

## خطاهای محتمل در پیکره بندی میراگر TADAS

رضا کرمی محمدی<sup>۱\*</sup>، آرمان نصری<sup>۲</sup>، هادی قمری<sup>۳</sup>

- ۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

rkarami@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۷/۲۱]

**چکیده-** میراگرهای الحاقی TADAS نوعی سیستم کنترل غیرفعال هستند که امروزه می توان در طراحی لرزه ای یا مقاوم سازی سازه ها از آن ها استفاده نمود. این میراگرها با استهلاك بخش زیادی از انرژی ورودی زلزله، تقاضای اتلاف انرژی به وسیله اعضای اصلی قاب را به شدت کاهش می دهند و از این لحاظ موجب افزایش ایمنی سازه ها می شوند. در این مطالعه، رفتار میراگر TADAS در تغییر مکان های بزرگ بررسی می شود و بعضی از خطاهای محتمل در هندسه آن، که در صورت عدم توجه می تواند خساراتی را برای سازه در پی داشته و توانایی اتلاف انرژی میراگر را کاهش دهد، بیان می شود. برای پژوهش درباره این موضوع، مدل اجزاء محدود میراگر TADAS با تمام جزئیات در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد و تحت بارگذاری مونوتونیک منتهی به تغییر مکان های بزرگ قرار گرفت. مشخص شد که سختی میراگر در تغییر مکان های بزرگ به شدت و به صورت ناگهانی افزایش می یابد که این افزایش ناگهانی می تواند منجر به بروز پاسخ های نامطلوب و حتی کمک به تخریب سازه شود. در این مقاله پیشنهادهای برای جلوگیری از این وضعیت ارائه شده است. در ادامه یک قاب مجهز به میراگر TADAS در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه ای تا تغییر مکان های بزرگ قرار گرفته است. این قاب هم چنین در نرم افزار آباکوس نیز شبیه سازی شده و رفتار آن با نمونه آزمایشگاهی مقایسه شده است. از مطالعه مدل های آزمایشگاهی و نرم افزاری مشخص شد، هر چند رفتار چرخه ای میراگر در تغییر شکل های بزرگ پایدار و مناسب است ولی دو نقص مهم در اجرای این میراگر مشاهده می شود. یکی از این نقص ها، کماتش بادبندها به دلیل چرخش تکیه گاه های قاب و دیگری لقی بین ها و پیچ های اتصال میراگر، درون شکاف هایشان است. نشان داده می شود که چگونه این لقی سبب تاخیر در عملکرد میراگر شده و موجب آن می شود که میراگر در زلزله ها نقش کمتری ایفا نماید.

**واژگان کلیدی:** میراگر هیسترتیک TADAS، تغییر شکل های بزرگ، خطاهای محتمل، تست و شبیه سازی.

### ۱- مقدمه

سیستم های کنترلی در حالت کلی به چهار دسته سیستم های فعال، غیرفعال، نیمه فعال و ترکیبی طبقه بندی می شوند [۲ و ۳]. در سیستم های کنترل غیرفعال از سازوکارهای مختلفی برای استهلاك انرژی زلزله استفاده می شود که از جمله آن ها می توان به سازوکارهای تسلیم فلزات نرم، اصطکاک، تغییر شکل مواد ویسکوالاستیک و ... اشاره نمود. از میان این سازوکارها، غیرخطی شدن فلزات نرم، ساده ترین، اقتصادی ترین و موثرترین روش برای کنترل پاسخ های سازه است که اولین بار به وسیله کلی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۱۹۷۰ پیشنهاد شد [۴ و ۵].

سیستم های مقاوم در برابر زلزله را می توان در حالت کلی به دو دسته سیستم های معمولی و نوین طبقه بندی نمود. در سیستم های معمولی، اعضای اصلی سازه در مکان هایی خاص مانند محل اتصال تیر و ستون وارد ناحیه غیرخطی خود شده و با ایجاد مفاصل پلاستیک در این نقاط، انرژی ورودی زلزله را مستهلک می کنند. این وضعیت سبب بروز خساراتی در اعضای سازه شده و نیاز به تعمیر و مرمت آن ها را بعد از وقوع زلزله ضروری می کند [۱]. در سازه های نوین از سیستم های کنترلی برای بهبود رفتار آن استفاده می شود. هدف اصلی این سیستم ها افزایش ایمنی و کاهش پاسخ های لرزه ای سازه می باشد.

<sup>۱</sup> Kelly

و مقاومت تا تغییر مکان‌های بزرگ و عدم تاثیرگذاری بر ظرفیت بارگذاری ثقلی سازه اشاره کرد [۱۶ و ۱۷]. اما از معایب آن می‌توان به لزوم استفاده از تحلیل وقت‌گیر غیرخطی برای سازه‌های مجهز به آن و همچنین لزوم تعویض میراگرهای تخریب شده با میراگرهای سالم بعد از وقوع زلزله اشاره نمود [۱۶].

تسای<sup>۱</sup> و همکاران [۱۸] آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی را روی میراگر TADAS در دانشگاه ملی تایوان انجام دادند. آن‌ها متوجه شدند که سختی میراگر در تغییر مکان‌های بزرگ در سیکل‌های پایانی به ناگهان افزایش می‌یابد (شکل (۱)). این افزایش ناگهانی سختی میراگر به دلیل برخورد ورق‌های مجاور در تغییر شکل‌های بزرگ گزارش شد. تسای و همکاران [۱۹] به منظور بهبود عملکرد میراگر TADAS و جلوگیری از برخورد ورق‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ پیشنهاد کردند که بدون نیاز به افزایش فاصله ورق‌ها، از یک میله غلتکی (پین) که مستقیماً به انتهای ورق جوش می‌شود، استفاده شود (شکل (۲)).

