

میراگر فلزی جاری شونده دندانه شانه‌ای برای بهبود رفتار چرخه‌ای قاب‌های فولادی

صادق گریوانی^۱، علی اکبر آقاچوک^۲، شریف شاه‌بیک^۳

۱- دانشجوی دکترای سازه، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

a_gha@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱/۲۶]

چکیده - در این مقاله یک میراگر فلزی جاری شونده جدید به نام "میراگر دندانه شانه‌ای" معرفی شده است. این میراگر از ورق‌های فولادی ساخته شده و شامل تعدادی دندانه است که انرژی ورودی را از طریق تسلیم خمشی درون صفحه خود مستهلک می‌کند. برای این دندانه‌ها هندسه‌ای پیشنهاد شده است که توزیع یکنواخت تنش در طول آن‌ها را تضمین کرده و از ایجاد تمرکز تنش در نواحی محدودی از دندانه جلوگیری می‌کند. نتایج مدل‌سازی‌های المان محدود و نیز آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که میراگر طراحی شده پاسخ‌هایی مطابق با اهداف طراحی را از خود بروز می‌دهد. سه نمونه از این میراگرها با مقیاس واقعی ساخته شده و به صورت چرخه‌ای تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها ضمن تحمل جابه‌جایی تجمعی قابل توجه، منحنی هیستریزیس کاملاً پایداری نیز دارند. پس از آزمایش نمونه‌های تنها، دو قاب ساده فولادی مجهز به میراگر دندانه شانه‌ای نیز ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شده‌اند. برای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه دندانه‌ها و نیز ناپایداری سیستم میراگر و مهاربند در قاب‌ها قیود مناسبی طراحی و اجرا شده‌اند. یکی از این قاب‌ها در دامنه حداکثری متناظر با جابه‌جایی نسبی طبقه ۲ درصد، بیست چرخه کامل رفت و برگشت را بدون کاهش سختی و مقاومت و بروز هرگونه آثار خرابی تحمل کرده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این میراگرها توانایی استهلاک انرژی بالایی را داشته و با طراحی مناسب می‌توان از آن‌ها در سازه‌ها استفاده کرد.

واژگان کلیدی: میراگرهای فلزی جاری شونده، میراگر دندانه شانه‌ای، استهلاک انرژی، قاب‌های فولادی.

۱. مقدمه

در حال حاضر استفاده از سیستم‌های استهلاک انرژی غیرفعال در سازه‌ها به عنوان روشی مؤثر و به نسبت کم هزینه برای کاهش خطر زلزله شناخته می‌شود. این استهلاک انرژی می‌تواند بر پایه‌ی سازوکارهای مختلفی صورت پذیرد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تغییر شکل‌های غیرارتجاعی فلز شکل‌پذیر در میراگرهای فلزی، لغزش اصطکاکی در میراگرهای اصطکاکی، عبور سیال از روزنه‌های باریک در میراگرهای ویسکوز و تغییر شکل مواد ویسکوالاستیک در میراگرهای ویسکوالاستیک اشاره کرد.

اولین طرح‌های پژوهشی در زمینه استفاده از میراگرهای فلزی به وسیله‌ی کلی^۱ و اسکینر^۲ در اوایل دهه ۱۹۷۰ ارائه شد [1] و [2] و با پژوهش‌های متنوع و گسترده دیگر پژوهشگران ادامه یافت. این وسایل به عنوان مستهلک کننده انرژی در سازه‌ها تعبیه شده و با تحمل تغییر شکل‌های خمیری، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی به سازه را تلف می‌کنند. هدف اصلی از استفاده این وسایل وقوع خرابی‌ها روی قطعاتی از پیش تعیین شده و قابل تعویض و در پایان سالم ماندن سازه اصلی است. تاکنون

1. Kelly
2. Skinner

آزمایش قرار داده‌اند. بناونت^۷ نیز بر اساس مفهوم عملکردی این میراگرها یک میراگر مهاربندگونه را پیشنهاد و آزمایش کرده است [16]. علاوه بر این دست پژوهش‌ها، برخی پژوهشگران نیز سعی کرده‌اند تا هندسه بهینه‌ای برای بازشوهای این میراگرها پیشنهاد نمایند که از بین آن‌ها می‌توان مطالعات قبرایی^۸ و همکاران [۱۷] و نیز ما^۹ و همکاران [18] را نام برد.

با در نظر گرفتن نتایج مطالعات انجام شده روی میراگرهای شیاردار، در این مقاله یک میراگر فلزی جاری شونده جدید که بر پایه تغییر شکل‌های خمشی درون صفحه عمل می‌کند، معرفی می‌شود. این میراگر از تعدادی دندانانه تشکیل شده و هندسه این دندانانه‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که توزیع تنش یکنواخت در کل نمونه را تضمین نموده با عدم وقوع تمرکز تنش در نقاطی محدود از عضو، امکان تحمل چرخه‌های زیاد بارگذاری و تامین شکل پذیری بالا را فراهم می‌نماید. به دلیل هندسه خاص این میراگر، نام میراگر دندانانه شانه‌ای^{۱۰} برای آن انتخاب شده است. مانند اغلب میراگرهای فلزی دیگر، این میراگر می‌تواند مابین مهاربند شورون و تیر قرار گرفته و با تحمل تغییر شکل‌های بزرگ غیر موجب استهلاک انرژی شود. پس از طراحی هندسه میراگر و کنترل رفتار آن با استفاده از مدل‌های المان محدود، سه نمونه از این نوع میراگر با هندسه یکسان مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. ضمناً دو قاب ساده فولادی شامل این نوع میراگر نیز ساخته شده و رفتار چرخه‌ای آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. معرفی میراگر دندانانه شانه‌ای

شکل ۲- الف نمایی از میراگر دندانانه شانه‌ای را نشان می‌دهد که در یک قاب ساختمانی مابین مهاربند شورون و تیر طبقه قرار داده شده است. اجزای یک میراگر دندانانه شانه‌ای نیز در شکل ۲- ب آورده شده است. قسمت فوقانی میراگر با استفاده از یک المان T شکل و به وسیله‌ی پیچ‌های پر مقاومت به طور کامل به تیر متصل شده اما در بخش تحتانی، اتصال میراگر به مهاربند شورون از طریق سوراخ‌های لویبایی تعبیه شده در المان T شکل این ناحیه

میراگرهای فلزی متنوعی با سازوکارهای متفاوت جاری شدن پیشنهاد و بررسی شده است. به صورت کلی این نوع از میراگرها را می‌توان از نظر چگونگی جاری شدن به چهار گروه خمشی، محوری، برشی و پیچشی تقسیم بندی کرد.

از معروف‌ترین میراگرهایی که انرژی ورودی به سازه را با بهره‌گیری از تغییر شکل‌های خمشی مستهلک می‌کنند می‌توان به میراگرهای^۱ ADAS و^۲ TADAS اشاره کرد [۳-۶۷]. میراگرهای ADAS و TADAS به ترتیب از صفحات فلزی به شکل X و صفحات مثلثی تشکیل شده‌اند که به صورت خمشی در خارج از صفحه خود عمل می‌کنند. هندسه این صفحات فلزی به گونه‌ای طراحی شده است که توزیع تنش در تمام ارتفاع آن یکنواخت بوده و تمام بخش‌های آن به مرحله تسلیم می‌رسد. یکی دیگر از انواع پر کاربرد فلزی، مهاربندهای کمانش تاب^۳ (BRB) است که یک مهاربند تسلیمی محوری (کششی- فشاری) است [۸ و ۹]. رایج‌ترین نوع این میراگر از یک هسته فلزی واقع در یک غلاف بتنی تشکیل شده که در این جا نقش بتن پیرامونی، جلوگیری از کمانش هسته فلزی است. تحت بارگذاری محوری، مقطع فلزی تسلیم شده و بدین طریق انرژی مستهلک می‌شود. پانل‌های برشی فولادی نیز نوع دیگری از میراگرهای فلزی جاری شونده است که انرژی را با تغییر شکل‌های خمیری برشی مستهلک می‌کند [۱۲-۱۰]. علاوه بر انواع فوق، میراگرهایی که بر پایه تغییر شکل خمیری پیچشی عمل می‌نمایند را نیز می‌توان نام برد [۱۳].

