

## بررسی آزمایشگاهی سیستم دیوار همبسته دوگانه پس کشیده مجهز به ادوات اصطکاکی در ناحیه اتصال تیر به دیوار

محمد سجاد زارعیان

دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

محمد رضا اصفهانی \*

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

عبدالله حسینی

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

### چکیده

سیستم دیوار بتنی همبسته دارای مقاومت، سختی و شکل پذیری مطلوبی می باشد و به عنوان یک سیستم سازه ای مناسب برای ساختمان ها مورد توجه است. با این حال این سیستم سازه ای همچون سایر سیستم های متعارف، بعد از زلزله های بزرگ متحمل تغییر شکل های ماندگار شده که منجر به عملیات تعمیر و بهسازی گسترده و هزینه بری می شود. سیستم دیوار همبسته دوگانه پس کشیده از جمله سیستم های لرزه ای جدیدی است که دارای قابلیت مرکزگرایی می باشد. در این سیستم، تیر همبند در دیوار فرو نمی رود و همبندی دیوارهای بتنی به وسیله ی پیش تنیده کردن تیر همبند با کابل های پر مقاومت انجام می شود. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی رفتار تیر همبند فولادی پس کشیده مجهز به ادوات استهلاک انرژی اصطکاکی در ناحیه اتصال به دیوار بتنی پرداخته می شود. سه نمونه با مقیاس  $2/3$  تحت بار چرخه ای شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه ها شامل یک نمونه کنترلی فاقد سیستم استهلاک انرژی و دو نمونه مجهز به ادوات اصطکاکی با سطوح مختلف پیش تنیدگی بود. ادوات اصطکاکی در ناحیه اتصال تیر به دیوار به منظور استهلاک انرژی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی توانایی تحمل تغییر شکل های غیر خطی بزرگ، بدون تغییر شکل ماندگار و بدون خسارت قابل ملاحظه در سیستم را دارند و رفتار لرزه ای پایداری تا دریفت ۸٪ ارائه می دهند. افزودن ادوات اصطکاکی سبب افزایش ۴۷٪ تا ۶۲٪ ظرفیت باربری و افزایش قابل توجه ظرفیت استهلاک انرژی نمونه ها شده است. با افزایش ۳۰٪ در نیروی پیش تنیدگی ادوات اصطکاکی، ظرفیت باربری حدود ۱۰٪، میانگین نسبت استهلاک انرژی نسبی حدود ۱۵٪ و میانگین ظرفیت استهلاک انرژی جمعی حدود ۳۳٪ افزایش یافته است.

واژه های کلیدی: دیوار همبسته دوگانه، پس کشیدگی، جابجایی ماندگار، وسایل اصطکاکی، رفتار چرخه ای.

\* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

شامل دیوارهای بتنی مجزا، تیرهای همبند غیریکپارچه با دیوار، کابل‌های پیش‌تنیدگی و ادوات استهلاک انرژی است. در این سیستم، تیر همبند در دیوار فرو نمی‌رود و همبندی دیوارها در اثر ایجاد نیروی فشاری بین تیر و دیوارها انجام می‌شود که این نیروی فشاری به واسطه کابل‌های پس‌کشیده<sup>۴</sup> که از میان دیوارها و تیر عبور می‌کند و در دو انتهای بیرونی دیوارها مهار می‌شوند، تأمین می‌گردد. این کابل‌ها خاصیت مرکزگرایی سیستم را نیز فراهم می‌نمایند. در نتیجه پس از وقوع زلزله، سازه فاقد جابجایی ماندگار و یا دارای مقدار کم جابجایی ماندگار خواهد بود. تغییرشکل‌های غیرخطی در این سیستم در درجه اول در اثر بازشدگی<sup>۵</sup> سطح تماس تیر و دیوار ایجاد می‌شود. در این سیستم نشی‌های فوقانی و تحتانی که در محل اتصال تیر به دیوار نصب می‌شوند، تحت جابه‌جایی‌های بزرگ به حد تسلیم می‌رسند و سبب استهلاک انرژی زلزله می‌گردند. این نشی‌ها علاوه بر استهلاک انرژی، در افزایش ظرفیت باربری سیستم و همچنین پایداری تیر نیز موثرند [۱۶ و ۱۷].

## ۲- اهمیت تحقیق

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی رفتار سیستم دیوار همبسته دوگانه پس‌کشیده که در ناحیه اتصال تیر به دیوار مجهز به ادوات استهلاک انرژی اصطکاکی می‌باشد، پرداخته می‌شود. در پژوهش‌های گذشته به منظور استهلاک انرژی در سیستم دیوار همبسته پس‌کشیده از نشی‌هایی استفاده شده است که در محل اتصال تیر به دیوار نصب می‌شدند. این نشی‌ها دارای ظرفیت استهلاک انرژی محدودی می‌باشند و پس از چند سیکل بارگذاری به سبب وقوع پدیده خستگی با تعداد چرخه کم<sup>۶</sup> دچار شکست می‌شوند. این موضوع می‌تواند سبب اختلال در عملکرد سیستم در زلزله‌های بزرگ و پس‌لرزه‌ها گردد. به‌منظور رعایت ضوابط آیین‌نامه ACI ITG 5.1 [۲۴] در مورد سیستم‌های سازه‌ای مورد استفاده در مناطق لرزه‌خیز و افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سیستم و نیز رفع مشکل شکست نشی‌ها در اثر پدیده خستگی با تعداد چرخه کم، در این پژوهش استفاده از ادوات استهلاک انرژی

امروزه سازه‌های بتن مسلح در مقیاس وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجربیات به‌دست آمده از زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که دیوارهای برشی بتنی یکی از مؤثرترین سیستم‌های مقاوم جانبی برای مناطق لرزه‌خیز می‌باشند [۲۱]. کاربرد دیوارهای برشی به‌صورت همبسته موجب می‌شود که سختی ترکیبی دیوار همبسته از مجموع سختی دو دیوار مجزا بیشتر بوده و تغییرشکل‌های جانبی سازه و میزان لنگرهای خمشی طراحی دیوار کاهش قابل توجهی یابند. این امر اجازه می‌دهد که طول دیوارها کوتاه‌تر شود و یا تعداد آنها برای رسیدن به سختی و مقاومت مورد نظر کمتر گردد [۳]. تحقیقات گذشته درباره سیستم دیوار همبسته عمدتاً بر روی سیستم‌هایی تمرکز داشته است که تیر همبند در داخل دیوار فرو رفته و با دیوار یکپارچه می‌شود [۳-۱۰]. اغلب این سیستم‌ها بعد از زلزله‌های بزرگ، متحمل تغییرشکل‌های ماندگار<sup>۱</sup> می‌شوند. حتی اگر این سیستم‌ها مطابق آنچه پیش‌بینی شده رفتار نمایند و سطح عملکرد موردنظر را تأمین کنند، به‌وجود آمدن تغییرشکل ماندگار منجر به عملیات تعمیر و بهسازی گسترده و هزینه‌بری می‌شود و در مواردی بهره‌برداری از ساختمان را ناممکن می‌سازد [۱۱].