شکل ۱: میراگر اصلاح نشده TADAS و منحنی هیستریزیک آن [۱۸]

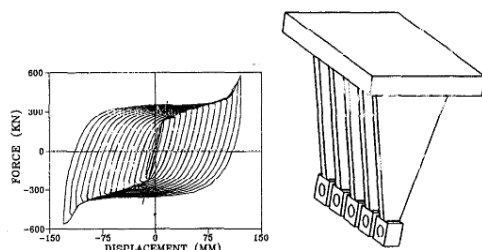


Figure 1: Schematic of the unimproved TADAS device and its hysteresis

شکل ۲: میراگر اصلاح شده TADAS [۱۹]

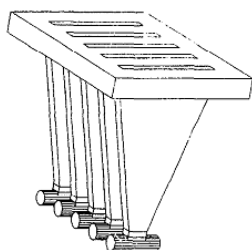


Figure 2: Schematic of the improved TADAS device

سوالی که در این‌جا مطرح می‌شود این است که چنانچه فاصله

در دو دهه‌ی اخیر انواع مختلفی از میراگرهای مبتنی بر سازوکار تسلیم فلزات نرم به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف ساخته شده است که از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به میراگرهای فلزی یوشکل<sup>۱</sup>، میراگرهای لانه زنبوری<sup>۲</sup>، میراگرهای شکاف‌دار<sup>۳</sup>، پانل‌های برشی<sup>۴</sup> و میراگرهای لوله‌ای<sup>۵</sup> اشاره نمود [۶-۱۳]. دو شکل بسیار معروف و متداول میراگرهای تسلیمی، میراگرهای ADAS<sup>۶</sup> با ورق‌های ضربدری شکل و میراگرهای TADAS<sup>۷</sup> با ورق‌های مثلثی شکل است که علاوه بر تامین میرایی مناسب، سختی قابل قبولی را نیز برای سازه فراهم می‌نمایند. این میراگرها از چند صفحه فولادی تشکیل شده‌اند که به صورت موازی در کنار هم قرار می‌گیرند [۱۵ و ۱۴]. قسمت پایینی این میراگرها به مهاربندها متصل است و قسمت بالایی آن به تیر طبقه وصل می‌گردد. با وقوع زلزله، قسمت بالایی میراگر نسبت به قسمت پایینی آن به صورت افقی حرکت می‌کند و بر اثر این حرکت، ورق‌های میراگر تسلیم می‌شود و مقدار زیادی از انرژی زلزله مستهلک می‌شود [۱۶].

ورق‌های میراگر ADAS به صورت گیردار به ورق‌های بالایی و پایینی میراگر متصل می‌شوند. همین عامل سبب می‌شود، میراگر نتواند خود را با تغییر شکل‌های بزرگ سازگار نماید. به منظور رفع این نقص، پژوهشگران به سمت تولید میراگرهای TADAS رفتند. در این میراگر پای ورق‌ها با استفاده از پین‌هایی به صورت مفصلی به کف میراگر متصل می‌شود و نقص موجود در میراگرهای ADAS برطرف می‌شود.

میراگرهای ADAS و TADAS نسبت به سایر سیستم‌های کنترلی مزایا و معایبی دارند. از مزایای آن‌ها می‌توان به عدم نیاز به تکنولوژی پیشرفته برای ساخت، عدم حساسیت به شرایط محیطی مانند دما و رطوبت، هزینه ساخت کم و نصب راحت در سازه، رفتار هیستریزیک پایدار بدون هیچ گونه کاهش سختی

<sup>۱</sup> U-Shaped steel dampers

<sup>۲</sup> Honeycomb dampers

<sup>۳</sup> Slit dampers

<sup>۴</sup> Shear-panel dampers

<sup>۵</sup> Pipe dampers

<sup>۶</sup> Added Damping And Stiffness

<sup>۷</sup> Triangular Added Damping And Stiffness

شکل (۳):

شکل ۳: هندسه میراگر TADAS مورد استفاده

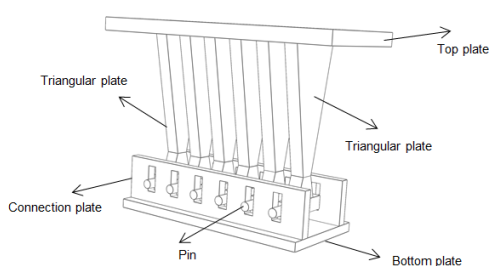


Figure 3: Details of steel welded TADAS device

۱- ورق بالایی که طول، عرض و ضخامت آن به ترتیب ۶۰، ۲۵ و ۳ سانتی متر است. تمامی ورق‌های مثلثی میراگر TADAS به این ورق جوش می‌شوند.

۲- ورق‌های مثلثی میراگر که از اصلی‌ترین اجزاء آن به حساب می‌آیند. در حالت تئوری این ورق‌ها مثلثی فرض می‌شوند، اما در واقعیت به دلیل محدودیت‌های اجرایی هیچ‌گاه نمی‌توان از اشکال مثلثی استفاده نمود. عملاً همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، این ورق‌ها از دو قسمت دوزنقه‌ای و یک قسمت مستطیلی تشکیل شده‌اند. در این مطالعه ۶ ورق با ارتفاع ۳۴/۵ سانتی متر و ضخامت ۳ سانتی متر استفاده شده است.

شکل ۴: مقطع ورق میراگر

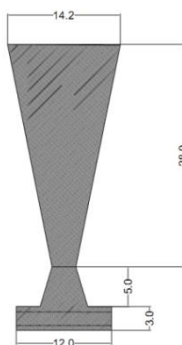


Figure 4: Cross section of steel triangular plates

۳- پین‌ها که برای ایجاد اتصال مفصلی بین ورق‌های مثلثی و ورق پایینی میراگر استفاده می‌شوند. قطر پین‌ها برابر با ۲ سانتی متر و طول آن‌ها برابر با ۲۰ سانتی متر لحاظ شد.