میراگرهای شیاردار^۴ نوع خاصی از میراگرهای فلزی است که از ورق‌هایی فلزی با تعدادی شیار و یا بازشو تشکیل شده‌اند که حین بارگذاری، تحت تغییر شکل‌های خمیری درون صفحه قرار می‌گیرند. شیارها یا بازشوهای یاد شده، ورق فلزی را به تعدادی لینک تقسیم می‌کند که تحت تغییر شکل برشی کلی ورق، به صورت موازی با هم ترکیب شده و دارای عملکرد خمشی درون صفحه است. در خصوص این میراگرها نیز پژوهشی انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات لی^۵ و لی^۶ [۱۴] و نیز ریکی و همکاران [15] اشاره داشت که تعدادی میراگر شیاردار را مورد

1. Added Damping and Stiffness
2. Triangular ADAS
3. Buckling Restrained Brace
4. Slit Damper
5. Li
6. Li

7. Benavent

8. Ghabraei

9. Ma

10. Comb-Teeth Damper (CTD)

A و فرض حاکم بودن تئوری تیر اوایلر-برنولی، مقدار تنش نرمال در تار بیرونی مقطع قبل از تسلیم، $\sigma(x)$ ، با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{S(x)} = \frac{6fx}{tb^2(x)} \quad \text{رابطه ۱}$$

که x و $b(x)$ به ترتیب فاصله از انتهای تحتانی دندان، ضخامت ورق میراگر، و عرض دندان در فاصله x است.

به لحاظ توانایی استهلاک انرژی، شکل دندانها باید باعث ایجاد تنش یکنواخت و عدم وقوع تمرکز تنش در طول دندان شود. ایجاد تنش یکنواخت در طول عضو بدین معنی است که مقدار تنش بیشینه در هر مقطع در طول دندان (رابطه ۱)، مستقل از مقدار x باشد. بنابراین اگر مقدار عرض مقطع ضریبی از ریشه دوم x باشد آنگاه داریم

$$b(x) = 2\lambda\sqrt{x} \quad \text{رابطه ۲}$$

که λ ضریب شکل دندان و واحد آن ریشه دوم واحد طول است. مقدار این ضریب تعیین کننده شکل دندان خواهد بود. با توجه به ثابت بودن مقدار t و λ برای یک دندان، با جایگذاری رابطه ۲ در رابطه ۱، مقدار تنش نرمال در تار بیرونی مقطع، قبل از تسلیم، به صورت زیر و مستقل از x به دست خواهد آمد.

$$\sigma(x) = \frac{3f}{2t\lambda^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

رابطه ۳ نشان می دهد که با افزایش مقدار بار، تمام تارهای بیرونی در طول دندان به صورت همزمان به مقدار تنش تسلیم خواهند رسید. با قرار دادن مقدار تنش تسلیم، σ_y ، به جای $\sigma(x)$ در رابطه ۱، می توان مقدار بار متناظر با تسلیم بیرونی ترین تار یک دندان را محاسبه کرد. از این به بعد به دندانهای که از تابع ارائه شده در رابطه ۲ تبعیت نمایند، دندان سه می گون^۱ نامیده می شود. با فرض رفتار ماده و به کار بردن روابط تحلیلی مکانیک جامدات، سختی الاستیک، K_l^e ، مقاومت تسلیم، f_y و جابه جایی تسلیم هر دندان، δ_y ، به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود.

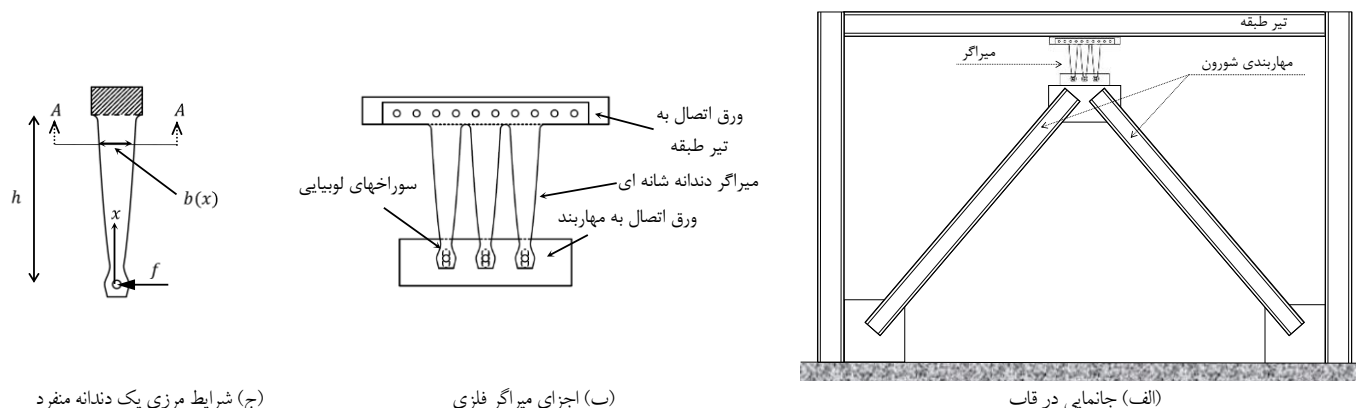
انجام می پذیرد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی میراگر، با اعمال تغییر مکان جانبی به طبقه هر یک از دندانهای این میراگر به صورتی که در شکل ۲-ج نشان داده شده است، تحت یک نیروی درون صفحه برشی قرار خواهد گرفت و می تواند با تغییر شکل-های خمیری درون صفحه، انرژی ورودی را مستهلک نماید. لازم به گفتن است این دندانها به گونه ای طراحی شده اند که تسلیم در آنها ناشی از رسیدن تنش های نرمال ناشی خمش درون صفحه به تنش تسلیم بوده و تسلیم برشی سهم ناچیزی در استهلاک انرژی خواهد داشت.

سوراخ های لوبیایی در اتصال تحتانی میراگر به این دلیل در نظر گرفته شده اند که استفاده از سوراخ های استاندارد دایره ای می تواند سبب جلوگیری از تغییر مکان انتهای دندان و ازدیاد طول آن به هنگام بارگذاری در یک جهت شده و با تغییر جهت اعمال نیرو در بارگذاری های چرخه ای، این ازدیاد طول می تواند باعث ایجاد نیروی محوری در آن و در نهایت منجر به کماتش و شکست آن شود [18].

علاوه بر فرآیند ساخت و جانمایی میراگر در قاب، تفاوت اصلی میراگر دندانهای معرفی شده در این مقاله با نمونه های قبلی از جمله میراگرهای YBS معرفی شده در مرجع ۷، رفتار درون صفحه ورق های فولادی در میراگر دندان شانه ای در مقایسه با رفتار خارج از صفحه آنها در پژوهش یاد شده است. رفتار درون صفحه ورق می تواند سختی بیشتری را در مقایسه با رفتار خارج از صفحه آن تأمین کرده و در صورت بروز رفتار چرخه ای مناسب، در نهایت می تواند منجر به کاهش تعداد میراگرهای مورد نیاز در سازه شود.

۳. طراحی شکل دندانهای میراگر

همان گونه که اشاره شد، میراگر دندان شانه ای، از تعدادی دندان مجزا تشکیل شده است که این دندانها موازی با یکدیگر عمل می نمایند. بنابراین برای بررسی رفتار این میراگر، کافی است رفتار یکی از این دندانها را مورد بررسی قرار دهیم. در صورتی که میراگر تحت نیروی برشی به اندازه F قرار گیرد، نیروی وارد بر هر دندان، $f = \frac{F}{n}$ خواهد بود. که n تعداد دندانهای تشکیل دهنده میراگر است. با در نظر گرفتن شرایط مرزی حاکم بر هر دندان (شکل ۲-الف)، این نیروی برشی، لنگری با توزیع مثلثی شکل در طول دندان ایجاد می نماید. برای یک مقطع دلخواه مانند مقطع A-



(ج) شرایط مرزی یک دندان منفرد

(ب) اجزای میراگر فلزی

(الف) جانمایی در قاب

شکل ۲: نمونه‌ای از میراگرهای فلزی دندانانه شانه‌ای

تسلیم تارهای بیرونی مقطع، f_y را می‌توان از رابطه ۵ تعیین کرد. با توجه به مستطیلی بودن مقطع، لنگر خمیری آن $1/5$ برابر لنگر تسلیم آن و تنش برشی بیشینه آن نیز $1/5$ برابر تنش برشی متوسط است. با فرض ضریب $1/5$ برای در نظر گرفتن اثر اضافه مقاومت ناشی از سخت شوندگی کرنشی بر ظرفیت نهایی هر دندان، خواهیم داشت

$$\tau_{max} = 1.5 \times 1.5 \frac{1.5 f_y}{b_{min} t} < \tau_y = 0.6 \sigma_y \quad \text{رابطه ۸}$$

با جایگذاری رابطه ۵ در رابطه ۸، مقدار کمینه عرض مورد نیاز برای هر دندان به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$b_{min} > 3.75 \lambda^2 \quad \text{رابطه ۹}$$