در سال‌های اخیر، محققین سیستم‌های لرزه‌بر جدیدی را معرفی کرده‌اند که به سیستم‌های مرکزگرا<sup>۲</sup> معروفند و دارای ویژگی‌هایی همچون تغییرشکل ماندگار کم و امکان تعمیر راحت‌تر و سریع‌تر سیستم پس از زلزله‌های بزرگ می‌باشند [۱۲-۱۷]. برخی از انواع این سیستم‌های مرکزگرا شامل سیستم قاب خمشی فولادی پس‌کشیده [۱۸ و ۱۹]، سیستم قاب خمشی بتنی پس‌کشیده [۲۰ و ۲۱]، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده [۱۵ و ۲۱] و سیستم دیوار همبسته بتنی پس‌کشیده [۱۶ و ۱۷] می‌باشد. سیستم دیوار برشی همبسته پس‌کشیده<sup>۳</sup> اولین بار توسط کوراما و همکاران [۱۶ و ۱۷] در دانشگاه نتردام معرفی شد و رفتار آن مورد بررسی قرار گرفت. شن و همکاران [۱۶ و ۲۲] به بررسی رفتار سیستم دیوار همبسته بتنی با تیر همبند فولادی پرداختند. ولدان و همکاران رفتار این سیستم با تیر همبند بتنی را مورد مطالعه قرار دادند [۱۷ و ۲۳]. این سیستم

<sup>4</sup> Unbonded post-tensioning (PT) strands

<sup>5</sup> Gap opening

<sup>6</sup> Low cycle fatigue

<sup>1</sup> Residual displacements

<sup>2</sup> Self-centering Systems

<sup>3</sup> Post-tensioned coupled shear wall system

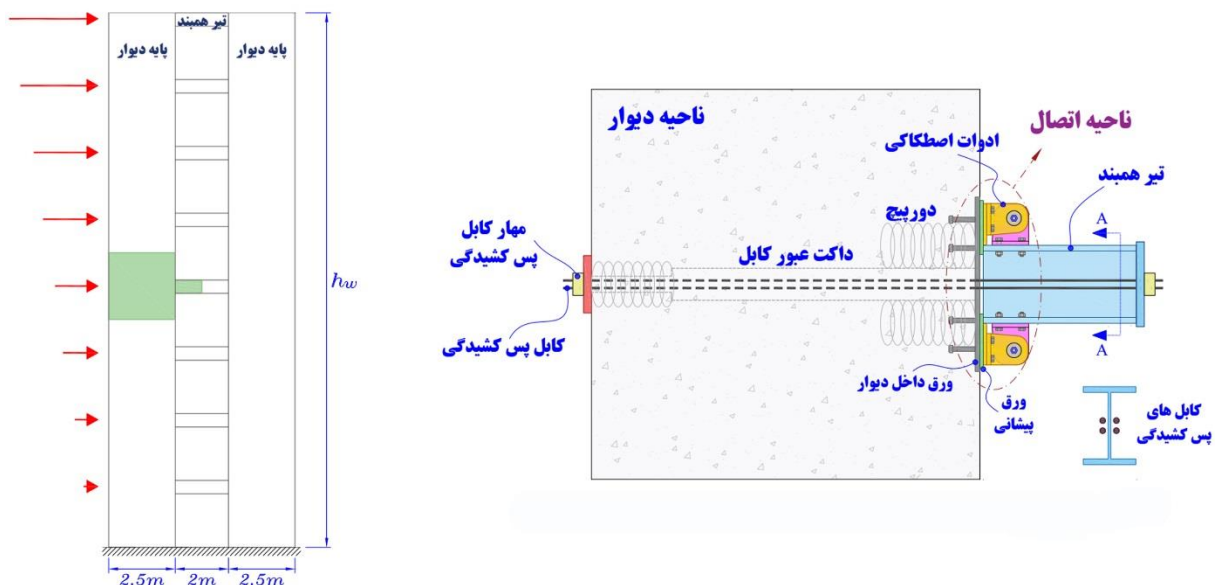
دیوار همبسته بتنی ۸ طبقه، با فرض نقطه عطف خمشی<sup>۱</sup> در وسط تیر همبند و در وسط ارتفاع طبقه استخراج شد. هر زیرسازه شامل یک تیر همبند فولادی نصف شده و دیوار بتنی مجاور آن در تراز طبقه می باشد. نمونه های مورد مطالعه شامل یک نمونه کنترلی فاقد سیستم استهلاک انرژی و دو نمونه مجهز به ادوات اصطکاکی با سطوح مختلف پیش تنیدگی بود. ادوات اصطکاکی در ناحیه اتصال تیر به دیوار و به منظور استهلاک انرژی زلزله مورد استفاده قرار گرفت. مقیاس نمونه ها بر اساس ظرفیت جک و نیرو سنج<sup>۲</sup> و برپایش آزمایشگاهی<sup>۳</sup>، برابر  $2/3$  انتخاب گردید. در جدول ۱ مشخصات نمونه های آزمایشگاهی و پارامترهای طراحی آنها ارائه شده است.

اصطکاکی به جای نبشی ها مورد مطالعه قرار می گیرد. همچنین به منظور کاهش خسارات وارده به تیر همبند و حفظ قابلیت مرکزگرایی سیستم در طول مدت بارگذاری جانبی، استفاده از تیر همبند فولادی به جای تیر بتنی مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- طراحی و ساخت نمونه ها

سه زیرسازه از یک سیستم دیوار همبسته بتنی با تیر همبند فولادی پس کشیده در آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شد و تحت بار چرخه ای شبه استاتیکی با دامنه افزاینده مورد آزمایش قرار گرفت. مطابق شکل ۱، نمونه های آزمایشگاهی از یک سازه



شکل ۱- استخراج زیرسازه تیر همبند پس کشیده از یک سازه دیوار همبسته بتنی ۸ طبقه

جدول ۱- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی

شماره نمونه	وسیله استهلاک انرژی	استرندهای پس کشیدگی	نسبت تنش اولیه استرندها، $f_{pi}/f_{pu}$	نسبت لنگر طراحی ادوات به کابل ها، $\kappa_d$	گشتاور پیش تنیدگی	پارامتر مورد بررسی
۱	—	۴ استرندهای ۰/۶ اینچ	۰/۳۱	—	—	بدون ادوات
۲	ادوات اصطکاکی	۴ استرندهای ۰/۶ اینچ	۰/۳۰۵	۰/۸۵	۱۶۵	دارای ادوات اصطکاکی
۳	ادوات اصطکاکی	۴ استرندهای ۰/۶ اینچ	۰/۳۱	۱/۱۰	۲۱۵	پیش تنیدگی بیشتر ادوات

$f_{pi}$  = متوسط تنش پس کشیدگی اولیه استرندها

$f_{pu}$  = مقاومت طراحی حداکثر استرندهای پس کشیدگی (۱۸۶۰ مگاپاسکال)

$\kappa_d = M_{bs}/M_{bp}$  نسبت لنگر طراحی ادوات، که  $M_{bs}$  و  $M_{bp}$  به ترتیب سهم ادوات اصطکاکی و کابل های پس کشیدگی در لنگر انتهایی تیر می باشد.

<sup>3</sup> Test setup

<sup>1</sup> Contraflexure point

<sup>2</sup> Load cell

فسفر-برنز را نشان می‌دهد. به منظور دستیابی به یک سطح اصطکاکی مناسبتر، دیسک‌های فسفر-برنز پس از برشکاری و تراشکاری، با استفاده از پولیش زدن کاملاً صیقل شدند.

سطوح اصطکاکی با یک پیچ پرمقاومت نمره ۱۶ از نوع ASTM A490 به یکدیگر متصل شدند و تحت نیروی پیش‌تندگی قرار گرفتند. در زیر کله و مهره پیچ، به تعداد کافی واشر فنری قرار داده شد. عدم استفاده از واشرهای فنری سبب از دست رفتن نیروی پیش‌تندگی میراگر تحت جابجایی‌های چرخه‌ای بزرگ می‌شود [۲۸]. قبل از سفت کردن پیچ ادوات اصطکاکی، سطح پیچ، مهره و واشرها با استفاده از گریس MOS<sub>2</sub> گریسکاری شدند. سپس با استفاده از یک دستگاه آچار ترکمتر کالیبره شده‌ی مدل Force با ظرفیت ۷۰۰ نیوتن-متر، نیروی پیش‌تندگی موردنظر در پیچ اعمال گردید.



شکل ۲- دیسک اصطکاکی فسفر-برنز با قطر ۱۲۰ میلی‌متر (الف) قبل از پولیش (ب) بعد از پولیش

در شکل ۳ ساختار میراگر اصطکاکی مورد مطالعه و قطعات تشکیل دهنده آن نشان داده شده است. به منظور فراهم کردن امکان لغزش میراگر، یک شیار در قطعه متصل شونده به تیر همبند برشکاری شده است. شکل شیار بر اساس نتایج مدل تحلیلی زیرسازه تعیین شده است.