۴- ورق پایینی که طول، عرض و ضخامت آن به ترتیب ۴۸،

ورق‌های میراگر کافی باشد، آیا رفتار پس از تسلیم میراگر در تغییر شکل‌های بزرگ قابل اطمینان خواهد بود؟ به نظر می‌رسد با افزایش جابه‌جایی نهایتاً حالتی پیش خواهد آمد که ورق‌های میراگر دچار افزایش طول خواهند شد پس در آن‌ها نیروی کششی ایجاد می‌شود، که این نیرو می‌تواند منجر به افزایش سختی و تغییر در رفتار میراگر شود. روشن است که درستی میراگر به شرطی مطلوب خواهد بود که جزئیات آن به درستی طراحی شده باشد. برخی جزئیات نادرست می‌تواند منجر به عملکرد نامطلوب و حتی تخریب میراگر یا سازه شود. در این مقاله تمرکز اصلی روی این موضوع خواهد بود. برای پژوهش درباره این موضوع، ابتدا میراگر TADAS با تمام جزئیات آن در نرم افزار اجزاه محدود آباکوس [۲۰] شبیه‌سازی شده و تحت بارگذاری مونوتونیک منتهی به تغییر مکان‌های بزرگ قرار گرفته است. سپس قاب مجهز به میراگر TADAS در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای استاتیکی قرار گرفته و نتایج آن با مدل شبیه‌سازی شده قاب در نرم افزار مقایسه شده و بعضی دیگر از مواردی که روی رفتار میراگر تاثیر منفی می‌گذارند، نشان داده شده است.

## ۲- سختی و مقاومت میراگر TADAS

معادلات زیر که به وسیله‌ی تسای و همکاران ارائه شده‌اند، به ترتیب معرف سختی الاستیک، مقاومت و تغییر مکان تسلیم میراگر است [۱۸]. در روابط زیر  $N$ ،  $B$ ،  $h$  و  $t$  به ترتیب معادل با تعداد، ارتفاع، عرض پایه و ضخامت ورق‌های میراگر است. همچنین  $E$  و  $f_y$  به ترتیب معادل با تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد است.

$$K = \frac{NEBt^3}{6h^3} \quad (1)$$

$$R_y = \frac{Nf_y B t^2}{6h} \quad (2)$$

$$\Delta_y = \frac{f_y h^2}{Et} \quad (3)$$

## ۳- هندسه میراگر مورد استفاده

میراگر استفاده شده در این مطالعه شامل اجزای زیر است

بلکه دوزنقه‌ای شکل است.

۳-۴- خطاهای محتمل در پیکره‌بندی میراگر TADAS و بررسی آنها

۳-۴-۱- افزایش سختی میراگر در تغییر شکل‌های بزرگ

منحنی نیرو- تغییر مکان میراگر ناشی از شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار در شکل (۵) مشاهده می‌شود. این منحنی از چهار ناحیه تشکیل شده است. ناحیه اول که سختی بسیار ناچیز و نزدیک صفر را نشان می‌دهد، به لقی پین‌های میراگر مرتبط می‌شود. ناحیه دوم محدوده الاستیک میراگر و ناحیه سوم شروع محدوده رفتار غیرخطی میراگر را نشان می‌دهد که تا شکل پذیری بیش از ۲۰ را برای این میراگر نتیجه می‌دهد. در انتهای ناحیه سوم، ناحیه چهارم قرار دارد که نه تنها افت مقاومت نشان نمی‌دهد بلکه در میراگر افزایش ناگهانی سختی و مقاومت رخ می‌دهد.

مشاهده می‌شود زمانی که تغییر مکان به ورق بالایی میراگر اعمال می‌شود، در ابتدا فضای خالی مابین پین‌ها و جداره داخلی شکاف‌ها پر می‌شود (ناحیه یک در شکل ۵). بعد از برقراری تماس بین پین‌ها و جداره داخلی شکاف‌ها، نیرویی به ورق‌های میراگر وارد می‌شود (نیروی  $P_1$  در شکل ۶). هر چه میزان بارگذاری بیش‌تر می‌شود، مقدار این نیرو هم افزایش پیدا می‌کند. بعد از مدتی و تحت تغییر مکانی مشخص، ورق‌های میراگر در سرتاسر ارتفاع‌شان و به صورت هم‌زمان به مقدار تنش تسلیم خود می‌رسند. از این مرحله به بعد ورق‌ها وارد فاز غیرخطی شده و سختی آن‌ها به شدت افت پیدا می‌کند. با افزایش بارگذاری اعمالی و افزایش تغییر شکل ورق‌های مثلثی، پین‌ها آرام آرام درون شکاف‌ها به سمت بالا حرکت کرده تا این که بین آن‌ها و جداره بالایی شکاف‌ها برخورد رخ می‌دهد. در این زمان ناگهان یک نیروی قائم نیز به ورق‌های مثلثی میراگر وارد می‌شود که تاکنون حضور نداشت (نیروی  $P_2$  در شکل (۶ و ۷) لحظه برخورد پین‌ها و جداره بالایی شکاف‌ها را نشان می‌دهد.

۱۱ و ۲ سانتی‌متر است و در کف میراگر قرار می‌گیرد.

۵- دو عدد ورق اتصال، که این ورق‌ها به صورت عمود در دو طرف ورق پایینی قرار گرفته و به آن جوش می‌شوند. در این ورق‌ها در فواصلی مشخص، شکاف‌هایی برای عبور پین‌ها ایجاد می‌شود. ارتفاع شکاف‌ها برابر با ۶ سانتی‌متر و عرض آن‌ها برابر با ۲/۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به قطر ۲ سانتی‌متری پین‌ها، ۲ میلی‌متر لقی درون شکاف‌ها ایجاد می‌شود تا امکان عبور پین‌ها تسهیل شود. در شرایط اولیه، فاصله ورق‌های بالا و پایین به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مرکز پین‌ها در فاصله ۲ سانتی‌متری از پایین شکاف‌ها قرار گیرند.