۴. تحلیل المان محدود

برای کنترل فرضیات به کار رفته در طراحی میراگر دندانانه شانه‌ای و نیز بررسی دقت روابط تحلیلی ارائه شده در بخش قبل برای سختی، مقاومت و جابه‌جایی تسلیم دندانانه‌ها، تحلیل‌های غیر خطی المان محدود انجام گرفته است. برای سادگی تحلیل‌ها، تنها یک دندانانه سهمی‌گون در نرم افزار المان محدود مدل شده است. در این دندانانه، $\lambda = 1.75 \text{ mm}^{0.5}$ ، $h = 235 \text{ mm}$ و $t = 10 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. مشخصات ماده بر اساس آزمایش کشش ساده بر روی نمونه ساخته شده از ورق مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تعیین شده است. بر اساس نتایج این آزمایش، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به ترتیب 204 گیگاپاسکال و 274 مگاپاسکال به دست آمده است. سخت شوندگی ماده نیز با استفاده از مدل سخت شوندگی ترکیبی همسانگرد-جنشی در نظر گرفته شده است [19].

$$K_l^e = \frac{Et\lambda^3}{h^{\frac{3}{2}}} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$f_y = \frac{2}{3} t \lambda^2 \sigma_y \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\delta_y = \frac{2\sigma_y h^{\frac{3}{2}}}{3E\lambda} \quad \text{رابطه ۶}$$

که E و h به ترتیب طول دندانانه و مدول الاستیسیته ماده است. لازم به ذکر است تمام این محاسبات و نتایج بدست آمده از آن‌ها بر این فرض استوار است که کمانش خارج از صفحه در دندانانه رخ نداده و رفتار دندانانه مورد بررسی از تئوری تیر اویلر-برنولی پیروی می‌کند. بحث کمانش خارج از صفحه در بخش‌های بعدی بررسی می‌شود اما برای کنترل فرض تبعیت رفتار دندانانه از تئوری تیر اویلر-برنولی، می‌توان انرژی‌های برشی و خمشی را در المان مورد بررسی به دست آورده و با یکدیگر مقایسه کرد. برای هر دندانانه فولادی نسبت انرژی برشی، U_s ، به انرژی کل، U ، برابر مقدار زیر به دست می‌آید.

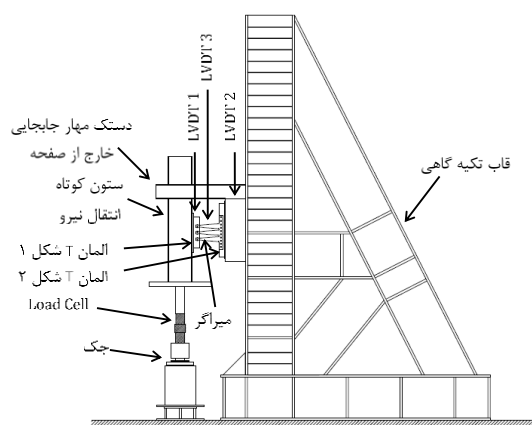
$$\frac{U_s}{U} = \frac{3.9\lambda^2}{3.9\lambda^2 + h} \quad \text{رابطه ۷}$$

در این مقاله، λ به گونه‌ای انتخاب شده است که این نسبت به کمتر از 10% درصد محدود شده و اطمینان کافی از صحت فرضیات در نظر گرفته شده وجود داشته باشد. ضمناً برای آنکه هر دندانانه بتواند رفتار مورد نظر را بروز دهد، باید ظرفیت برشی کافی داشته باشد. بنابراین با توجه به آنکه نیروی برشی از نقطه اعمال نیرو تا انتهای دندانانه ثابت است، برای تامین ظرفیت برشی کافی در طول لینک، عرض مقطع نمی‌تواند از صفر شروع شده و باید مقدار برای آن تعیین نمود. این عرض کمینه باید توانایی تحمل نیروی برشی متناظر با مقاومت خمشی نهایی دندانانه را داشته باشد. نیروی برشی متناظر با



شکل ۳: توزیع تنش در طول دندان در گام‌های مختلف بارگذاری

فولاد مصرفی در بخش قبل آورده شده است. مشخصات هندسی دندانها نیز همان مشخصات نمونه مدل شده در بخش قبل است. در شکل ۴ چگونگی برپایی مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میراگر بین قاب تکیه‌گاهی و یک بازوی بارگذاری قرار داده شده است. دو لایه از میراگرهای دندان‌شانه‌ای دارای سه دندان با جزئیاتی که در شکل ۲-ب شرح داده شد، در طرفین این المان‌های T شکل قرار داده شده است. یک لایه روکش آهکی ترد نیز بر روی سطح میراگرها کشیده شده است تا بتوان نواحی تسلیم شده دندانها و رشد تدریجی این نواحی در طول آزمایش را دنبال نمود. بارگذاری نمونه‌ها به صورت شبه استاتیکی و جابه‌جایی کنترل بوده و به وسیله یک جک رفت و برگشتی دستی با ظرفیت ۵۰ کیلو نیوتن انجام پذیرفته است. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی نسبی درون صفحه و نیز جابه‌جایی خارج از صفحه دندانها، سه جابه‌جایی سنج به صورتی که در شکل ۴ نمایش داده شد، به کار گرفته شده است.



شکل ۴: برپایی مدل آزمایشگاهی و اجزای تشکیل دهنده

دندان مورد بررسی، ابتدا به صورت مونوتونیک بارگذاری شده است. شکل ۳ توزیع تنش فون میسر در طول دندان در سه سطح از جابه‌جایی جانبی را نشان می‌دهد (قسمت‌های تیره در طول لینک بیانگر رسیدن تنش فون میسر به تنش تسلیم است). همان‌گونه که دیده می‌شود، تسلیم تارهای بیرونی و نیز گسترش نواحی خمیری در طول دندان به صورت هم‌زمان و یکنواخت رخ داده است. سختی، جابه‌جایی تسلیم و مقاومت تسلیم از نتایج تحلیل المان محدود استخراج شده و با اعدادی که با استفاده از روابط تحلیلی به دست آمده‌اند، در مقایسه شده‌اند. از آنجا که این نتایج به صورت رضایت بخشی مشابه یکدیگر است، روابط تحلیلی پیشنهادی این مقاله می‌تواند با اطمینان کافی برای طراحی میراگرهای دندان‌شانه‌ای استفاده شود.

جدول ۱: نتایج تحلیل المان و روابط تحلیلی (واحدها: نیوتن، میلی‌متر)

روش	f_y	K_l^e	δ_y
روابط تحلیلی	۵۵۹۴	۲۹۵۳	۱/۸۹
مدل المان محدود	۵۵۷۲	۳۰۲۸	۱/۸۴

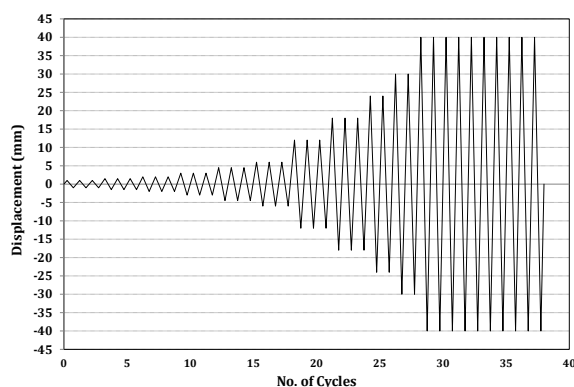
۵. مطالعه آزمایشگاهی نمونه‌های میراگر

برای مطالعه آزمایشگاهی رفتار میراگر پیشنهادی، سه نمونه با مقیاس واقعی ساخته و به صورت چرخه‌ای بارگذاری شده است. این نمونه‌ها دارای سه دندان بوده و از ورق فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با استفاده از روش برشکاری واترجت^۱ برای پرهیز از ایجاد تنش‌های پسماند حرارتی ساخته شده‌اند. مشخصات مکانیکی

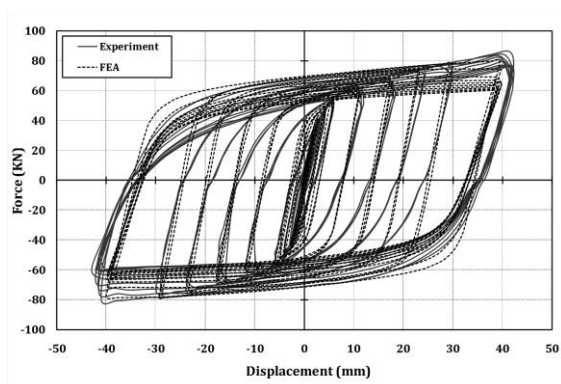
1. Waterjet

۱-۵. نمونه شماره ۱ (CTD1)

نامطلوبی بر رفتار میراگر به ویژه به لحاظ توان استهلاک انرژی و نیز تعداد چرخه‌های بارگذاری قابل تحمل به وسیله‌ی میراگر داشته باشد. برای رفع این مشکل، با افزودن یک قید کم‌انرژی تغییرات کوچکی در هندسه نمونه دوم داده شده است (شکل ۸). این قید شامل یک ورق ۱۵ میلی‌متری و دو عدد پروفیل ناودانی که ورق یاد شده بین لایه‌های میراگر و پروفیل‌های ناودانی در طرفین میراگر نصب شده و این سه بخش به وسیله‌ی پیچ‌هایی به یکدیگر وصل شده و یک المان مقید کننده در برابر کم‌انرژی را شکل می‌دهند. این قید هیچ گونه ممانعتی برای تغییر شکل‌های درون صفحه میراگر ایجاد نمی‌نماید. تاریخچه جابه‌جایی اعمال شده به CTD2 در شکل ۹ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود به دلیل عملکرد مناسب قید کم‌انرژی، نمونه CTD2 نسبت به CTD1 تعداد چرخه‌های بیشتری تحمل کرده است.