شکل ۳- ساختار میراگر اصطکاکی مورد مطالعه و قطعات تشکیل دهنده آن

لازم به ذکر است، مقادیر نسبت تنش اولیه استرندها ( $f_{pi}/f_{pu}$ ) و نسبت لنگر طراحی ادوات به لنگر کابل‌ها ( $K_d$ )، بر اساس نتایج به‌دست آمده از مدل تحلیلی استخراج شده است. میزان گشتاور پیش‌تندگی ادوات اصطکاکی نیز بر اساس آزمایشات انجام شده بر روی سطوح لغزش تعیین گردیده است.

ادوات اصطکاکی مورد استفاده در این تحقیق، از اصطکاک خطی بین ورقه‌های فلزی روی هم سوار شده جهت استهلاک انرژی بهره می‌برد. مطالعات گذشته نشان داده است که سطح لغزش فولاد در مقابل فولاد مستعد رفتار چسبندگی- لغزش<sup>۱</sup> شدیدی می‌باشد و دارای رفتار سخت‌شوندگی قابل توجه و نرم‌شوندگی ناگهانی می‌باشد [۲۵-۲۷]. در این تحقیق به منظور دستیابی به رفتار لغزشی پایدار با ویژگی‌های الاستوپلاستیک مناسب، از سطح تماس فسفر-برنز<sup>۲</sup> در مقابل فولاد ضدزنگ<sup>۳</sup> استفاده شده است. هر از چند قطعه فلزی تشکیل شده است که دیسک‌های اصطکاکی از جنس فسفر-برنز بین آنها قرار می‌گیرد. فسفر برنز یکی از آلیاژهای مس با نسبت ۰/۵ تا ۱۱ درصد قلع و ۰/۱ تا ۰/۳۵ درصد فسفر می‌باشد. عنصر قلع، مقاومت در برابر خوردگی و استحکام آلیاژ را افزایش داده و عنصر فسفر، مقاومت در برابر سایش و سختی را افزایش می‌دهد. از خواص دیگر این آلیاژ می‌توان به ضریب اصطکاک پایین و دانه‌بندی مناسب اشاره کرد. استفاده از این نوع صفحات اصطکاکی در تماس با فولاد ضد زنگ سبب می‌شود که سطح لغزش خود روان<sup>۴</sup> باشد. در نتیجه پدیده چسبندگی-لغزش کاهش می‌یابد و یک ضریب اصطکاک تقریباً ثابت و مستقل از سرعت بارگذاری بدست می‌آید [۱۲]. همچنین سطح لغزش مقاوم در برابر زنگ‌زدگی بوده و می‌تواند رفتار پایداری را در درازمدت ارائه نماید. شکل ۲ دیسک‌های اصطکاکی مورد استفاده از جنس

<sup>3</sup> Stainless steel  
<sup>4</sup> Self-lubricate

<sup>1</sup> Stick-slip  
<sup>2</sup> Phosphor-bronze



شکل ۶- عمل آوری دیوار بتنی

### ۲-۳- مشخصات مصالح

به منظور تعیین مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده شامل بتن دیوار، میلگردهای استفاده شده در دیوار، فولاد تیر و کابل های پس کشیدگی از استانداردهای ASTM استفاده شد. برای اندازه گیری مقاومت فشاری بتن بلوک دیوار، ۶ نمونه استوانه ای استاندارد از مخلوط بتن تازه قالب گیری شد.

باتوجه به خودمتراکم بودن بتن ها، نمونه گیری بدون اعمال هرگونه انرژی خارجی انجام شد. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش ۲۸ روزه، مطابق استاندارد تحت عمل آوری قرار گرفتند. ۳ نمونه استوانه ای پس از ۲۸ روز و ۳ نمونه دیگر در روز آزمایش شکسته شدند. به منظور آزمایش فشاری نمونه های بتنی استوانه ای [۲۹] مطابق شکل ۷ از دستگاه بتن شکن با ظرفیت ۳۰۰ تن استفاده شد. متوسط مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای در روز آزمایش برابر ۷۸/۶ مگاپاسکال بدست آمد.



شکل ۷- نمونه بتنی استوانه ای در حین آزمون فشاری

باتوجه به تراکم میلگردها در ناحیه اتصال تیر به دیوار، به منظور جاگیری مناسب تر بتن در بین میلگردها و اطمینان از تراکم بتن، در ساخت بلوک دیوار از بتن خودتراکم<sup>۱</sup> با حداکثر اندازه سنگ دانه ۱۰ میلیمتر استفاده شد. قبل از بتن ریزی بلوک دیوار، به منظور سنجش روانی و کارایی بتن مورد استفاده، مطابق شکل ۴ از آزمایش جریان اسلامپ استفاده گردید. آزمایش جریان اسلامپ یکی از آزمایش های کنترل کیفیت اصلی در بتن های خودتراکم تازه می باشد.



شکل ۴- آزمایش جریان اسلامپ برای بتن خودتراکم

در شکل ۵ بلوک آرماتوربندی شده دیوار، قبل از بتن ریزی نشان داده شده است. پس از بتن ریزی بلوک دیدار، بتن دیوار مطابق شکل ۶ به مدت ۲۸ روز عمل آوری شد. به منظور عمل آوری مناسب بتن، سرتاسر بلوک بتنی از گونی های نخی استفاده شد و روی آن با نایلون های پلاستیکی پوشانده شد. پس از آن، بلوک بتنی تا زمان مورد نظر برای عمل آوری، مرطوب نگه داشته شد.



شکل ۵- بلوک دیوار قبل از بتن ریزی

<sup>۱</sup> Self-compacting concrete (SCC)

به منظور تعیین مشخصات مکانیکی استرندهای فولادی هفت رشته‌ای مورد استفاده، چند نمونه از این استرندها مطابق شکل ۹ با استفاده از دستگاه استحکام‌سنج یونیورسال Zwick پارک علم و فناوری خراسان تحت آزمون کشش [۳۱] قرار گرفت.



شکل ۹- استرند فولادی هفت رشته‌ای در حین آزمون کشش میانگین مشخصات مکانیکی آرماتورها و استرندهای فولادی و همچنین نمونه‌های کششی استاندارد تهیه شده از ورق بال و جان تیر که از آزمون کشش مصالح به دست آمده است در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور تعیین مشخصات مکانیکی ورق‌های فولادی استفاده شده در ساخت تیر، نمونه‌های استاندارد دمبلی شکل از ورق بال و جان تیر بریده شده و هندسه آن مطابق استاندارد ASTM A370 [۳۰] ماشینکاری گردید. سپس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه یونیورسال Zwick آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد تحت آزمون کشش [۳۰] قرار گرفت. همچنین نمونه‌هایی از آرماتورهای فولادی  $\Phi 10$  و  $\Phi 12$  در همین دستگاه تحت آزمون کشش قرار گرفت. در شکل ۸ یک نمونه کششی استاندارد در حین آزمون کشش نشان داده شده است.



شکل ۸- نمونه کششی استاندارد در حین آزمون کشش

جدول ۲- مشخصات مکانیکی ورق تیر، میلگرد دیوار و استرند پس کشیدگی بدست آمده از آزمون کشش

نمونه کششی	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	کرنش تسلیم (%)	مقاومت حداکثر (مگاپاسکال)	کرنش متناظر با مقاومت حداکثر (%)	کرنش نهایی (%)
ورق $t12$	۲۹۰/۸	۰/۲	۴۱۳/۹	۱۸/۸	۳۵/۳
ورق $t25$	۲۴۸/۸	۰/۲	۴۱۶/۵	۱۹/۵	۳۷/۹
میلگرد $10\Phi$	۴۴۰/۵	۰/۲	۶۹۸/۴	۱۲/۴	۲۴/۴
میلگرد $12\Phi$	۴۰۵/۴	۰/۲	۶۵۹/۸	۱۴/۵	۲۷/۵
استرند ۷ رشته‌ای	-	-	۱۸۹۸/۵	۲/۵۸	۲/۷۰