#### ۴- مدل‌سازی میراگر تحت بارگذاری مونوتونیک تا تغییر شکل‌های بزرگ

۴-۱- فرضیات مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

مدل میراگر با تمامی جزئیات آن در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. برای ساخت تمامی قسمت‌های تعریف شده در مدل، از المان سالیید<sup>۱</sup> و به جای مدل‌سازی جوش‌ها از قید Tie استفاده شد. اندرکنش مابین سطوح خارجی پین‌ها و جداره داخلی شکاف‌ها با استفاده از رفتار مماسی<sup>۲</sup> با ضریب اصطکاک ۰٫۱ و رفتار نرمال<sup>۳</sup> با حالت تماس سخت<sup>۴</sup> تعریف شد. تمامی ۶ درجه آزادی برای ورق پایینی میراگر بسته شد و برای ورق بالایی، تنها انتقال در جهت بارگذاری آزاد شد. بارگذاری با اعمال تغییر مکان تدریجی تا ۱۶ سانتی‌متر به ورق بالایی میراگر اعمال شد.

۴-۲- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و روابط تئوری

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین نتایج آنالیز و مقادیر حاصل از روابط (۱ تا ۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان اختلاف قابل قبول است. یکی از علت‌های مهم وقوع اختلاف، مثلثی فرض کردن ورق‌های میراگر در حالت تئوری می‌باشد، در حالی که در واقعیت، ورق‌ها مثلثی نبوده

۱ Solid

۲ Tangential Behavior

۳ Normal Behavior

۴ Hard Contact

جدول ۱: نتایج حاصل از آنالیز میراگر TADAS

|              | Yield displacement | Yield strength | Elastic stiffness | Critical damper displacement |
|--------------|--------------------|----------------|-------------------|------------------------------|
| From ABAQUS  | 5.58 mm            | 102.3 KN       | 18333.33 KN/m     | 128 mm                       |
| From Eq. 1-3 | 4.53 mm            | 88.9 KN        | 19624.72 KN/m     | .....                        |
| Error        | 23.18 %            | 15.07 %        | 6.58 %            | .....                        |

Table 1: The analysis results

شکل ۵: منحنی نیرو - تغییر مکان میراگر TADAS

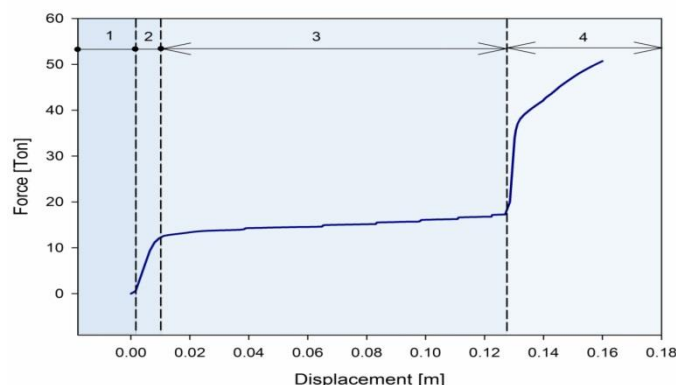


Figure 5: Force-Deformation relationship for the TADAS damper

شدت کاهش یابد، به عبارت دیگر سختی میراگر به شدت افزایش می‌یابد (شروع ناحیه ۴ در شکل ۵). این افزایش سختی می‌تواند سبب جذب نیروی بسیار زیاد به سازه و تخریب آن در محل میراگر شود، در حالی که در آنالیز غیرخطی سازه‌های مجهز به میراگر TADAS به هیچ عنوان نقش برخورد در رفتار میراگر در نظر گرفته نمی‌شود. برای جلوگیری از برخورد صورت گرفته دو پیشنهاد زیر ارائه می‌شود:

۱- افزایش ارتفاع شکاف‌ها: طبیعی است که هرچه ارتفاع شکاف بیش تر شود، برخورد دیرتر رخ می‌دهد.

۲- قرار دادن پین‌ها در پایین‌ترین نقطه نسبت به کف شکاف در هنگام نصب میراگر: این عمل سبب می‌شود پین فضای بیش‌تری برای حرکت در محدوده شکاف داشته باشد و برخورد دیرتر رخ دهد.

در این قسمت رابطه‌ای برای محاسبه تغییر مکان برخورد ارائه می‌شود روابط (۴ الی ۸). در روابط زیر  $L$  ارتفاع ورق میراگر،  $h$  ارتفاع قائم ورق میراگر در زمان برخورد،  $\rho$  شعاع انحنای ورق میراگر پس از اعمال تغییر شکل،  $\Delta$  تغییر مکان معادل برخورد و  $d$  فاصله قائم مرکز پین تا جداره بالایی شکاف است. با فرض وجود انحنای یکنواخت در ورق‌های میراگر مطابق شکل (۸):

شکل ۶: رفتار میراگر (a) قبل از برخورد پین با جداره بالایی شکاف (b) بعد از برخورد پین با جداره بالایی شکاف

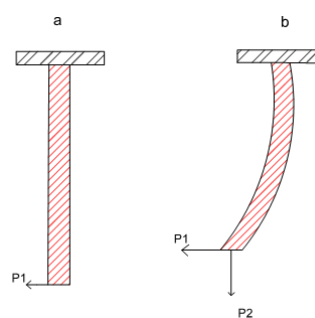


Figure 6: Damper behavior a) before collision b) after collision

شکل ۷: برخورد پین‌ها با جداره بالایی شکاف‌ها

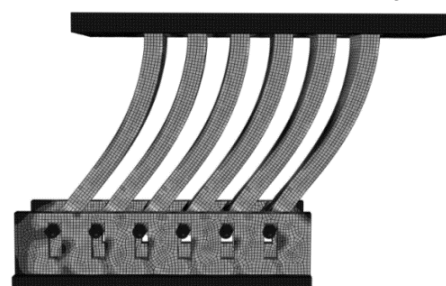


Figure 7: Pins hitting the top of the holes in the TADAS damper

اعمال نیروی  $P_2$  به صورت نیروی کششی به ورق‌ها سبب می‌شود، نرخ افزایش جابه‌جایی ناشی از افزایش نیروی  $P_1$  به