شکل ۵: تاریخچه جابه‌جایی اعمال شده به CTD1



شکل ۶: منحنی نیرو- جابه‌جایی CTD1

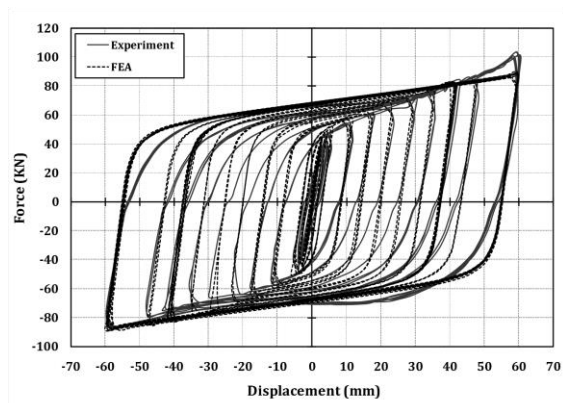


شکل ۷: تسلیم هم‌زمان تارهای بیرونی در طول دندان‌ها

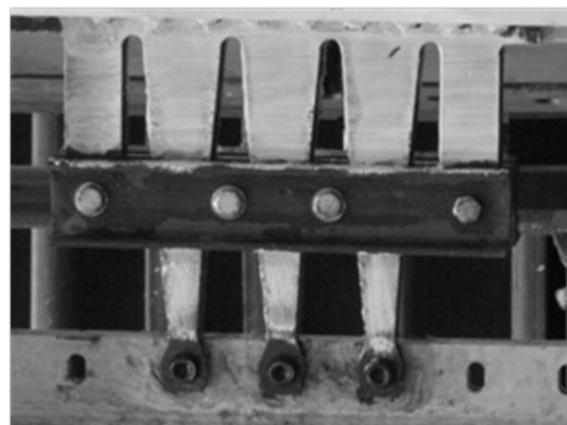
تاریخچه جابه‌جایی اعمال شده به CTD1 و منحنی نیرو- جابه‌جایی ثبت شده در طول آزمایش برای این نمونه به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ آورده شده است. تسلیم میراگر در جابه‌جایی در حدود ۲ میلی‌متر شروع شده و همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، مطابق انتظار و هدف طراحی، به دلیل توزیع یکنواخت تنش در طول دندان، تارهای بیرونی به صورت هم‌زمان در طول دندان تسلیم شده‌اند. از آنجا که جابه‌جایی خارج از صفحه دندان‌ها در این نمونه مقید نشده بود، در طول آزمایش، کم‌انرژی جانبی دندان‌ها شروع شده و در چرخه‌های متوالی نیز مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه ناشی از این پدیده تشدید یافته است. جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی جابه‌جایی سنج شماره ۳ نشان می‌دهد که مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه دندان‌ها در اولین چرخه با دامنه جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متر به شدت افزایش یافته است که این رخداد منطبق بر کاهش مقاومت نمونه در منحنی هیستریزس آن نیز می‌باشد. این کاهش مقاومت تا پایان چرخه دهم دامنه ۴۰ میلی‌متر ادامه پیدا کرده است به گونه‌ای که در این گام بارگذاری مقدار کاهش مقاومت به ۲۵ درصد مقاومت نهایی نمونه رسیده است. با وجود اینکه بررسی کلی نمونه در این مرحله هیچ گونه ترک خوردگی در نمونه را نشان نمی‌دهد، آزمایش به دلیل افت زیاد مقاومت نمونه، در همین گام متوقف شده است. این دامنه جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متری نسبت به جابه‌جایی تسلیم ۲ میلی‌متری متناظر با ضریب شکل‌پذیری $\mu \approx 20$ خواهد بود. در کنار آزمایش این نمونه، مدل المان محدودی نیز از آن ساخته شده و مشابه تاریخچه بارگذاری آزمایشگاهی تحت بار قرار گرفته است. لازم به گفتن است در این مدل، پدیده کم‌انرژی جانبی نیز در نظر گرفته شده و تحلیل با خروج از مرکزیت اولیه ۱ میلی‌متری متناظر با مود اول کم‌انرژی جانبی دندان‌ها انجام پذیرفته است. منحنی نیرو- جابه‌جایی به دست آمده از این تحلیل نیز در شکل ۶ آورده شده است که هماهنگی مناسبی با نتیجه آزمایش داشته و نیز چرخه متناظر با افت مقاومت ناشی از کم‌انرژی را به صورت صحیح پیش‌بینی نموده است.

۲-۵. نمونه شماره ۲ (CTD2)

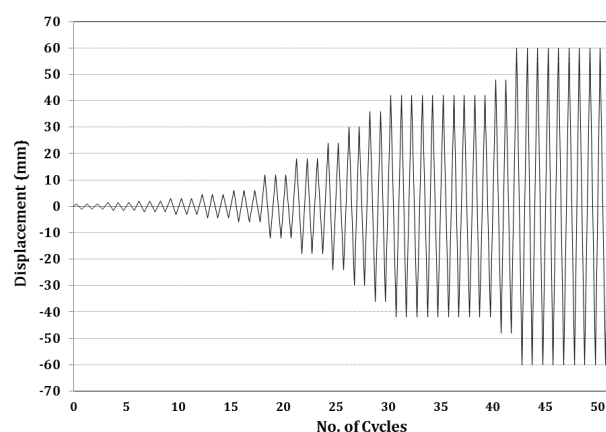
آزمایش CTD1 نشان داد که اگر دندان‌ها مقید نشود، این اعضا ممکن است دچار کم‌انرژی جانبی شوند. این پدیده می‌تواند اثرات



شکل ۱۰: منحنی نیرو-جابجایی CTD1



شکل ۸: نمای از نمونه CTD2



شکل ۹: جابه‌جایی اعمال شده به CTD2

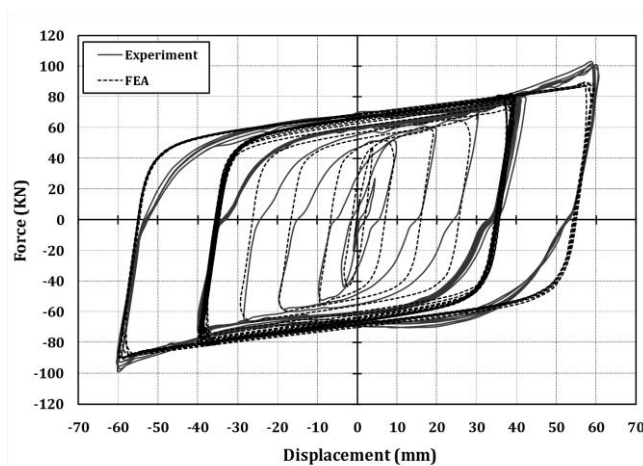
علاوه بر موارد یاد شده، با توجه به اعمال جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر نسبت به نمونه اول، در منحنی نیرو-جابجایی نمونه دوم مقداری رشد مقاومت در چرخه‌های آخر دیده می‌شود که این پدیده علاوه بر آثار سخت‌شدگی کرنشی، به علت اعمال تغییر شکل‌های زیاد و در نتیجه غیرخطی شدن هندسی است. مشابه این رفتار در بسیاری از میراگرهای فلزی آزمایش شده در پژوهش‌های گذشته نیز مشاهده شده است [۵ و ۷]. بنابراین در طراحی اعضای مجاور این میراگرها در قاب، این رشد مقاومت باید به شکل مناسبی در نظر گرفته شود. برای این منظور لازم است که در طراحی سازه مجهز به این نوع میراگر اولاً منحنی رفتار با در نظر گرفتن آثار سخت‌شدگی کرنشی به دست آید و ثانیاً تغییر فرم میراگر به حدود معینی محدود شود.