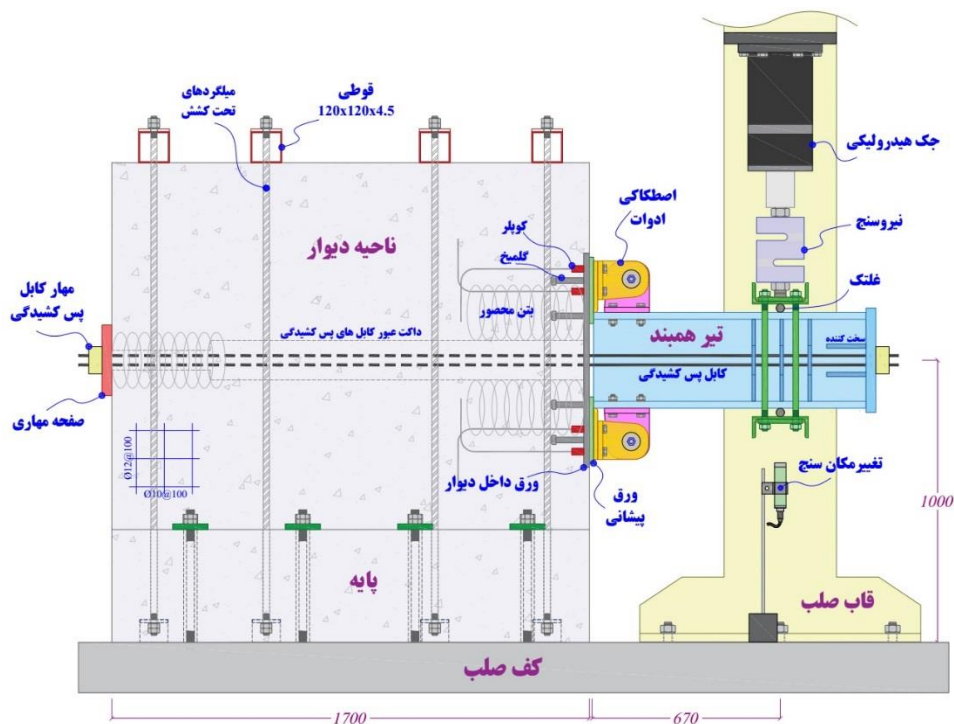
اثرات بارهای ثقلی ناشی از طبقات فوقانی، با استفاده از چهار عدد قوطی و چهار جفت میلگرد پیش‌تنیده، بر روی دیوار اعمال شد. به منظور کشش کابل‌های پس کشیدگی از یک جک مولتی استرند با ظرفیت ۱۵۰۰ کیلونیوتن استفاده گردید. برای اعمال بارگذاری جانبی چرخه‌ای شبه استاتیکی از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن استفاده شد و بار به نقطه عطف تیر اعمال گردید. مقدار بار وارد بر نمونه توسط یک نیروسنج S شکل با ظرفیت ۳۰۰ کیلونیوتن که توانایی ثبت

۳-۳- برپایش آزمایش و پروتکل بارگذاری محل اعمال بار به تیر همبند در واقع نقطه عطف منحنی لنگر به وجود آمده در تیر همبند بر اثر بارگذاری جانبی می‌باشد. به همین دلیل در محل اعمال بار جک به تیر، غلتک‌هایی قرار داده شد تا لنگر خمشی به تیر منتقل نگردد و شرایط اتصال غلتکی تامین گردد. به منظور اتصال دیوار بتنی به کف صلب، یک پایه بتنی در پایین دیوار ساخته شد و با استفاده از هشت پیچ پر مقاومت با قطر ۳۰ میلی‌متر به کف صلب متصل گردید.



شکل ۱۰- برپایش آزمایش

نیروی کششی و فشاری را داشت اندازه گیری شد و به سیستم رایانه ارسال گردید. تغییر مکان انتهایی تیر در محل اعمال بار، توسط یک عدد تغییر مکان سنج لیزری<sup>۱</sup> اندازه گیری و ثبت گردید. به منظور اندازه گیری میزان بازشدگی در محل اتصال تیر به دیوار، از سه تغییر مکان سنج در تراز بالا، وسط و پایین ارتفاع تیر استفاده شد. پارامتر دوران و تری تیر (زاویه دریفت) از حاصل تقسیم تغییر مکان قائم تیر در محل اعمال بار بر فاصله محل اعمال بار تا بر دیوار محاسبه شده است. فاصله محل اعمال نیروی برشی به تیر تا بر دیوار برابر ۶۷۰ میلی متر می باشد. در شکل ۱۰ برپایش آزمایش نمایش داده شده است. ابعاد، جزئیات آرماتور گذاری، شرایط تکیه گاهی و روش بار گذاری نمونه ها به صورت شماتیک در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

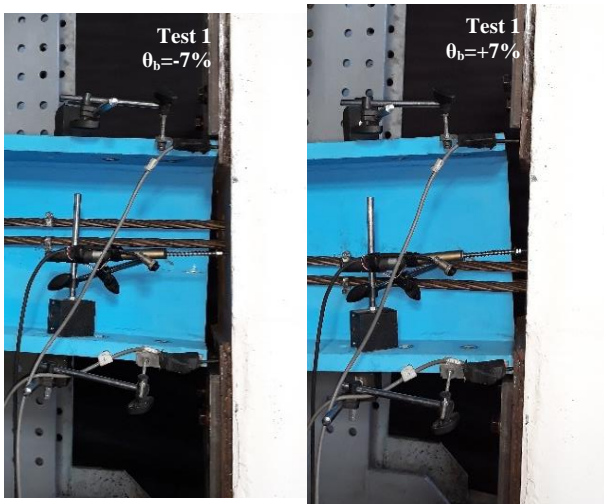


شکل ۱۱- ابعاد، جزئیات آرماتور گذاری، شرایط تکیه گاهی و نحوه بار گذاری نمونه ها

محدوده الاستیک تعیین گردد. سپس بار گذاری چرخه ای تا دریفت ۸٪ ادامه یافت و در مجموع ۲۶ چرخه بار گذاری در هر آزمایش به ثبت رسید. ملاحظه می شود از زاویه دریفت ۰/۵٪ تا ۰/۴٪، نرخ افزایش دریفت برابر ۰/۵٪ و از زاویه دریفت ۰/۴٪ تا ۰/۸٪، نرخ افزایش دریفت برابر ۰/۱٪ در نظر گرفته شده است. تاریخچه بار گذاری چرخه ای در شکل ۱۲، نشان داده شده است.

تاریخچه بار گذاری برای تمامی نمونه ها بر اساس آیین نامه ACI 374.2R-13 [۳۲] و بر مبنای کنترل جابجایی تعریف شد و در هر درصد دریفت، دو چرخه رفت و برگشت به نمونه ها اعمال شد. با توجه به اینکه جابه جایی تسلیم نمونه های تیر همبند پس کشیده مورد مطالعه در زاویه دریفت حدود ۰/۵٪ رخ می دهد، شروع بار گذاری از دریفت ۰/۲۵٪ در نظر گرفته شد تا پاسخ نمونه در

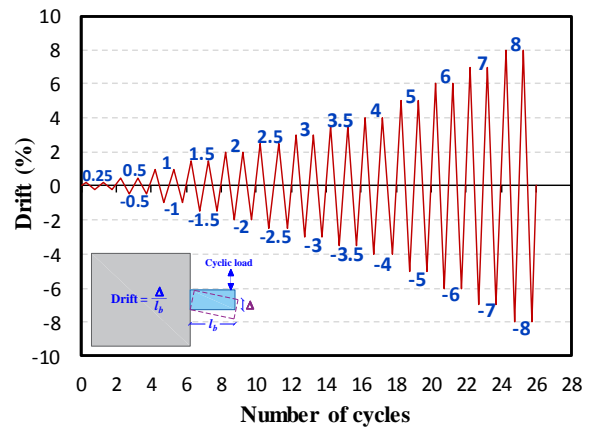
<sup>1</sup> Linear variable displacement transducers (LVDT)



