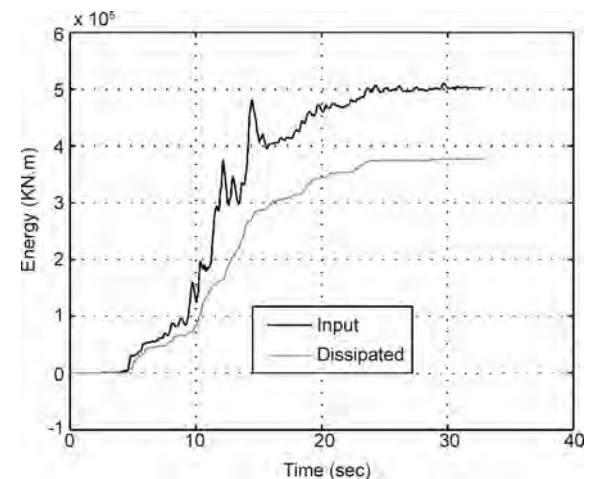
با محاسبه زمان تناوب قاب در مدل قاب خمشی تنها و قاب همراه میراگر مشاهده می‌گردد که زمان تناوب قاب با افزودن میراگر کاهش یافته و در حقیقت سختی قاب افزایش یافته است. افزایش میراگر به قاب علاوه بر افزایش سختی قاب، برش پایه قاب را نیز کاهش داده است. به عبارت دیگر هم تغییر مکان و هم برش پایه قاب، با اضافه کردن میراگر کاهش یافته است. بدیهی است کاربرد میراگر باعث افزایش میرایی و



شکل ۲۱. رفتار هیستریزیس میراگر اصطکاکی نصب شده در طبقه پنجم.



شکل ۲۲. رفتار هیستریزیس میراگر اصطکاکی نصب شده در طبقه اول.



شکل ۲۳. انرژی ورودی و انرژی مستهلک شده در میراگر با توجه به اعمال زلزله طیس به قاب.

۷- نتیجه گیری

مطالعه انجام شده، در رابطه با ساخت یک میراگر اصطکاکی مقاوم و پایدار در برابر نیروهای دینامیکی است. بنابراین با استفاده از لنت‌های ترمز صنعتی یک میراگر اصطکاکی *FBP*

7. Aiken, I., Kelly, J.M., and Pall, A. (1987). "Seismic Response of Nine-Story Steel Frame with Friction Damped Cross-Bracing", Report, No. UCB/EERC-88/17, EERC, University of California at Berkeley.
 8. Butterworth, J.W. (2000). "Ductile Concentrically Braced Frames Using Slotted Bolted Joints", *Journal of the Structural Engineering Society New Zealand (Inc), SESOC*, **13**, (1), 39-48.
 9. Mualla, I.H. and Bele, B. (2002). "Performance of Steel Frames with a New Friction Damper Device under Earthquake Excitation", *Engineering Structures*, **24**, 365-371.
 10. Wu, B., Zhang, J., and Williams, M. (2003). "Testing and Numerical Analysis of the Braces of Pall Frictional Dampers", *Proceedings of 16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle.
 11. Pall, A., Vezina, S., Proulx, P., and Pall, R. (1993). "Friction-Dampers for Seismic Control of Canadian Space Agency Headquarters", *Earthquake Spectra*, **9**(3), 547-557.
 12. Pall, R., Gauthier, G., and Pall, A. (2000). "Friction-dampers for Seismic Upgrade of Quebec Police Headquarters, Montreal", *Proceeding on the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 2014.
 13. Filiatrault, A. and Cherry, S. (1990). "Seismic Design Spectra for Friction-Damped Structures", *Journal of Structural Engineering*, **116**(5), 1334-1355.
 14. DIN 2092 Disk Springs Washers, Calculation.
 15. DIN 2093 Disk Springs Washers, Dimensions and Quality Specifications.
 16. Manual on Design and Manufacture of Coned Sisk Spring (Belleville Spring) and Spring Washers, SAE HS 1582 First Edition (1988).
 17. ATC-24 "Applied Technology Council" (1992).
- استهلاک درصد بالایی از انرژی لرزه‌ای در سازه شده است. در این حالت مقدار میرایی معادل ۲۴ درصد برآورد می‌شود که علت اصلی کاهش همزمان نیرو و تغییر مکان در قاب است. بنابراین جهت کنترل نیروهای لرزه‌ای، استفاده از میراگر اصطکاکی نسبت به دیگر روش‌های کنترل سازه‌ها، بسیار ارزان و مقرون به صرفه است. از این رو می‌توان برای کنترل نیروهای جانبی در ساختمان‌های متعارف و معمول از آنها استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

در این اینجا لازم است از مدیران و استادان گرامی در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله بخصوص پژوهشکده سازه و پرسنل آزمایشگاه سازه که در انجام این تحقیق، ساخت و برپا کردن کلیه نمونه‌های آزمایش ما را یاری و کمک نموده‌اند تشکر و قدردانی گردد.

مراجع

1. Soong, T.T. and Dragush, G.F. (1997). "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering", John Wiley and Sons.
2. Cherry, S. and Filiatrault, A. (1993). "Seismic Response Control of Buildings Using Friction Dampers", *Earthquake Spectra*, **9**(3), 447-466.
3. Pall, A.S. and Pall, R. (1989). "Friction-Dampers Used for Seismic Control of New and Existing Building in Canada", ATC-17-1, *Proceeding of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation*, Applied Technology Council, 675-686.
4. Grigorian, C.E., Yang, T.S., and Popov, E.P. (1993). "Slotted Bolted Connection Energy Dissipaters", *Earthquake Spectra*, **9**(3), 491-504.
5. Pall, A.S. and Marsh, C. (1982). "Response of Friction Damped Braced Frame", *Journal Struct. Div., ASCE*, **108**(ST6), 1313-1323.
6. Filiatrault, A. and Cherry, S. (1987). "Performance Evaluation of Friction Damped Steel Frame under Simulated Earthquake Loads", *Earthquake Spectra*, **3**(1), 57-78.