۳-۵. نمونه شماره ۳ (CTD3)

مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش دو نمونه اول به خوبی اثر مثبت مقید کردن در برابر کمناش را روی رفتار چرخه‌ای میراگر پیشنهادی نشان داد. بر اساس مشاهدات به دست آمده از آزمایش دوم می‌توان نتیجه گرفت که رفتار میراگر پیشنهادی به شکلی است که می‌توان از این وسیله به عنوان یک مستهلک کننده انرژی در سازه‌ها استفاده کرد. طبق ضوابط ASCE-41 [20] و نیز FEMA356 [۲۱]. یکی از شرایط احراز صلاحیت میراگرهای وابسته به تغییر مکان برای کاربرد به عنوان وسایل اتلاف انرژی در سازه‌ها، توانایی تحمل ۲۰ چرخه رفت و برگشتی کامل با دامنه جابه‌جایی متناظر با زلزله سطح خطر ۲ است. نمونه CTD3 برای کنترل این شرط ساخته شده و تحت تاریخچه جابه‌جایی نشان داده شده در شکل ۱۱ قرار داده شده است.

منحنی نیرو-جابجایی این نمونه در شکل ۱۰ آورده شده است. پاسخ هیسترتیک پایدار نمونه CTD2 به خوبی در این شکل قابل مشاهده است. در این نمونه بعد از ده چرخه بارگذاری با دامنه ۴۰ میلی‌متر، هیچ گونه کاهش مقاومت و سختی در رفتار نمونه مشاهده نشده و بنابراین دامنه جابه‌جایی آن تا ۶۰ میلی‌متر افزایش داده شده و آزمایش با چرخه‌های بارگذاری در این دامنه ادامه داده شده است. کاهش مقاومت نمونه در چرخه ششم از این دامنه شروع شده و در نهمین چرخه آن با شکست یکی از دندانه‌ها، آزمایش نیز متوقف شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که نمونه CTD2 قبل از شروع کاهش مقاومت، جابه‌جایی تجمعی قابل توجهی در حدود ۴۰۰۰ میلی‌متر را تحمل کرده بنابراین توانایی استهلاک انرژی بالایی را دارد مانند نمونه قبلی برای این نمونه نیز مدل المان محدودی ساخته شده و نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده از این تحلیل برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این نمونه نیز نتایج مدل عددی هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

عددی در حدود ۲/۷ میلی متر به دست آمده است. بنابراین، با در نظر گرفتن این جابه‌جایی تسلیم مؤثر، دامنه جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متر که میراگر پیشنهادی ۲۰ چرخه کامل آنرا تحمل کرده است، متناظر با $\mu \cong 14.8$ است. این مقدار ضریب شکل‌پذیری می‌تواند در طراحی سازه شامل میراگر پیشنهادی مورد استفاده قرار گیرد.

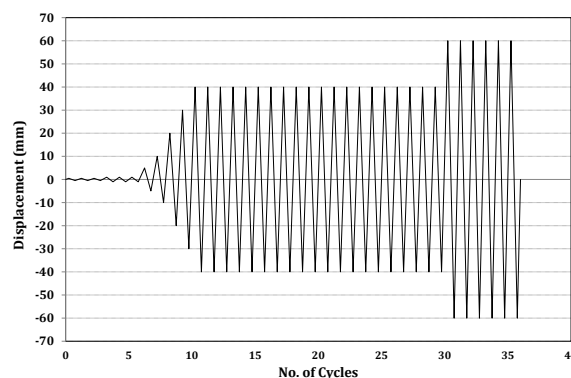


شکل ۱۲: منحنی نیرو- جابه‌جایی CTD3

۵-۴. استهلاک انرژی نمونه‌های آزمایش شده

همان‌گونه که در بالا اشاره شد، منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایش شده کاملاً پایدار بوده، بنابراین انتظار می‌رود ظرفیت استهلاک انرژی زیادی نیز داشته باشند. برای نمایش ظرفیت استهلاک انرژی این میراگرها، در شکل ۱۳ انرژی مستهلک شده به وسیله‌ی هر نمونه آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با توجه به یکسان بودن مشخصات نمونه‌ها و نیز تاریخچه بارگذاری در دو نمونه اول، منحنی‌های آن‌ها بر هم منطبق شده با این تفاوت که بیشینه جابه‌جایی تجمعی تحمل شده به وسیله‌ی این نمونه‌ها قبل از افت مقاومت به ترتیب تقریباً برابر با ۲۲۰۰ و ۴۱۰۰ میلی‌متر است. این عدد برای نمونه CTD3 به حدود ۵۰۰۰ میلی‌متر رسیده است. تفاوت زیاد بین نمونه اول با دو نمونه بعدی، ناشی از نبود قید کم‌انرژی در نمونه CTD1 می‌باشد که باعث شده است در این نمونه بیشینه انرژی مستهلک شده مقدار کمتری به دست آید.

نسبت انرژی مستهلک شده تجمعی به حجم فولاد مصرفی در نمونه CTD3 تقریباً برابر با $4.8 \times 10^{-4} \frac{KJ}{mm^3}$ به دست آمده که عدد قابل ملاحظه‌ای بوده و در مقایسه با نمونه‌های آزمایش شده قبلی عدد به مراتب بزرگتری است [17].



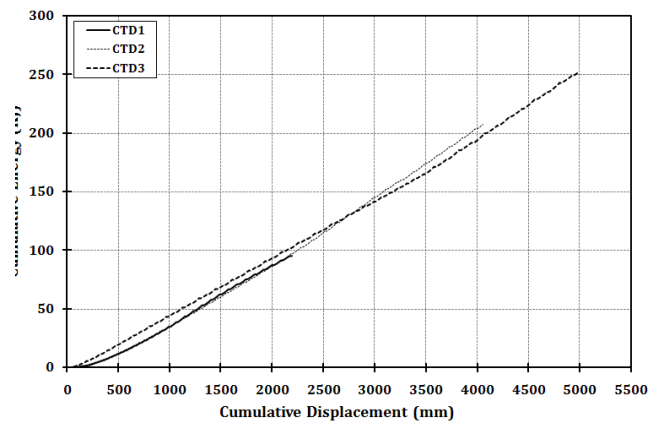
شکل ۱۱: تاریخچه جابه‌جایی اعمال شده به CTD3

نمونه CTD3 از لحاظ هندسه و چگونگی مهار کم‌انرژی جانبی دقیقاً مشابه نمونه CTD2 بوده و تنها تفاوت این دو نمونه، تاریخچه بارگذاری آن‌ها است. لازم به ذکر است در نمونه CTD3 نیز پس از مشاهده رفتار پایدار نمونه بعد از ۲۰ چرخه با دامنه ۴۰ میلی‌متر، ۶ چرخه نیز با دامنه ۶۰ میلی‌متر بارگذاری شده است.

رفتار کلی نمونه CTD3 کاملاً مشابه نمونه CTD2 بوده، پس از ارائه تصاویر مربوط به این نمونه پرهیز شده است. منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه CTD3 در شکل ۱۲ آورده شده است. منحنی هیستریزیس پایدار این نمونه مانند نمونه CTD2 بیانگر رفتار مناسب میراگر پیشنهادی تحت چرخه‌های بارگذاری متعدد است. این نمونه پس از تحمل ۲۰ چرخه کامل با دامنه ۴۰ میلی‌متر و سپس ورود به چرخه‌های با دامنه ۶۰ میلی‌متر، در پایان چرخه ششم از این دامنه دچار شکست در یکی از لینک‌های خود شده و آزمایش این نمونه در همین مرحله متوقف شده است. لازم به گفتن است در رفتار این نمونه قبل از شکست، افت مقاومت خاصی مشاهده نشده است و لحظه شکست متناظر با جابه‌جایی تجمعی در حدود ۵۰۰۰ میلی‌متر است. مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان به دست آمده از آزمایش نمونه CTD3 و مدل عددی آن نیز در شکل ۱۲ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود هماهنگی قابل قبولی بین این نتایج وجود داشته و می‌توان نتایج مدل سازی عددی را با دقت قابل قبولی مورد اطمینان دانست.

طبق محاسبات تحلیلی و نیز نتایج آزمایشگاهی، جابه‌جایی تسلیم میراگر تقریباً برابر ۲/۰ میلی‌متر است. بنابراین با در نظر گرفتن دامنه جابه‌جایی ۶۰ میلی‌متر، ضریب شکل‌پذیری در حدود ۳۰ برای این میراگر به دست می‌آید. با رسم پوش منحنی هیستریزیس و منحنی دو خطی معادل آن برای نمونه CTD3، جابه‌جایی تسلیم مؤثر،

مطالعات عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ها، دو قاب ساده فولادی شامل این نوع میراگرها آزمایش شده است. هدف اصلی از آزمایش این قاب‌ها بررسی رفتار میراگرهای دندانه شانه‌ای در درون یک قاب و نیز بررسی امکان تأمین شرایط مرزی مفروض در آزمایش نمونه‌ها است که رفتار مناسب چرخه‌ای میراگر دندانه شانه‌ای را نتیجه داد. شکل ۱۴-الف برپایی مدل آزمایشگاهی این قاب‌ها را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی نسبی در ترازهای مختلف در ارتفاع قاب، پنج عدد جابه‌جایی سنج مطابق جانمایی نشان داده شده در شکل ۱۴-ب در قاب نصب شده است. بارگذاری جانبی قاب نیز به صورت چرخه‌ای جابه‌جایی-کنترل و با استفاده از دو جک فشاری با کنترل دستی در طرفین قاب انجام شده است.