شکل ۱۳- بازشدگی در ناحیه اتصال تیر به دیوار در آزمایش ۱

در آزمایش شماره ۲، تاثیر افزودن ادوات اصطکاکی در رفتار سیستم دیوار همبسته پس کشیده مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش شماره ۳، تأثیر افزایش نیروی پیش تنیدگی ادوات اصطکاکی در ظرفیت باربری و قابلیت مرکز گرایسی سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. در نمونه‌های شماره ۲ و ۳ که دارای ادوات اصطکاکی می‌باشند، نیروی اصطکاک بین سطح تیر و دیوار در اثر کابل‌های پس کشیدگی و نیروی اصطکاک بین قطعات ادوات اصطکاکی، سبب انتقال نیروی برشی می‌گردد. با این حال، در این نمونه‌ها به منظور اطمینان از عدم لغزش تیر نسبت به دیوار، ورق قطعه میانی متصل شونده به دیوار تا روی بال تیر ادامه یافت. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، در این نمونه‌ها نیز عمده دوران غیرخطی تیر در محل بازشدگی رخ می‌دهد. دوران تیر نسبت به دیوار سبب لغزش سطوح اصطکاکی بر روی یکدیگر و استهلاک انرژی می‌گردد. در شکل ۱۴ وضعیت تغییر شکل یافته نمونه ۳ در جهت مثبت و منفی بارگذاری در دریفت ۷٪ نشان داده شده است. آزمایش‌های شماره ۲ و ۳ نیز تا دریفت ۸٪ ادامه یافت و بدون وقوع خسارت قابل مشاهده در تیر، دیوار، ادوات اصطکاکی و کابل‌ها، در چرخه دوم دریفت ۸٪ متوقف گردید.

نتایج آزمایشات نشان داد، سیستم دیوار همبسته دوگانه پس کشیده مجهز به ادوات اصطکاکی توانایی تحمل تغییر شکل‌های غیرخطی بزرگ، بدون خسارت قابل ملاحظه در سیستم را دارد. در زلزله‌های بزرگ، تیر نیاز به تعویض ندارد تا زمانی که استرندهای تسلیم شده یا پاره شده بخواهند تعویض گردند.



شکل ۱۲- تاریخچه بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها

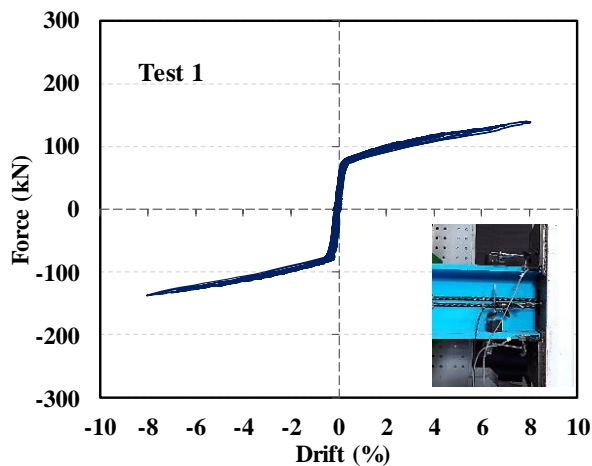
## ۴- بحث و بررسی نتایج

### ۴-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

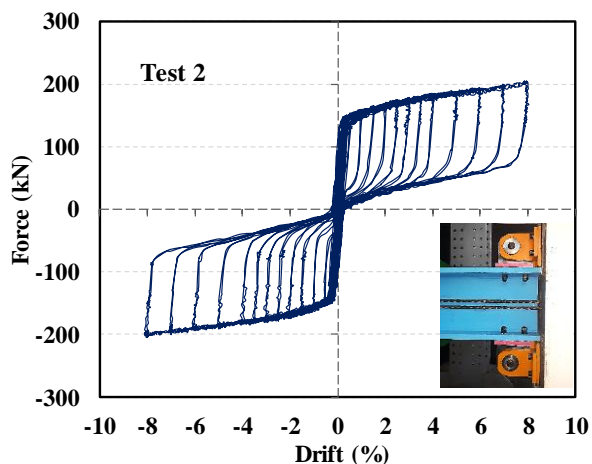
آزمایش شماره ۱ فاقد ادوات اصطکاکی در ناحیه اتصال تیر به دیوار بود تا رفتار سیستم دیوار همبسته پس کشیده، بدون ادوات استهلاک انرژی تعیین گردد. به منظور جلوگیری از لغزش تیر همبند، صفحات نگهدارنده با ضخامت ۱۲ میلیمتر در بالا و پایین تیر بر روی ورق پیشانی نصب شدند. صفحات نگهدارنده فقط از لغزش تیر نسبت به دیوار جلوگیری می‌کند و هیچ تاثیری در رفتار نمونه ندارد. لازم به ذکر است، نیروی پس کشیدگی باعث توسعه نیروی اصطکاک بین سطح تیر و دیوار و انتقال بخشی از نیروهای برشی می‌شود. افزایش نیروی برشی اعمالی به تیر، سبب شروع بازشدگی در سطح تماس تیر به دیوار می‌گردد. در اثر بازشدگی، تغییر شکل‌های غیرخطی در سیستم رخ می‌دهد. در شکل ۱۳ بازشدگی در ناحیه اتصال تیر به دیوار در دریفت ۷٪ برای نمونه شماره ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه استرندهای پس کشیدگی در طول مسیر به وسیله داکت‌هایی از بتن جدا شده‌اند و استرندها به بتن نچسبیده‌اند، در نتیجه در طول بارگذاری کرنش در کابل‌ها کوچک باقی می‌ماند و کرنش غیرخطی کابل‌ها به تأخیر می‌افتد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که استرندها در طول آزمایش پاره نشدند و آزمایش بدون گسیختگی، پس از باربرداری در چرخه دوم دریفت ۸٪ متوقف گردید. در پایان آزمایش، خسارتی در دیوار مشاهده نگردید. بنابراین همین بلوک دیوار در آزمایش‌های بعدی مورد استفاده مجدد قرار گرفت. تیر همبند نیز متحمل آسیبی نشد به جز مقدار کوچکی تسلیم شدن بال فشاری که مقدار آن قابل چشم‌پوشی می‌باشد.



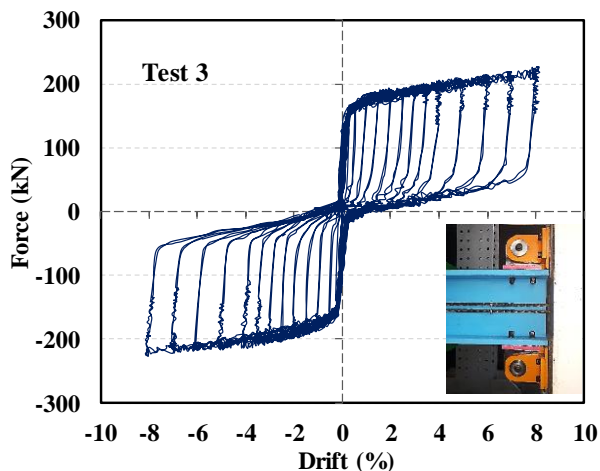
مناسب می باشد. ملاحظه می شود نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی، دارای حلقه های هیستریزس پر چمی شکل<sup>۱</sup> با جابجایی ماندگار ناچیز می باشند.