## ۴-۳-۲- لقی پین‌های میراگر درون‌شکاف‌ها

همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده شد، سختی اولیه میراگر تقریباً صفر است که این موضوع ناشی از وجود لقی مابین پین‌های میراگر و شکاف‌های ورق اتصال است. برای فعال شدن میراگر TADAS و مشارکت آن در باربری، ابتدا باید لقی موجود پر شود. بنابراین وجود لقی سبب پیدایش تاخیر در شروع عملکرد میراگر گشته و مشارکت آن در باربری را به تاخیر می‌اندازد. زمانی که میراگر در باربری نقش ایفا نمی‌کند، وظیفه اتلاف انرژی زلزله بر دوش اعضای اصلی سازه قرار می‌گیرد، این در حالی است که فلسفه استفاده از میراگر TADAS، جلوگیری از وارد شدن خسارت‌های شدید به اعضای اصلی سازه است. حال هرچه میزان لقی موجود بیشتر شود، شروع عملکرد میراگر به جابه‌جایی‌های بالاتر منتقل شده و در نتیجه احتمال خسارت اعضای سازه‌ای در این تغییر مکان‌ها بیشتر می‌شود. بنابراین اجرای شکاف باید به گونه‌ای باشد که لقی مابین پین‌ها و شکاف‌ها حداقل ممکن باشد تا ظرفیت اتلاف انرژی میراگر حفظ شود.

## ۵- بررسی رفتار هیستریک میراگر TADAS

## ۵-۱- تست میراگر در آزمایشگاه

## ۵-۱-۱- مشخصات قاب و تست آزمایشگاهی

برای آزمایش میراگر TADAS تحت بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای، قابی یک طبقه و یک دهانه به طول ۴ متر و ارتفاع ۳ متر در آزمایشگاه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ساخته شد و به میراگر TADAS مجهز شد شکل (۹).

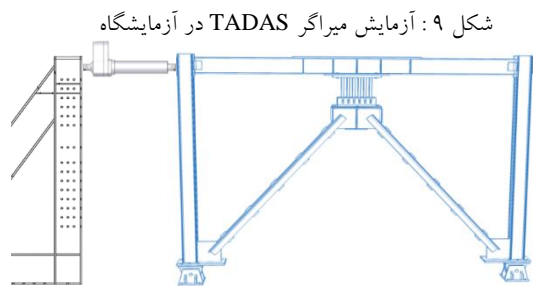


Figure 9: An illustration of the experimental setup

شکل ۸: پارامترهای هندسی میراگر قبل و پس از تغییر شکل

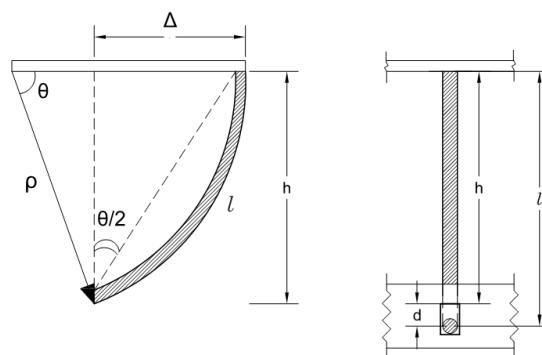


Figure 8: Schematic of the initial un-deformed, and deformed shape of a triangular plate in critical state

$$h = l - d \quad (۴)$$

$$\rho \sin \theta = h \quad (۵)$$

$$\rho \theta = l \quad (۶)$$

با تقسیم رابطه (۵) بر رابطه (۶) می‌توان مقدار  $\theta$  را طبق رابطه (۷) به دست آورد:

$$\frac{\sin \theta}{\theta} = \frac{h}{l} \quad (۷)$$

طبق شکل (۸) با مشخص شدن  $\theta$  مقدار تغییر مکان برخورد از رابطه (۸) پیدا می‌شود:

$$\Delta = h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (۸)$$

در جدول (۲) ارتفاع شکاف میراگر از مقدار ۴ سانتی‌متر تا ۹ سانتی‌متر تغییر داده شده و مقدار تغییر مکان متناظر با زمان برخورد از نرم افزار و روابط فوق به دست می‌آید و میزان خطای موجود در رابطه (۸) مشخص می‌شود. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، میزان خطای رابطه (۸) در حد مناسبی خواهد بود. پس این رابطه می‌تواند به عنوان ابزاری برای طراحی میراگر و تعیین ارتفاع شکاف ورق اتصال آن تلقی شود. به عنوان نمونه چنانچه مدنظر باشد که میراگر تا تغییر مکان ۱۶/۵ سانتی‌متری دچار افزایش ناگهانی سختی نشود، ارتفاع شکاف باید حداقل ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شود.

جدول ۲: مقایسه تغییر مکان میراگر در لحظه برخورد، ناشی از آباکوس و رابطه ۸

| Height of damper holes (cm)                  | 4    | 5     | 6     | 7     | 8    | 9     |
|--|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Critical damper displacement-<br>ABAQUS (cm) | 7.7  | 10.7  | 12.8  | 14.6  | 16.4 | 17.9  |
| Critical damper displacement -<br>Eq.8 (cm)  | 9.96 | 12.07 | 13.79 | 15.25 | 16.5 | 17.62 |
| Error (Percentage)                           | 29.3 | 12.8  | 7.7   | 4.4   | 0.6  | 1.5   |

Table 2: Comparison of the critical damper displacements obtained from ABAQUS and the proposed method

شکل ۱۱: پروتکل بارگذاری آزمایش دوم در آزمایشگاه

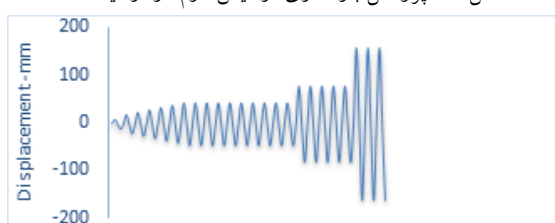


Figure 11: Loading displacement history in the laboratory- The second test

## ۵-۱-۲- نتایج تست آزمایشگاهی

شکل شماره (۱۲) نمایی از چگونگی تغییر شکل دادن میراگر تحت تغییر مکان بزرگ را نشان می‌دهد. منحنی‌های هیستریتیک میراگر مربوط به آزمایش‌های اول و دوم در (شکل‌های ۱۳ و ۱۴) نشان داده شده است [۲۲]. محور افقی منحنی‌ها مربوط به تغییر مکان نسبی میراگر و محور قائم آن مربوط به نیروی جانبی میراگر است.