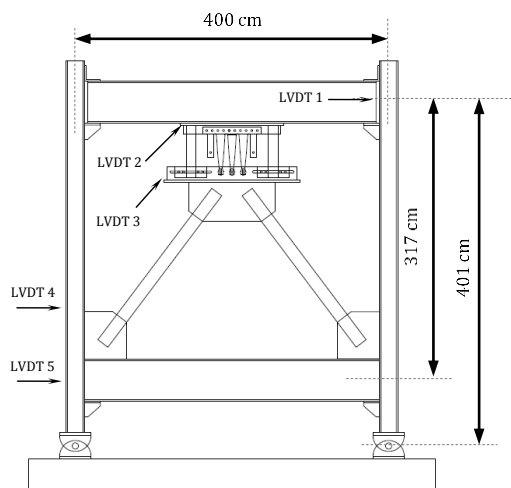


شکل ۱۳: انرژی مستهلک شده تجمعی در نمونه‌های آزمایش شده

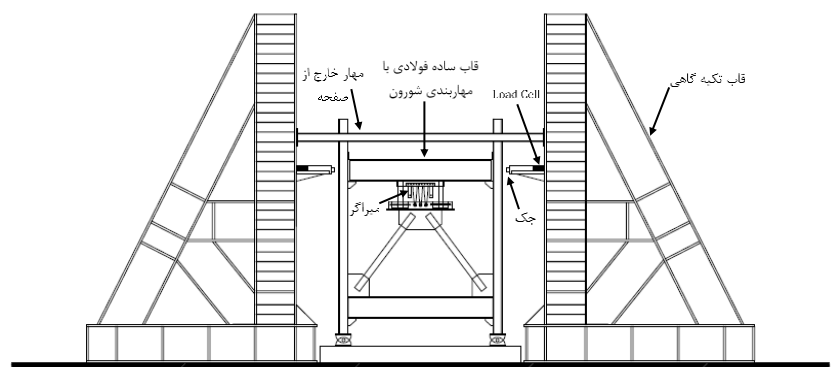
۶. مطالعه آزمایشگاهی قاب‌های شامل

میراگرهای دندانه شانه‌ای

پس از تایید رفتار مناسب میراگرهای دندانه شانه‌ای با توجه به نتایج



شکل ۱۴-ب: جانمایی جابه‌جایی سنج‌های نصب شده در قاب

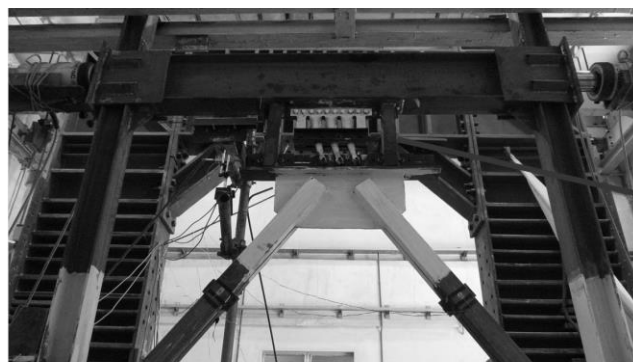


شکل ۱۴-الف: برپایی مدل آزمایشگاهی

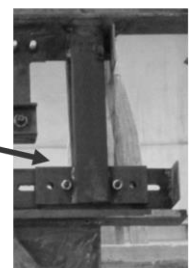
شکل ۱۴: آزمایش قاب‌های شامل میراگر



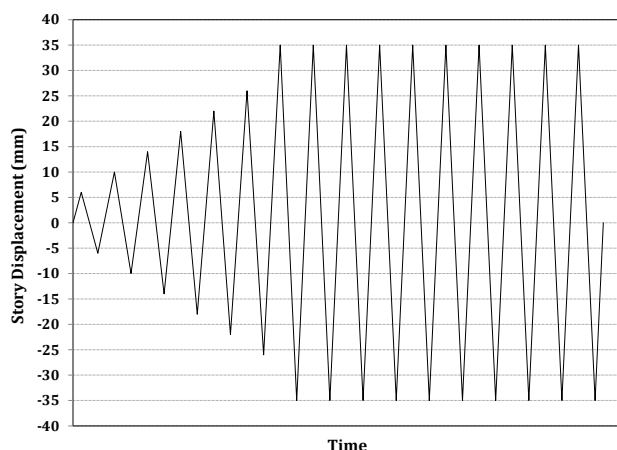
شکل ۱۶: عدم اتصال گاست پلیت به ستون



شکل ۱۵: نمایی از قاب شامل میراگر دندانه شانه‌ای و المان‌های T شکل



گونه‌ای به طبقه اعمال شود که با تکرار کم در دامنه‌های جابه‌جایی کوچک به تدریج به این مقدار افزوده شده و در جابه‌جایی نسبی طبقه با دامنه ثابت ۳۵ میلی‌متر که معادل دریفت ۲/۰ درصدی است بارگذاری با دامنه ثابت تکرار شود. در این آزمایش ۱۰ چرخه کامل با دامنه ۳۵ میلی‌متر به طبقه اعمال شده است. در شکل ۱۷ تاریخچه جابه‌جایی که سعی شده است به وسیله‌ی جک‌های فشاری با کنترل دستی به این قاب اعمال شود آورده شده است. لازم به گفتن است، این اعداد مربوط به جابه‌جایی نسبی طبقه است که از تفاضل مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی جابه‌جایی سنج‌های شماره ۱ و ۵ به دست آمده است.



شکل ۱۷: تاریخچه جابه‌جایی نسبی طبقه (قاب شماره ۱)

رفتار قاب در طول آزمایش به گونه‌ای بوده است که جابه‌جایی خارج از صفحه‌ای در مهاربندها رخ نداده و المان‌های T شکل تعبیه شده در طرفین میراگر به خوبی از بروز چنین رفتاری جلوگیری کرده‌اند. عملکرد مناسب قاب باعث شده است تا شرایط مفروض در آزمایش نمونه‌ها به شکل مناسبی تأمین شده و رفتار میراگر به کار رفته در قاب مشابه رفتار میراگرهای یاد شده باشد. در شکل ۱۵ تصویری از میراگر حین بارگذاری قاب شماره ۱ ارائه شده است. مشابه آزمایش نمونه‌ها، تسلیم هم‌زمان تارهای بیرونی در طول نمونه، رفتاری است که در طول آزمایش مشاهده شده است. بنابراین می‌توان گفت شرایط مرزی مفروض در آزمایش نمونه‌ها که منجر به بروز رفتار چرخه‌ای مناسب این نمونه‌ها شد در قاب‌های فولادی با شرایط مشابه قاب شماره ۱ نیز قابل دستیابی است.

بر اساس فلسفه عملکردی قاب‌های شامل میراگر، تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای موجود در قاب باید به گونه‌ای طراحی شوند که هنگام بارگذاری جانبی قاب، تنها میراگرها وارد ناحیه خمیری رفتار خود شده و رفتار سایر اعضای سازه‌ای الاستیک باقی بماند. با در نظر گرفتن این اصل، مقطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها به ترتیب IPB120 و 2UNP80 طراحی شده‌اند. ورق‌های اتصال مهاربندها نیز بر اساس ظرفیت کششی مهاربندها طراحی شده‌اند. به دلیل محدودیت‌های ابعادی موجود برای قاب تکیه‌گاهی و کف قوی، طول اعضای قاب شامل تیر، ستون و مهاربند نصف شده است. از آنجا که انتظار می‌رود سختی قاب ساده در مقایسه با سختی مجموعه میراگر و مهاربند ناچیز باشد، بنابراین عمده مقاومت قاب از ترکیب میراگر و مهاربند حاصل شده و در صورت رسیدن مقدار بار جانبی به حد تسلیم میراگر، تغییر شکل غیر ارتجاعی در این بخش از سازه شروع می‌شود. بنابراین نصف کردن تنها طول اعضای قاب و ساخت و نصب میراگرها با مقیاس واقعی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در رفتار میراگر نخواهد داشت.