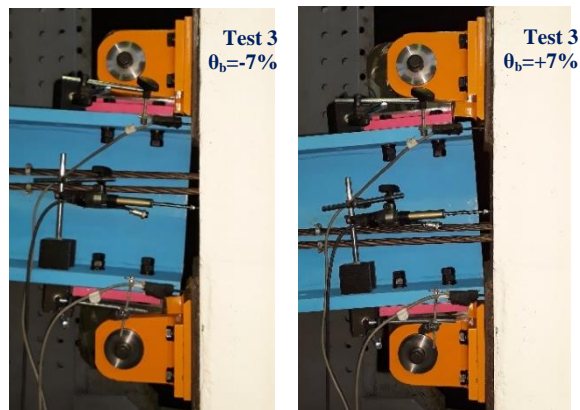
شکل ۱۵- پاسخ هیستریزس نیرو- دریفت نمونه ی شماره ۱



شکل ۱۶- پاسخ هیستریزس نیرو- دریفت نمونه ی شماره ۲



شکل ۱۷- پاسخ هیستریزس نیرو- دریفت نمونه ی شماره ۳



شکل ۱۴- بازشدگی در ناحیه اتصال تیر به دیوار در آزمایش ۳

#### ۴-۲- منحنی هیستریزس نیرو- تغییر مکان

پاسخ هیستریزس نیرو- تغییر مکان نمونه ها تحت بارگذاری چرخه ای، یک مشخصه بسیار مهم برای ارزیابی عملکرد لرزه ای سیستم می باشد. در شکل های ۱۵ تا ۱۷ رفتار چرخه ای نیروی برشی تیر در مقابل دوران تیر برای نمونه های آزمایش شده نشان داده شده است. مقدار نیروی برشی از نیروی جک هیدرولیکی بدست می آید و میزان دوران تیر همبند از تغییر مکان سنج نصب شده در زیر تیر در امتداد محل اعمال بار تعیین می گردد. سختی اولیه تیر همبند قبل از اولین بازشدگی، شبیه سختی اولیه تیر همبند یکپارچه شده با دیوار قبل از ترک خوردگی می باشد. بازشدگی سبب کاهش هندسی در سختی جانبی تیر می شود که در اثر آن، سیستم نرم تر می شود و تحت دوران های غیرخطی بزرگی قرار می گیرد. توجه شود تا زمانی که بازشدگی تا عمق قابل توجهی از تیر گسترش نیابد، اثرات باز شدگی در سختی جانبی تیر کم می باشد. با افزایش بازشدگی، نیروی کششی در کابل های پس کشیدگی افزایش می یابد که این افزایش نیرو با بازشدگی مقابله می کند. وجود این نیروی پس کشیدگی باعث بسته شدن شکاف بین تیر و دیوار می شود و سیستم را به موقعیت اولش برمی گرداند که این امر بیانگر خاصیت مرکز گرایی در سیستم است.

ملاحظه می شود رفتار نمونه فاقد ادوات اصطکاکی اساسا الاستیک دو خطی است. در نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی، بازشدگی سبب می شود قطعات ادوات اصطکاکی بر روی یکدیگر لغزش نموده و انرژی زلزله را مستهلک نمایند. حلقه های هیستریزس این نمونه ها، بیانگر رفتار لرزه ای پایدار تا دریفت ۸٪ و استهلاک انرژی

<sup>1</sup> flag-shape

اصطکاک می‌باشند، نسبت به نمونه کنترلی شماره ۱ به ترتیب ۴۷٪ و ۶۲٪ افزایش یافته است. ملاحظه می‌شود که ادوات اصطکاک علاوه بر افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سیستم دیوار همبسته دو گانه پس کشیده، سبب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری نمونه‌ها نیز می‌گردند. از مقایسه نتایج نمونه‌های شماره ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش ۳۰٪ در نیروی پیش‌تندگی ادوات اصطکاک، میانگین ظرفیت باربری حدود ۱۰٪ افزایش یافته است.

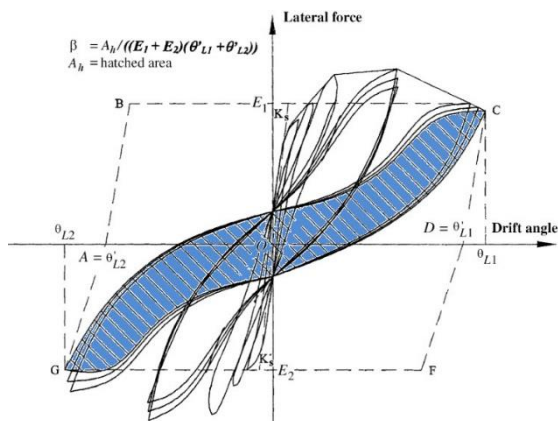
جدول ۳- بار حداکثر در جهت مثبت و منفی بارگذاری

نمونه	بار حداکثر (kN)		افزایش ظرفیت باربری
	فشار (+)	کشش (-)	
۱	۱۳۸/۵	۱۳۸/۱	۱/۰
۲	۲۰۳/۲	۲۰۲/۸	۱/۴۷
۳	۲۲۴/۰	۲۲۵/۰	۱/۶۲

#### ۴-۴- نسبت استهلاک انرژی نسبی

آیین‌نامه ACI ITG 5.1 [۲۴] استهلاک انرژی را با استفاده از پارامتر نسبت استهلاک انرژی نسبی بیان می‌کند. مطابق شکل ۱۹، استهلاک انرژی نسبی بر اساس نسبت مساحت محصور با حلقه هیستریزس ( $A_h$ )، به مساحت متوازی‌الاضلاع محصورکننده بدست می‌آید و از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد؛ که در آن  $K'_s$  و  $K_s$  به ترتیب مقادیر سختی اولیه در جهت مثبت و منفی بارگذاری می‌باشد. پارامترهای  $E_1$  و  $E_2$  نیز به ترتیب حداکثر ظرفیت باربری در چرخه سوم در جهت مثبت و منفی بارگذاری می‌باشد.

$$\beta = \frac{A_h}{(E_1 + E_2)(\theta'_{L1} + \theta'_{L2})} \quad (1)$$

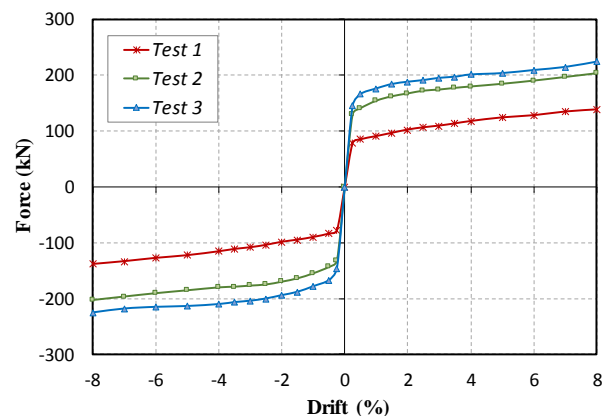


شکل ۱۹- محاسبه نسبت استهلاک انرژی نسبی [۲۴]

از مقایسه پاسخ نمونه‌های مجهز به ادوات اصطکاک با نمونه فاقد ادوات، ملاحظه می‌شود که سیستم مجهز به ادوات اصطکاک، ظرفیت باربری بیشتری داشته و دارای ظرفیت استهلاک انرژی قابل توجهی می‌باشد، در نتیجه تغییر مکان جانبی سیستم در زلزله کاهش می‌یابد؛ در حالی که خاصیت مرکزگرایی و تحمل تغییر مکان غیرخطی بزرگ از بین نمی‌رود. از مقایسه نتایج آزمایش شماره ۲ با آزمایش شماره ۳ مشاهده می‌شود که افزایش نیروی پیش‌تندگی ادوات اصطکاک، سبب افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سیستم می‌گردد با این حال تغییر شکل ماندگار را افزایش و قابلیت مرکزگرایی سیستم را کاهش می‌دهد. از نتایج به‌دست آمده ملاحظه می‌شود که کابل‌ها نقش مرکزگرایی و ادوات اصطکاک نقش استهلاک انرژی را در سیستم بر عهده دارند. بنابراین به منظور حفظ قابلیت مرکزگرایی و همچنین ظرفیت استهلاک انرژی مناسب، باید تناسبی منطقی بین نیروی لغزش میراگر و میزان پس کشیدگی کابل‌ها وجود داشته باشد.

#### ۴-۳- منحنی‌های پوش نیرو - دریافت

منحنی‌های پوش نیرو-دریافت نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این منحنی‌ها بر اساس پاسخ هیستریزس نمونه‌ها و از اتصال نقطه جابه‌جایی حداکثر برای چرخه اول هر سیکل بارگذاری ترسیم شده است.