شکل ۱۲: تغییر شکل میراگر بعد از بارگذاری استاتیکی [۲۲]



Figure 12: Damper deformation in the laboratory

برای هر یک از ستون‌های قاب از مقطع دویل IPE180، برای مهاربندها از مقطع نبشی دویل L100x100x10 و همچنین برای مقطع تیر از تیر ورق با سه ورق مجزا به ابعاد 4000x200x12 میلی‌متر استفاده شد. تکیه‌گاه‌های قاب از نوع ساده و اتصال تیر به ستون، مفصلی در نظر گرفته شد. برای اتصال میراگر TADAS به تیر بالایی و مهاربندها به ترتیب از ۴ و ۶ پیچ به قطر ۲۴ میلی‌متر استفاده شد. قاب مجهز به میراگر TADAS دوبار و در دو روز مختلف آزمایش شد. بارگذاری چرخه‌ای به صورت استاتیکی (سرعت بسیار کم) طبق آیین‌نامه ASCE41 [۲۱] به وسیله جک‌های بارگذاری به محل بالایی ستون‌ها اعمال شد. پروتکل بارگذاری مربوط به آزمایش‌های اول و دوم در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) قابل مشاهده است. مشخصات میراگر TADAS استفاده شده در قاب، دقیقاً مشخصات همان میراگری است که قبلاً در بخش ۳ معرفی شده بود.

شکل ۱۰: پروتکل بارگذاری آزمایش اول در آزمایشگاه

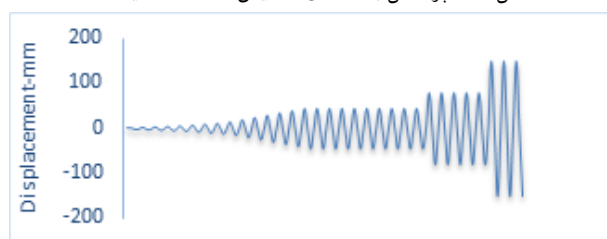


Figure 10: Loading displacement history in the laboratory- The first test

۳-۵- عوامل موثر بر کاهش اثرگذاری میراگر

۳-۵-۱- کماتش مهاربندها

در هنگام بارگذاری با افزایش میزان تغییرمکان، مهاربندها با وجود آن که برای تحمل بیشینه ظرفیت میراگر طراحی شده‌اند، در نزدیکی تکیه‌گاه‌های قاب دچار کماتش می‌شوند. شکل‌های (۱۶ و ۱۷). این کماتش بیشتر به دلیل چرخش اتصال تیر- ستون رخ می‌دهد. انحناهای مهاربندهای فشاری به سمت داخل سازه و انحناهای مهاربندهای کششی به سمت بیرون سازه است. از آنجا که طبق آیین‌نامه‌های طراحی، سیستم نگهدارنده میراگر (مهاربندها) باید الاستیک باقی بماند و نباید دچار آسیب شوند، پس در طراحی مهاربندها، امکان کماتش در تغییرشکل‌های بزرگ حتما باید مد نظر قرار گیرد.

شکل ۱۶: کماتش بادبند در آزمایشگاه



Figure 16: The brace buckling in the laboratory

شکل ۱۷: کماتش مهاربندها در مدل نرم‌افزاری

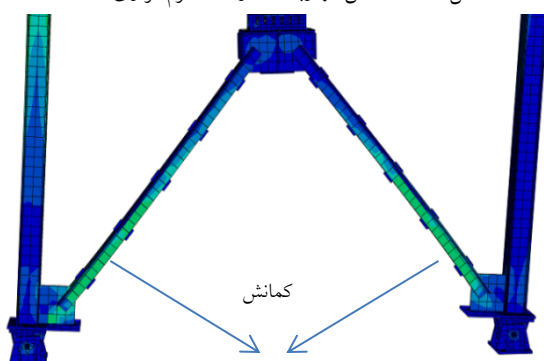


Figure 17: The brace buckling in the ABAQUS software

۳-۵-۲- لقی پیچ‌های اتصال میراگر

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، لقی پین‌ها درون شکاف‌های میراگر یکی از عوامل مهم ایجاد تاخیر در شروع عملکرد میراگر است. همین موضوع دقیقا در مورد لقی پیچ‌های اتصال

شکل ۱۳: منحنی هیسترتیک میراگر مربوط به آزمایش اول [۲۲]

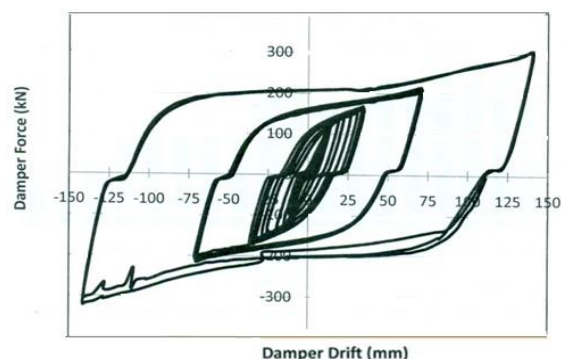


Figure 13: The hysteresis of the TADAS damper-The first test

شکل ۱۴: منحنی هیسترتیک میراگر مربوط به آزمایش دوم [۲۲]

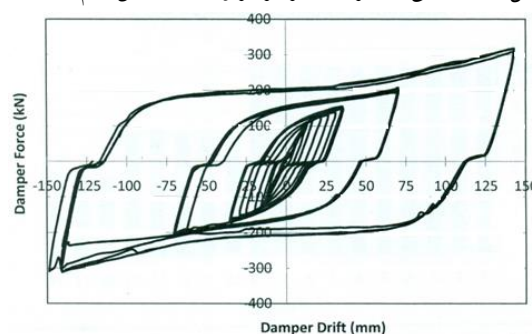


Figure 14: The hysteresis of the TADAS damper-The second test

۲-۵- شبیه‌سازی قاب مجهز به میراگر در نرم افزار آباکوس

قاب مورد آزمایش در آزمایشگاه، در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس شبیه‌سازی شد و تحت همان بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. شکل (۱۵) منحنی هیسترتیک قاب شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. از مقایسه شکل (۱۵) با شکل‌های (۱۳) و (۱۴) می‌توان متوجه انطباق مناسب منحنی‌های هیسترتیک آزمایشگاهی و نرم‌افزاری شد.