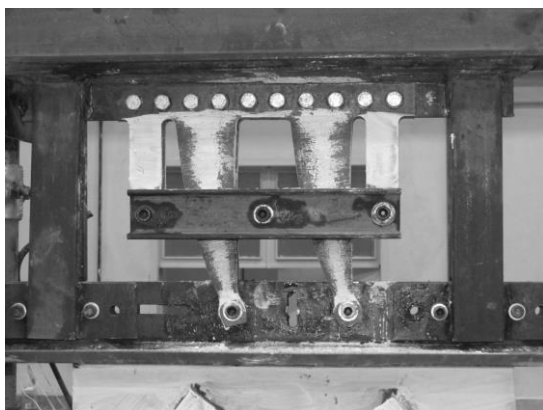
در شکل ۱۵ نمایی از قاب آزمایشگاهی مورد بررسی نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود برای جلوگیری از جابه‌جایی خارج از صفحه میراگر و در نتیجه سیستم مهاربندی، دو المان T شکل در طرفین میراگر نصب شده است که با توجه به جزئیات اتصالات آن به قاب هیچ ممانعتی برای جابه‌جایی درون صفحه ایجاد نخواهد کرد. یادآور می‌شود که در انجام این آزمایش‌ها تلاش بر این بود که اتصال تیرها به ستون‌ها تا حد امکان به صورت مفصلی عمل نمایند تا رفتار قاب کمترین تأثیر را بر عملکرد میراگرها داشته باشد. برای نیل به این هدف ورق‌های اتصال مهاربندها فقط به تیرها جوش شده و از اتصال آن‌ها به ستون خودداری شد (شکل ۱۶). ضمناً طول ورق اتصال جان تیر به ستون نیز به حدود نصف ارتفاع جان انتخاب شد.

۱-۶. قاب شماره ۱ (Fr.1)

میراگر مورد استفاده در قاب شماره ۱ همان میراگر مورد بررسی در آزمایش نمونه‌های منفرد می‌باشد که نمایی از این قاب در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. بارگذاری این قاب به صورت جابه‌جایی-کنترل بوده و در حین انجام آزمایش دامنه جابه‌جایی اعمالی در هر چرخه تعیین شده است. سعی شده است تا تاریخچه جابه‌جایی به

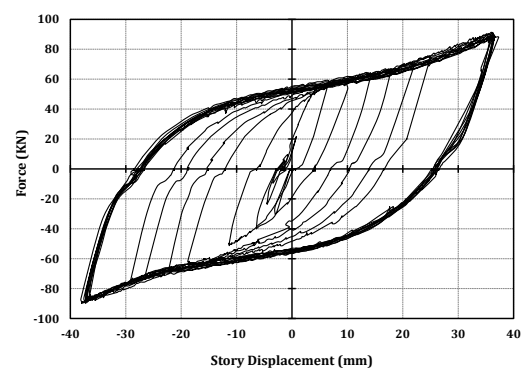
۲/۰ رسیده (جابه‌جایی نسبی ۳۵ میلی‌متر) و در این دامنه، قاب به صورت ۲۰ چرخه کامل رفت و برگشتی تحت بارگذاری قرار داده شود. رفتار میراگر در این قاب نیز مشابه رفتار میراگرهای قبلی بوده به طوری که تسلیم همزمان تارهای بیرونی و رشد همزمان آن به سمت تار خشی در طول به صورت یکنواخت صورت گرفته است. این رفتار در شکل ۱۹ قابل مشاهده است. در این قاب نیز به واسطه تعبیه قید کمانشی و نیز الزام‌های T شکل، هیچ گونه تغییر شکل خارج از صفحه‌ای در طول بارگذاری چه برای دندانه‌ها و چه برای مهاربندها مشاهده نشده است که نشان دهنده عملکرد مناسب این اعضاء در قاب طراحی شده است.

مانند نتایج به دست آمده در سایر آزمایش‌ها منحنی هستریزیس قاب شماره ۲ نیز که در شکل ۲۱ نمایش داده شده است کاملاً پایدار بوده و نشان دهنده عملکرد مناسب قاب فولادی شامل میراگر دندانه شانه‌ای است. بیشینه جابه‌جایی اعمال شده به میراگر به کار رفته در این قاب در طول بارگذاری تقریباً برابر ۳۲ میلی‌متر، و از طرفی با در نظر گرفتن روابط تحلیلی (رابطه ۶)، جابه‌جایی متناظر با تسلیم تارهای بیرونی این میراگر برابر با ۱/۳ میلی‌متر به دست می‌آید. بنابراین این میراگر ۲۰ چرخه کامل رفت و برگشتی با دامنه‌ای تقریباً ۲۵ برابر جابه‌جایی تسلیم خود را تحمل کرده است. لازم به گفتن است در پایان بارگذاری نیز هیچ نشانی از بروز ترک خوردگی در میراگر و یا افت مقاومت و سختی در منحنی هستریزیس آن مشاهده نشده و میراگر همچنان توانایی تحمل چرخه‌های بارگذاری بیشتر را داشته است. این نتایج بار دیگر امکان استفاده از میراگرهای دندانه شانه‌ای در سازه‌ها به عنوان مستهلک کننده انرژی را مورد تایید قرار می‌دهند.



شکل ۱۹: نمایی از میراگر به کار رفته در آزمایش قاب شماره ۲ حین انجام آزمایش

منحنی نیرو- تغییر مکان طبقه برای قاب شماره ۱ در شکل ۱۸ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار چرخه‌ای قاب مشابه رفتار نمونه‌هایی که قبلاً آورده شد کاملاً پایدار بوده و این امر حکایت از رفتار مناسب میراگر در قاب دارد. بر این اساس، قاب مورد بررسی ۱۰ چرخه کامل با دامنه متناظر با دریف ۲/۰ درصد در طبقه، تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و رفتار هیسترتیک پایداری نیز از خود به نمایش گذاشته است. میراگر تعبیه شده در این قاب و جزئیات اتصال آن نیز رفتاری بسیار مناسب از خود بروز داده‌اند.



شکل ۱۸: منحنی نیرو- تغییر مکان طبقه در قاب شماره ۱

۲-۶. آزمایش قاب شماره ۲ (FR.2)

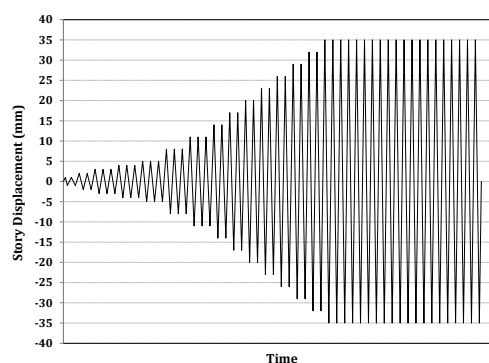
آزمایش قاب شماره ۱ نشان داد که اتصالات و چگونگی تعبیه میراگر در قاب مناسب بوده و میراگر مشابه رفتاری که در آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌ها از خود نشان داده را در قاب نیز بروز داده است. در این آزمایش با هدف بررسی رفتار هندسه دیگری از میراگر دندانه شانه‌ای، ابعادی متفاوت برای لینک‌های میراگر در نظر گرفته شده است. ارتفاع دندانه‌های این میراگر برابر میراگر قبلی بوده و تنها تفاوت این دو در مقدار ضریب λ می‌باشد به طوری که این ضریب در میراگر قاب شماره ۲ برابر با $2.5 \text{ mm}^{0.5}$ در نظر گرفته شده است. ضمناً میراگر جدید شامل دو دندانه و با فاصله از یکدیگر ساخته شده است تا سوراخ‌های متصل کننده میراگر به الزام‌های T شکل و سوراخ‌های انتهایی لینک‌ها بر هم منطبق شوند (شکل ۱۹).

تاریخچه جابه‌جایی اعمال شده به قاب در طول این آزمایش نیز بر اساس جابه‌جایی نسبی طبقه تنظیم شده است. سعی شده است مطابق تاریخچه نشان داده شده در شکل ۲۰، با افزایش تدریجی دامنه جابه‌جایی در طول بارگذاری به دامنه متناظر با دریف

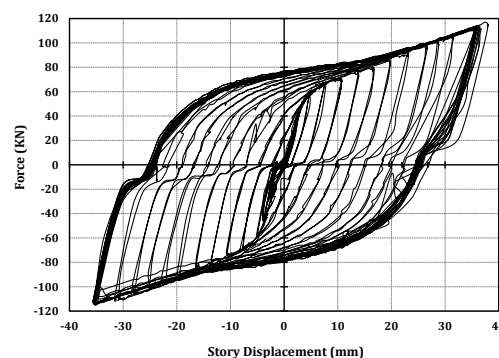
در نمودار نیرو-جابجایی قاب شماره ۲ مقداری لغزش مشاهده می‌شود که این امر ناشی از گشاد شدن سوراخ‌های لویبایی می‌باشد. لازم به گفتن است این سوراخ‌ها در قاب شماره ۲ برای سومین بار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این اتصالات قبل از انجام آزمایش قاب شماره ۲ در دو آزمایش دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته بودند که تنها نتایج مربوط به یکی از این قاب‌ها با نام قاب شماره ۱ در متن این مقاله آورده شده است. با توجه به استفاده چند باره از این اتصالات، سوراخ‌های لویبایی به علت اعمال تنش‌های اتکایی قابل توجه در طول بارگذاری قاب‌های قبلی، گشاد شده و در نهایت در قاب شماره ۲ این مقاله باعث بروز لغزش در رفتار قاب شده است.

سوراخ‌های لویبایی پیشنهاد شده است. در نمونه اول به علت کماتش جانبی دنداننه‌ها در طول بارگذاری، افت سختی و مقاومت رخ داده بنابراین در دو نمونه بعدی برای ممانعت از کماتش خارج از صفحه دنداننه‌ها و استفاده بیشینه از ظرفیت شکل پذیری آن‌ها از قید مناسب استفاده شده است. این قید باعث بهبود رفتار میراگر شده به شکلی که در این نمونه‌ها قبل از شکست دنداننه‌ها کماتش جانبی و در نتیجه افت مقاومت و سختی ناشی از آن رخ نداده و تعداد چرخه‌های قابل تحمل افزایش قابل توجهی داشته است. نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این هندسه و اتصال پیشنهادی برای دنداننه‌ها، به شکل مؤثری از ایجاد تمرکز تنش در ناحیه‌ای محدود از میراگر و نیز ایجاد نیروی فشاری نامطلوب در دنداننه‌ها جلوگیری کرده، پس میراگرهای آزمایش شده تحت بارهای چرخه‌ای می‌توانند ضمن تحمل جابه‌جایی‌های تجمعی زیاد، مقدار زیادی انرژی نیز مستهلک نمایند. به عنوان مثال، نمونه CTD3 توانسته است جابه‌جایی تجمعی در حدود ۵۰۰۰ میلی‌متر را تحمل کرده و چگالی انرژی مستهلک شده در این نمونه، عددی برابر با $4.1 \times 10^{-4} \text{ kJ/mm}^3$ بدست آمده است. این نمونه تحت ۲۰ چرخه بارگذاری ظرفیت شکل پذیری حدود ۱۵ را با در نظر گرفتن تغییر مکان تسلیم مؤثر از خود بروز داده است. برای محاسبه جابه‌جایی تسلیم، سختی اولیه و نیز مقاومت تسلیم میراگر دنداننه شانه‌ای، روابطی تحلیلی ارائه شده است که با توجه به نتایج مدل‌های عددی و آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و می‌توان از آن‌ها در طراحی قاب‌های شامل این میراگرها استفاده نمود. پس از آزمایش نمونه‌ها و با هدف بررسی رفتار میراگرهای دنداننه شانه‌ای در درون قاب‌های فولادی، دو عدد قاب فولادی ساده شامل میراگر دنداننه شانه‌ای ساخته شده و رفتار آن‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه سیستم مهاربندی نیز یک قید اضافی طراحی و به کار گرفته شده است. این قاب‌ها در دامنه حداکثری متناظر با جابه‌جایی نسبی طبقه ۲ درصد بارگذاری و رفتار چرخه‌ای مناسبی از خود بروز داده‌اند به گونه‌ای که قاب شماره ۲، بیست چرخه کامل رفت و برگشتی در این دامنه را بدون کاهش سختی و مقاومت و مشاهده هرگونه آثار خرابی تحمل کرده است. این نتایج علاوه بر تأیید مجدد رفتار مناسب میراگرها، نشان داد که با تأمین

در نمودار نیرو-جابجایی قاب شماره ۲ مقداری لغزش مشاهده می‌شود که این امر ناشی از گشاد شدن سوراخ‌های لویبایی می‌باشد. لازم به گفتن است این سوراخ‌ها در قاب شماره ۲ برای سومین بار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این اتصالات قبل از انجام آزمایش قاب شماره ۲ در دو آزمایش دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته بودند که تنها نتایج مربوط به یکی از این قاب‌ها با نام قاب شماره ۱ در متن این مقاله آورده شده است. با توجه به استفاده چند باره از این اتصالات، سوراخ‌های لویبایی به علت اعمال تنش‌های اتکایی قابل توجه در طول بارگذاری قاب‌های قبلی، گشاد شده و در نهایت در قاب شماره ۲ این مقاله باعث بروز لغزش در رفتار قاب شده است.



شکل ۲۰: تاریخچه جابه‌جایی نسبی طبقه (قاب شماره ۲)



شکل ۲۱: منحنی نیرو- تغییر مکان طبقه در قاب شماره ۲

۷. نتیجه گیری

در این مقاله یک میراگر فلزی جدید به نام میراگر دنداننه شانه‌ای معرفی شده که از ورق‌های فولادی و تعدادی دنداننه ساخته می‌شود. هندسه این دنداننه‌ها طوری طراحی می‌شود که توزیع تنش نرمال ناشی از خمش در طول دنداننه یکنواخت بوده و در نتیجه با وقوع تغییر شکل‌های خمیری در تمام طول دنداننه، ظرفیت استهلاک انرژی برای میراگر تأمین می‌شود. برای جلوگیری از اعمال نیروهای محوری به دنداننه‌ها، در بخشی از اتصال میراگر به قاب استفاده از

Ricky WKC, Albermani F, Williams MS, Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research* 2009;65:260-268.

11. Rai DC, Annam PK, Pradhan T, Seismic testing of steel braced frames with aluminum shear yielding dampers. *Engineering Structures* 2013;46:737-747.

12. Vosooq AK, Zahrai SM, Study of an innovative two-stage control system: Chevron knee bracing & shear panel in series connection. *Structural Engineering and Mechanics* 2013;47:881-898.

13. Franco JM, Cahis X, Gracia L, López F, Experimental testing of a new anti-seismic dissipator energy device based on the plasticity of metals. *Engineering Structures*;2010;32:2672-2682.

14. Li HN, Li G, Experimental study of structure with "dual function" metallic dampers. *Engineering Structures* 2007;29:1917-1928.

15. Ricky WKC, Albermania F, Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures* 2008;30 :1058-1066.

16. Benavent-Climent A, A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections. *Engineering Structures* 2010;32:1113-1122.

17. Ghabraie K, Chan R, Huangb X, Xie YM, Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy. *Engineering Structures* 2010;32:2258_2267.

18. Ma X, Borchers E, Pena A, Krawinkler H, Billington S, Deierlein GG. Design and behavior of steel shear plates with opening as energy dissipating fuses. Report No. 173. The John A. Blume Earthquake Engineering Center; 2010.

19. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen Inc, ABAQUS User's manual version 6.10 (2010),

20. American Society of Civil Engineers (2006), Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. ASCE/SEI 41-06.

21. Federal Emergency Management Agency (2000), PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS, FEMA 356.

شرایط مرزی مناسب، می‌توان از این میراگرها در قاب‌های فولادی به عنوان مستهلک کننده انرژی بهره برد.

۸. مراجع

1. Kelly JM, Skinner RI, Heine AJ. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering* 1972;5(3):63-88.

2. Skinner RJ, Kelly JM, Heine AJ. Hysteresis dampers for earthquake-resistant structures. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 1975;3:287-96.

3. Bergman DM, Goel SC. Evaluation of cyclic testing of steel plate device for added damping and stiffness. Report no. UMCE 87-10, The University of Michigan, Ann Arbor, MI; 1987.

4. Wittaker AS, Bertero VV, Thompson CL, Alonso LJ. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices. *Earthquake Spectra* 1991;7(4):563-604.

5. Tsai KC, Chen HW, Hong CP, Su YF. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistance construction. *Earthquake Spectra* 1993.

6. Yeh CH, Lu LL, Chung LY, Huang CS. Test of full scale steel frame with TADAS. *Earthq Eng Eng Seismol* 2001.

7. Gray MG, Christopoulos C, Packer JA, Cast steel yielding brace system for concentrically braced frames: concept development and experimental validations. *J. Struct. Eng.* 2014;140:102-112.

8. Tremblay R, Bolduc P, Neville R, Devall R. Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Canad. J. Civil Eng.* 2006;33(2):183-98.

9. Wada A, Nakashima M. From infancy to maturity of buckling restrained braces research. In: 13th WCEE. 2004.

10. Kobori T, Miura Y, Fukusawa E, Yamada T, Arita T, Takenake Y. et al. Development and application of hysteresis steel dampers. In: *Proceedings of 11th world conference on earthquake engineering* 1992, 2341-6.