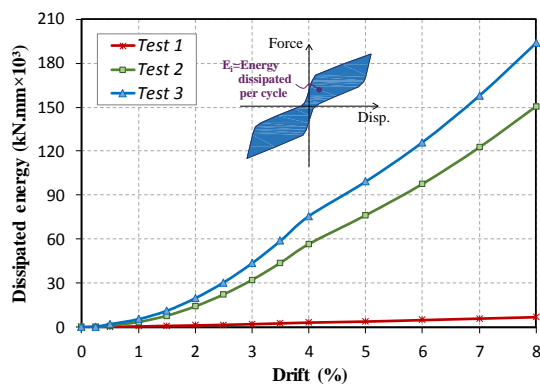
شکل ۱۸- پوش منحنی هیستریزس بار-دریافت نمونه‌ها

در جدول ۳ مقادیر بار حداکثر در جهت مثبت و منفی بارگذاری و میزان افزایش میانگین ظرفیت باربری نمونه‌ها نسبت به نمونه فاقد ادوات اصطکاک ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، ظرفیت باربری نمونه‌های شماره ۲ و شماره ۳ که دارای ادوات

می‌باشد؛ بگونه‌ای که با افزایش ۳۰٪ در نیروی پیش‌تندگی ادوات اصطکاکی، میانگین نسبت استهلاک انرژی نسبی حدود ۱۵٪ افزایش یافته است.

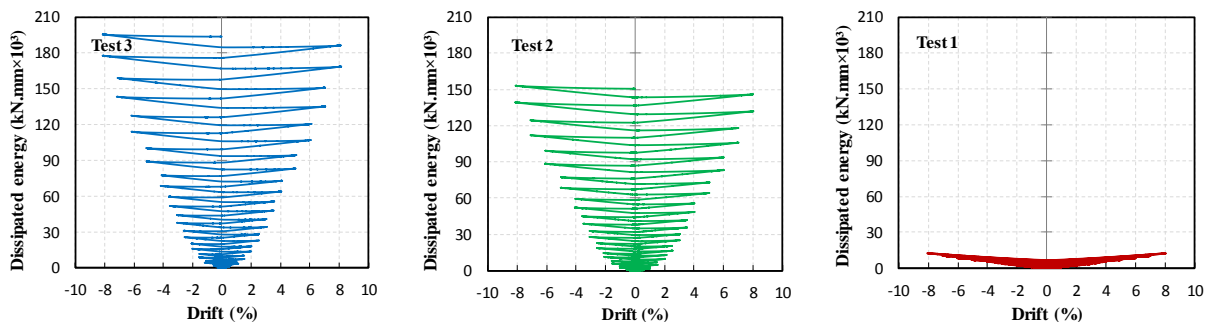
#### ۴-۵- انرژی مستهلک شده تجمعی

ظرفیت استهلاک انرژی یک معیار مهم برای ارزیابی عملکرد اعضا تحت بارهای لرزه‌ای می‌باشد. انرژی مستهلک شده تجمعی در نمونه‌ها تحت بار چرخه‌ای افزایش یافته، از جمع مساحت محصور شده در زیر حلقه‌های هیستریزیس ( $\sum E_i$ ) در دررفت‌های مختلف محاسبه می‌شود. در شکل ۲۱ مقادیر ظرفیت استهلاک انرژی تجمعی برای نمونه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود ظرفیت استهلاک انرژی نمونه فاقد ادوات اصطکاکی بسیار ناچیز می‌باشد در حالیکه در نمونه‌های ۲ و ۳ که مجهز به ادوات اصطکاکی می‌باشند، ظرفیت استهلاک انرژی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. افزایش نیروی پیش‌تندگی ادوات اصطکاکی، سبب افزایش نیروی لغزش ادوات و افزایش ظرفیت استهلاک انرژی سیستم می‌گردد؛ بگونه‌ای که با افزایش ۳۰٪ در نیروی پیش‌تندگی ادوات اصطکاکی، انرژی مستهلک شده تجمعی به‌طور متوسط حدود ۳۳٪ افزایش یافته است.



شکل ۲۱- نمودار استهلاک انرژی تجمعی-دررفت نمونه‌ها

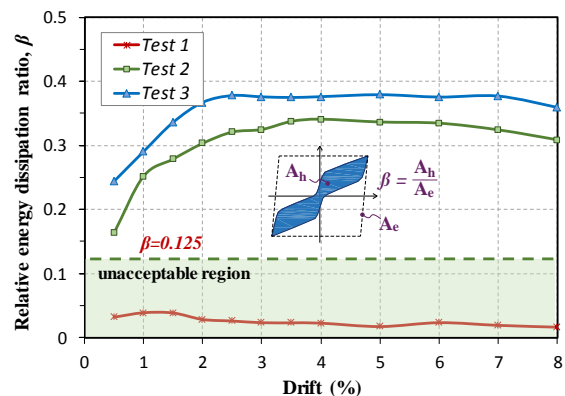
در شکل ۲۲ استهلاک انرژی تجمعی در دررفت‌های مختلف برای نمونه‌های آزمایش شده نشان داده شده است.



شکل ۲۲- استهلاک انرژی تجمعی نمونه‌ها در دررفت‌های مختلف

بر اساس ضوابط آیین نامه ACI ITG 5.1، نسبت استهلاک انرژی نسبی برای سومین چرخه هیستریزیس در تغییر مکانی که اعتبار سازه مدنظر می‌باشد، نباید کمتر از ۰/۱۲۵ باشد [۲۴]. زیرا اگر استهلاک انرژی نسبی زیرسازه کمتر از این مقدار باشد، ممکن است میرایی کافی در کل سازه وجود نداشته باشد و ظرفیت استهلاک انرژی سازه در حین زلزله، ناکافی باشد.

در شکل ۲۰ نسبت استهلاک انرژی نسبی در دررفت‌های مختلف برای نمونه‌های آزمایش شده نشان داده است. میانگین نسبت استهلاک انرژی نسبی از دررفت ۲٪ تا دررفت ۸٪ برای نمونه‌های آزمایش شده ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۰/۲۵، ۰/۳۲۵ و ۰/۳۷۵ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب  $\beta$  برای نمونه فاقد ادوات اصطکاکی ناچیز بوده و کمتر از مقدار مجاز می‌باشد. بنابراین استفاده از سیستم دیوار همبسته پس کشیده بدون ادوات استهلاک انرژی در مناطق لرزه خیز مجاز نمی‌باشد. در حالی که در نمونه‌های مجهز به ادوات اصطکاکی، استهلاک انرژی نسبی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است و مقدار آن در تمام سطوح دررفت از حداقل مقدار مجاز بیشتر می‌باشد.



شکل ۲۰- نمودار نسبت استهلاک انرژی نسبی-دررفت نمونه‌ها

از مقایسه نتایج نمونه‌های شماره ۲ و ۳ ملاحظه می‌شود که با افزایش نیروی پیش‌تندگی ادوات اصطکاکی، نسبت استهلاک انرژی سیستم افزایش

## ۵- نتیجه گیری

ترتیب برابر ۰/۳۲۵ و ۰/۳۷۵ بدست آمد. بنابراین استفاده از سیستم دیوار همبسته پس کشیده بدون ادوات استهلاک انرژی در مناطق لرزه خیز مجاز نمی باشد. در حالی با افزودن ادوات اصطکاکی به این سیستم، نسبت استهلاک انرژی نسبی سیستم افزایش قابل ملاحظه ای می یابد و مقدار آن در تمام سطوح درینفت از حداقل مقدار مجاز بیشتر می شود.

## ۶- مراجع

- [1]. Park R, Paulay T. Reinforced concrete structures. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 1975.
- [2]. Paulay T, Priestley MJN. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1992.
- [3]. Paulay T. Ductility of Reinforced Concrete Shear walls for Seismic Areas. Spec Publ 1977;53:127-48.
- [4]. Breña SF, Ihtiyar O. Performance of conventionally reinforced coupling beams subjected to cyclic loading. J Struct Eng 2010;137:665-76.
- [5]. El-Tawil S, Harries KA, Fortney PJ, Shahrooz BM, Kurama Y. Seismic design of hybrid coupled wall systems: state of the art. J Struct Eng 2010;136:755-69.
- [6]. Park W-S, Yun H-D. Seismic behaviour of steel coupling beams linking reinforced concrete shear walls. Eng Struct 2005;27:1024-39.
- [7]. Farsi A, Keshavarzi F, Mirghaderi R. Experimental study of a replaceable steel coupling beam with endplate connection. J Constr Steel Res 2016;122:138-50.
- [8]. Gong B, Shahrooz BM. Concrete-steel composite coupling beams. I: Component testing. J Struct Eng 2001;127:625-31.
- [9]. Nie J-G, Hu H-S, Eatheron MR. Concrete filled steel plate composite coupling beams: Experimental study. J Constr Steel Res 2014;94:49-63.
- [10]. Hung C-C, El-Tawil S. Seismic behavior of a coupled wall system with HPFRC materials in critical regions. J Struct Eng 2011;137:1499-507.
- [11]. Ruiz-garcã J, Miranda E. Residual displacement ratios for assessment of existing structures. Earthq Eng Struct Dyn 2006;35:315-36.
- [12]. Morgen BG, Kurama YC. A Friction Damper for Post-Tensioned Precast Concrete Moment Frames. PCI J 2004;49:112-33.
- [13]. Ricles JM, Sause R, Garlock MM, Zhao C. Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames. J Struct Eng 2001;127:113-21.