شکل ۱۵: منحنی هیسترتیک میراگر در نرم‌افزار

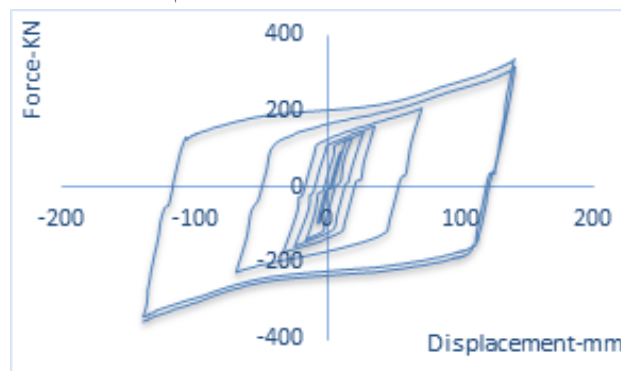


Figure 15: The hysteresis of the TADAS damper in ABAQUS



تحت بارگذاری چرخه‌ای استاتیکی قرار گرفت و همچنین در نرم‌افزار آباکوس نیز شبیه‌سازی شد. نتیجه حاکی از آن بود که قاب مجهز به میراگر TADAS حتی در تغییر مکان‌های بزرگ هم رفتار پایدار و قابل قبولی دارد اما دو نقص خیلی مهم در قاب مشاهده می‌شد. یکی از این نقص‌ها، کمناش مهاربندها به دلیل چرخش اتصالات و نقص دوم مربوط به لقی بین‌ها و پیچ‌های اتصال میراگر درون شکاف‌هایشان بود. این لقی‌ها سبب به وجود آمدن تاخیر در شروع عملکرد میراگر و کاسته شدن از مساحت داخل منحنی هیسترتیک میراگر می‌شود که امری بسیار نامطلوب است، پس حتی المقدور باید از ایجاد لقی در بین‌ها و پیچ‌ها به شکل مناسبی جلوگیری شود.

## ۷- تشکر و قدردانی

از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به ویژه جناب آقای دکتر مجید زمانی به دلیل ارائه مناسب تسهیلات آزمایشگاهی و نیز از شرکت دانش بنیان پارت سازه ساینار و مدیرعامل آن جناب آقای مهندس حجت کارگر بواسطه حمایت از اجرای این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارد.

## ۸- مراجع

- [1] Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S., & Kelly, J. M. (1993). Testing of passive energy dissipation systems. *Earthquake spectra*, 9(3), 335-370.
- [2] Spencer Jr, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of structural engineering*, 129(7), 845-856.
- [3] Soong, T. T., & Spencer, B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243-259.
- [4] Kelly, J. M., Skinner, R. I., & Heine, A. J. (1972). Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. *Bulletin of NZ Society for Earthquake Engineering*, 5(3), 63-88.
- [5] Skinner, R. I., Kelly, J. M., & Heine, A. J. (1974). Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3(3), 287-296.
- [6] Tagawa, H., & Gao, J. (2012). Evaluation of vibration control system with U-dampers based on quasi-linear motion mechanism. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 213-225.

میراگر (اتصال ورق بالایی به تیر و اتصال ورق پایینی به مهاربندها) صادق است. لقی‌های موجود در میراگر (لقی پیچ‌ها و لقی بین‌ها) سبب می‌شود، میراگر دیرتر تسلیم شود و در نتیجه دیرتر در استهلاک انرژی زلزله نقش ایفا کند. در مدت زمانی که میراگر اتلاف انرژی نمی‌کند، این اعضای اصلی سازه هستند که باید وظیفه اتلاف انرژی را بر عهده گیرند که این امر می‌تواند سبب بروز خسارت در اعضای سازه‌ای شود. در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) به وضوح دیده می‌شود که در بعضی نواحی مقدار سختی میراگر به شدت افت پیدا کرده و به صفر می‌رسد. این نواحی معرف لقی پیچ‌های اتصال میراگر است. یکی دیگر از آثار منفی لقی علاوه بر ایجاد تاخیر در شروع به فعالیت میراگر، کاهش دادن مساحت داخل منحنی هیسترتیک میراگر است. این امر سبب می‌شود میراگر انرژی کمتری را حین وقوع زلزله مستهلک کند. بنابراین یکی از نکات بسیار مهمی که باید در حین ساخت و نصب میراگر در نظر گرفته شود، کاهش مقدار لقی پیچ‌ها درون سوراخ‌هایشان است. بر خلاف مدل آزمایشگاهی، در منحنی هیسترتیک میراگر در مدل نرم افزاری، به دلیل لحاظ نکردن لقی پیچ‌ها، افت موضعی سختی مشاهده نمی‌شود.

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه میراگر TADAS با جزئیات کامل در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی گشت و تحت تغییر مکان‌های بزرگ قرار گرفت. نشان داده شد در حین بارگذاری ابتدا ورق‌های میراگر در تغییر مکانی کوچک تسلیم می‌شوند، سپس بین‌ها درون شکاف‌های میراگر آرام آرام به سمت بالا حرکت کرده و در نهایت در تغییر مکان‌های بزرگ به صورت ناگهانی به جداره بالایی شکاف برخورد می‌کنند. این برخورد سبب افزایش ناگهانی سختی میراگر در حد صلبیت می‌شود که می‌تواند موجب خرابی میراگر و اعضای سازه شود. برای جلوگیری از برخورد رخ داده، پیشنهاد شد که ارتفاع شکاف میراگر تا حد ممکن افزایش داده شود و بین‌ها نیز در هنگام نصب میراگر در پایین‌ترین نقطه درون شکاف‌ها قرار گیرند. در ادامه قابی یک طبقه و یک دهانه مجهز به میراگر TADAS در آزمایشگاه

for seismic-resistant construction. Earthquake spectra, 9(3), 505-528.

[16] Symans, M. D., Charney, F. A., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Johnson, M. W., & McNamara, R. J. (2008). Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments. Journal of structural engineering, 134(1), 3-21.

[17] Whittaker, A. S., Bertero, V. V., José Luis Alonso G., & Thompson, C. (1989). Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements (Vol. 89, No. 2). Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.

[18] Tsai, C. S., & Tsai, K. C. (1995). TPEA device as seismic damper for high-rise buildings. Journal of engineering mechanics, 121(10), 1075-1081.

[19] Tsai, K. C., & Li, C. W. (1994, March). Seismic Analysis of Passive Energy Dissipation Subsystems by Hybrid Experiments. In Proceedings of the 12th International Modal Analysis (Vol. 2251, p. 1520).

[20] ABAQUS. 'ABAQUS Documentation'. 6.13-1 ed: Dassault Systèmes; 2013.

[21] Seismic rehabilitation of existing buildings (ASCE). ASCE/SEI Standard 41-06 with supplement 1, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.2007.

[22] BHRC, (2015). Road, Housing and Urban Development Research Center, PART SAZE SAINAR engineering Company report on TADAS damper experiments. Report No. 1122-9/س (in Persian).

[7] Kobori, T., Miura, Y., Fukusawa, E., Yamada, T., Arita, T., Takenake, Y., ... & Fukumoto, T. (1992). Development and application of hysteresis steel dampers. In Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (pp. 2341-2346).

[8] Chan, R. W., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. Engineering Structures, 30(4), 1058-1066.

[9] Nakashima, M., Iwai, S., Iwata, M., Takeuchi, T., Konomi, S., Akazawa, T., & Saburi, K. (1994). Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel. Earthquake engineering & structural dynamics, 23(12), 1299-1313.

[10] Maleki, S., & Bagheri, S. (2010). Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study. Journal of Constructional Steel Research, 66(8), 1088-1095.

[11] Maleki, S., & Bagheri, S. (2010). Pipe damper, Part II: Application to bridges. Journal of Constructional Steel Research, 66(8), 1096-1106.

[12] Maleki, S., & Mahjoubi, S. (2013). Dual-pipe damper. Journal of Constructional Steel Research, 85, 81-91.

[13] Maleki, S., & Mahjoubi, S. (2014). Infilled-pipe damper. Journal of Constructional Steel Research, 98, 45-58.

[14] Bergman, D. M., & Goel, S. C. (1987). Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness. Department of Civil Engineering, University of Michigan.

[15] Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., & Su, Y. F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers

## Some probable mistakes in the design of geometric configuration of TADAS damper

A. Karami Mohammadi Reza<sup>1\*</sup>, B. Nasri Arman<sup>2</sup>, C. Ghamari Hadi<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Civil Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology

2- M.Sc. in Earthquake Engineering, Civil Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology

3- PhD Student, Civil Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology

rkarami@kntu.ac.ir

### Abstract:

Additional dampers TADAS are a kind of passive control systems which can be used in seismic design or retrofit of structures. In this study, behavior of TADAS dampers in large deformation has been examined and some of the possible errors in its design are expressed. It is shown that how the lack of attention can result in damage to the structure and reduce the ability of energy dissipation in the damper. To investigate this issue, TADAS damper with all its details was simulated in ABAQUS finite element software. TADAS damper made up of several components, these components include the upper plate, the lower plate, triangular plates, rods rollers (pins) and connection plates. Damper modeling in ABAQUS determined that in a large deformation, the damper stiffness strongly and suddenly increases. It is examined that this sudden changes in damper characteristics is mainly due to the collision of the damper pin and the upper wall of its slot. This sharp increase could lead to adverse responses and even help to the destruction of the structures. In this paper, two suggestions are presented to prevent this situation. These suggestions include increasing the slot height and putting pins in the lowest point than slot bottom during damper installation. Assuming uniform curvature over the damper plates, a relationship has been proposed to predict the amount of the large displacement corresponding to the high stiffness of the damper. Using this relationship can get awareness of the occurrence or non-occurrence of increasing stiffness of the damper in the various stories of structures. It can also be used as a design tool for selecting the proper height of the damper slots.

Also, a frame equipped with TADAS damper is constructed and get under cyclic loading to large deformation. This frame was simulated in ABAQUS and its behavior was compared with laboratory sample. This comparison indicates that there is a good agreement between laboratory and software results. From laboratory and software models, it became clear that the frame equipped with TADAS damper even in large deformation has stable and acceptable behavior, but two very important defects are observed in the frame. One of these defects is buckling of braces despite their design based on the toleration of the maximum capacity of damper. This buckling has occurred due to the rotation of beam-to-column connections. To prevent damper from degradation, it must be considered in the design process as far as the large deformations is concerned. As per the design codes, damper's retainer system TADAS (Chevron braces) should not be damaged or buckled. The second defect is related to the looseness of damper's pins and the looseness of damper's connection bolts inside their slots. It will be shown that how this looseness causes a delay in the performance of damper and will increase the possibility that the damper plays a lesser role during earthquake. Therefore, the looseness in pins and bolts must be properly prevented. In this study, 10 bolts with 24 mm diameter were used to the connecting damper to floor-beams and Chevron braces.

**Keywords:** TADAS, Large deformation, Probable mistake, Test and simulation.