در این پژوهش، رفتار تیر همبند فولادی پس کشیده مجهز به ادوات استهلاک انرژی اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفت. سه نمونه با مقیاس  $2/3$  تحت بار جانبی چرخه ای شبه استاتیکی با دامنه افزایش یافته مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه ها شامل یک نمونه کنترلی فاقد سیستم استهلاک انرژی و دو نمونه مجهز به ادوات اصطکاکی با سطوح مختلف پیش تنیدگی بود. مهم ترین نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی به صورت زیر خلاصه می شود:

(۱) سطح تماس فسفر-برنز در مقابل فولاد ضد زنگ، مقاوم در برابر زنگ زدگی بوده و دارای رفتار لغزشی پایدار با ویژگی های الاستوپلاستیک مناسب بود.

(۲) نمونه کنترلی رفتار الاستیک دو خطی تحت بارهای چرخه ای ارائه نمود. در حالی که نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی، حلقه های هیستریزس پرچی شکل با جابه جایی ماندگار ناچیز را از خود نشان دادند.

(۳) نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی، توانایی تحمل تغییر شکل های غیر خطی بزرگ بدون خسارت قابل ملاحظه در تیر، دیوار و ادوات اصطکاکی را داشتند و رفتار لرزه ای پایداری را تحت بارهای چرخه ای تا درینفت ۸٪ از خود نشان دادند.

(۴) افزودن ادوات اصطکاکی به سیستم دیوار همبسته پس کشیده، سبب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری سیستم گردید. بگونه ای که در نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی، ظرفیت باربری جانبی نسبت به نمونه کنترلی از ۴۷٪ تا ۶۲٪ افزایش یافت.

(۵) افزایش نیروی پیش تنیدگی ادوات اصطکاکی، سبب افزایش ظرفیت باربری جانبی و ظرفیت استهلاک انرژی سیستم گردید. به گونه ای که با افزایش ۳۰٪ در نیروی پیش تنیدگی ادوات اصطکاکی، میانگین ظرفیت باربری حدود ۱۰٪، میانگین نسبت استهلاک انرژی نسبی حدود ۱۵٪ و میانگین ظرفیت استهلاک انرژی تجمعی حدود ۳۳٪ افزایش یافت.

(۶) افزایش نیروی پیش تنیدگی ادوات اصطکاکی، سبب افزایش تغییر شکل ماندگار و کاهش قابلیت مرکز گرایی سیستم گردید.

(۷) میانگین نسبت استهلاک انرژی نسبی برای نمونه کنترلی فاقد میراگر برابر ۰/۲۵ و برای نمونه های مجهز به ادوات اصطکاکی به

method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, United States: 2014.

[30]. ASTM Standard-A370. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. West Conshohocken, US: ASTM International; 2010.

[31]. ASTM Standard A416 / A416M. Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete. ASTM A416/A416M- 18. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2018.

[32]. ACI Committee 374. Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads (ACI 374.2R-13). Michigan: American Concrete Institute (ACI); 2013.

[14]. Restrepo JI, Rahman A. Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators. *J Struct Eng* 2007;133:1560–70.

[15]. Smith BJ, Kurama YC, McGinnis MJ. Behavior of precast concrete shear walls for seismic regions: comparison of hybrid and emulative specimens. *J Struct Eng* 2013;139:1917–27.

[16]. Kurama YC, Weldon BD, Shen Q. Experimental evaluation of posttensioned hybrid coupled wall subassemblages. *J Struct Eng* 2006;132:1017–29.

[17]. Weldon BD, Kurama YC. Experimental evaluation of posttensioned precast concrete coupling beams. *J Struct Eng* 2010;136:1066–77.

[18]. Ricles JM, Sause R, Peng SW, Lu LW. Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections. *J Struct Eng* 2002;128:850–9.

[19]. Kim H-J, Christopoulos C. Friction damped posttensioned self-centering steel moment-resisting frames. *J Struct Eng* 2008;134:1768–79.

[20]. Cheok GS, Stone WC, Kunnath SK. Seismic response of precast concrete frames with hybrid connections. *ACI Struct J* 1998;95:527–39.

[21]. Guo T, Zhang G, Chen C. Experimental study on self-centering concrete wall with distributed friction devices. *J Earthq Eng* 2014;18:214–30.

[22]. Shen Q, Kurama YC, Weldon BD. Seismic design and analytical modeling of posttensioned hybrid coupled wall subassemblages. *J Struct Eng* 2006;132:1030–40.

[23]. Weldon BD, Kurama YC. Nonlinear behavior of precast concrete coupling beams under lateral loads. *J Struct Eng* 2007;133:1571–81.

[24]. ITG ACI. Acceptance Criteria for Special Unbonded Post-Tensioned Precast Structural Walls Based on Validation Testing. ACI ITG-5.1-07, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI; 2007.

[25]. Popov EP, Grigorian CE, Yang T-S. Developments in seismic structural analysis and design. *Eng Struct* 1995;17:187–97.

[26] Loo WY, Quenneville P, Chouw N. A new type of symmetric slip-friction connector. *J Constr Steel Res* 2014;94:11–22.

[27]. Loo WY, Quenneville P, Chouw N. The influence of surface preparation and the lubricating effect of mill scale on the performance of slip friction connectors. *Constr Build Mater* 2017;155:1025–38.

[28]. Martínez-Rueda JE. On the evolution of energy dissipation devices for seismic design. *Earthq Spectra* 2002;18:309–46.

[29]. ASTM Standard-C39/C39M. Standard test

## Experimental study of post-tensioned hybrid coupled wall system with friction devices at the beam-to-wall connection region

Mohammad Sajjad Zareian

PhD Student, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University Of Mashhad, Iran

Mohammad Reza Esfahani \*

Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University Of Mashhad, Mashhad, Iran

Abdollah Hosseini

Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

### Abstract

Post-tensioned coupled shear wall system is a new type of seismic lateral force resisting systems with self-centering capability. In this system, the coupling beam is not embedded into the walls, and coupling of concrete walls is achieved by posttensioning beam to the walls using unbonded post-tensioning (PT) strands. In this research, the cyclic behavior of post-tensioned steel coupling beam with friction devices at the beam-to-wall connection region is experimentally evaluated. Three 2/3-scale specimens were tested subjected to quasi-static lateral loading. The specimens consisted of one control specimen without energy dissipation system and two specimens equipped with friction devices with different levels of damper normal force. Friction devices are used at the beam-to-wall connections to slip and dissipate the seismic input energy. The test results revealed that the specimens equipped with friction devices have excellent lateral stiffness, strength, and ductility, and have significant energy dissipation capacity and negligible residual displacements under reversed cyclic loading. In addition, the specimens is able to tolerate large nonlinear rotations without significant damage in the beam and the wall region. Adding friction devices increased the load-carrying capacity by 47% to 62% and significantly increased the energy dissipation capacity of the specimens. With a 30% increase in the damper normal force, the load capacity increased by about 10%, the average relative energy dissipation ratio by about 15% and the mean cumulative energy dissipation capacity by about 33%.

**Keywords:** Hybrid coupled wall, Post tensioning, Residual displacement, Friction device, Cyclic behavior.

---

\* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir