

Experimental Study of the Effect of Using Stiffener in T-stub Steel Connections Under Cyclic Loading

Mehrdad RasouliTabar¹, Mehrzad TahamouliRoudsari^{2,3*}, Parham MemarZadeh², Farshid Fathi⁴

1- Ph. D. Student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ABSTRACT

Connections in steel structures are one of the most important parts of the load-carrying system in buildings. T-stub connections are particularly important due to the absence of welding in connection components. To improve the seismic parameters in this type of connection, the use of a stiffener in the T-stub connection Tee section is proposed in this research. Three full-scale experimental specimens were constructed and tested in the laboratory to evaluate the proposed design performance. In this research, cyclic and quasi-static loading was applied to experimental specimens. The hysteresis diagram was obtained for the laboratory samples and based on that, the backbone diagram and the equivalent bilinear diagram were drawn. Based on the equivalent bilinear diagram, seismic parameters for the samples were calculated and compared. The first sample was designed and constructed based on the design method provided in the ANSI/AISC 358-16 regulations. In the subsequent samples, the desired stiffener with two different thicknesses of 8 and 10 mm was added to the connection. The results of the tests were analysed and the ultimate moment, effective stiffness, ductility, and energy dissipation capacity parameters were calculated and evaluated. The results demonstrated that adding the stiffener to the T-stub connection enhanced the seismic performance of the connection. The results indicated that in samples with 8 and 10 mm stiffener thickness, the ultimate moment increased by 9% and 14%, respectively; The effective stiffness has been improved by 44% and 92%, and the energy dissipation capacity by 54% and 67%, respectively. Also, the plasticity for samples with stiffeners has grown by 12% and 58%, respectively. The results also demonstrated that the thickness of the stiffener has a significant effect on the behavior of the proposed connection.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 June 2024

Revise Date: 19 August 2024

Accept Date: 06 November 2024

Keywords:

Steel connection

T-stub

Ultimate moment

Ductility

Energy dissipation capacity

Steel stiffener

Experimental

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.451453.3386](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451453.3386)

*Corresponding author: Mehrzad TahamouliRoudsari

Email address: Tahamouli@iauksh.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از سخت کننده در اتصالات فولادی T-stub تحت بارگذاری چرخه‌ای

مهرداد رسولی تبار^۱، مهرزاد تحملی رودسری^{۲*}، پرهام معمارزاده^۲، فرشید فتحی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

چکیده

اتصالات در سازه‌های فولادی از مهمترین بخش‌های سامانه باربری در ساختمان‌ها می‌باشند. اتصالات دارای سپری با پیچ و مهره^۱ به دلیل عدم استفاده از جوش در اجزای اتصال از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. به منظور بهبود پارامترهای لرزه‌ای در این نوع اتصال، در این تحقیق استفاده از یک سخت کننده در سپری اتصال T-stub پیشنهاد شده است. سه نمونه آزمایشگاهی با مقیاس واقعی برای بررسی طرح پیشنهادی ساخته شده و در آزمایشگاه مورد بارگذاری قرار گرفتند. در این تحقیق بارگذاری بصورت چرخه‌ای و شبه استاتیکی به نمونه‌های آزمایشگاهی اعمال گردید. نمودار چرخه‌ای برای نمونه‌های آزمایشگاهی بدست آمد و براساس آن نمودار استخوانی^۲ و دوخطی معادل ترسیم شدند. براساس نمودار دوخطی معادل، پارامترهای لرزه‌ای برای نمونه‌ها محاسبه و مقایسه شدند. نمونه اول بر اساس روش طراحی ارائه شده در آئین نامه ANSI/AISC 358-16 ساخته شده و در نمونه‌های بعدی سخت کننده مورد نظر با دو ضخامت متفاوت ۸ و ۱۰ میلیمتری به اتصال اضافه شد. نتایج آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای لنگر نهایی، سختی مؤثر، شکل پذیری، و ظرفیت اتلاف انرژی محاسبه و ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند که اضافه کردن سخت کننده به اتصال T-stub باعث ارتقای عملکرد لرزه‌ای اتصال و ارتقای پارامترهای لرزه ای شده است. نتایج نشان دادند که در نمونه‌های دارای سخت کننده با ضخامت ۸ و ۱۰ میلیمتری لنگر نهایی به ترتیب حدوداً ۹٪ و ۱۴٪ افزایش داشته است؛ سختی مؤثر به ترتیب ۴۴٪ و ۹۲٪ و ظرفیت اتلاف انرژی ۵۴٪ و ۶۷٪ ارتقا یافته‌اند. همچنین شکل پذیری برای نمونه‌های دارای سخت کننده به ترتیب ۱۲٪ و ۵۸٪ رشد داشته‌اند. نتایج همچنین نشان دادند که ضخامت سخت کننده تاثیر قابل توجهی بر رفتار اتصال پیشنهادی دارد.

کلمات کلیدی: اتصالات فولادی، T-stub، لنگر نهایی، شکل پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی، سخت کننده فولادی، تست آزمایشگاهی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.451453.3386	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451453.3386	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۸/۱۶	۱۴۰۳/۰۸/۱۶	۱۴۰۳/۰۵/۲۹	۱۴۰۳/۰۳/۱۸
مهرزاد تحملی رودسری					*نویسنده مسئول:	
Tahamouli@iauksh.ac.ir					پست الکترونیکی:	

¹ T-stub

² Backbone

۱ - مقدمه

سازه‌های فولادی در صنعت ساخت و ساز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در پهنه‌های لرزه خیز با استفاده از سامانه‌های مختلفی که می‌توان در سازه‌های فولادی بکار برد، می‌توان عملکرد این سازه‌ها را به نسبت زلزله‌های مورد انتظار طراحی کرد. در این سازه‌ها، چه از سامانه قاب خمشی و چه از عناصر لرزه‌ای دیگر مانند دیوار برشی و یا مهاربندهای مختلف استفاده شده باشد؛ اتصالات تیر به ستون از اهمیت بالایی برخوردار است. انرژی زلزله عمدتاً توسط رفتار غیر خطی سازه تلف می‌شود. بر اساس اهمیت اتصالات فولادی، انواع اتصالات جوشی و پیچ و مهره‌ای مورد بررسی قرار گرفته و به منظور استفاده در سازه‌های مختلف در آئین نامه‌های طراحی ارائه شده‌اند.

اتصالات در سازه‌های فولادی از نظر ابزار اتصال به دو دسته جوشی و پیچی تقسیم شده و از نظر عملکرد به دو دسته‌ی صلب و مفصلی تقسیم می‌شوند. عموماً سازه‌ها بر اساس اینکه انتقال لنگر در اتصالات صورت می‌پذیرد یا خیر در دست طراحی قرار می‌گیرند و اتصالات بر اساس درصدی از لنگری که انتقال می‌دهند در دسته صلب و نیمه صلب قرار می‌گیرند.

اتصالات پیچ و مهره‌ای به دلیل اطمینان بالاتر اجرایی نسبت به اتصالات جوشی، عدم نیاز به آزمایشات مخرب و غیر مخرب و همچنین سادگی در اجرا در سال‌های اخیر از محبوبیت بالاتری برخوردار شده‌اند. همچنین امکان بازسازی ساده تر اتصالات پیچی پس از رخ دادن زلزله نسبت به اتصالات جوشی، آن‌ها را در اولویت قرار داده است. اتصالات T-stub یکی از سامانه‌های ارائه شده برای اتصالات فولادی می‌باشد که در اجرای این نوع اتصال از جوش در هیچ بخشی استفاده نمی‌شود. این اتصال در دسته‌بندی اتصالات صلب و نیمه صلب قرار می‌گیرد و با استفاده از پارامترهای طراحی آن، شامل ابعاد و اندازه‌های سپری‌های T شکل و همچنین ابعاد سوراخ کاری و پیچ‌های مصرفی، و همچنین لنگر نهایی در طراحی می‌توان درصد صلبیت این اتصالات را تعیین نمود.

اتصالات T-stub دارای نقاط قوت و ضعفی هستند که بر اساس این ویژگی‌ها محققان تلاش داشته‌اند تا با ارائه راهکارهای نوین عملکرد این اتصال را بهینه کنند. عدم استفاده از جوش در این اتصال، امکان تعیین لنگر متحمل توسط اتصال با استفاده از تغییرات هندسی در عناصر آن، عدم وجود پیش گرمایش ناشی از جوشکاری در اتصال و همچنین امکان نصب راحت در زمان اجرا از ویژگی‌های مثبت این اتصال می‌باشد.

تحقیقات بسیاری درباره عملکرد اتصال T-stub انجام پذیرفته است که در آن‌ها پارامترهای مؤثر بر رفتار این اتصالات تحت بارگذاری‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در تعدادی از این تحقیقات پیش‌بینی ظرفیت تغییر شکل پلاستیک اتصال T-stub، بررسی اثر بارگذاری کششی بر روی اتصال پیچ و مهره‌ای T-stub مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه این تحقیقات نشان داده شده است که با افزایش عمق تیر، ظرفیت دورانی پلاستیک اتصال کاهش می‌یابد؛ همچنین استفاده از بال بزرگتر در سپری اتصال T-stub باعث محافظت بیشتر از پیچ‌ها در برابر عمل اهرمی می‌گردد [۲-۴].

بخش قابل توجهی از تحقیقات مربوط به اتصالات T-stub به ارائه مدل‌های مکانیکی برای پیش‌بینی رفتار این اتصالات و همچنین روش‌های طراحی نوین آن‌ها اختصاص داده شده است. از این سری تحقیقات می‌توان به شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای این اتصالات در مدل‌های مکانیکی، پیش‌بینی سختی اولیه و لنگر نهایی برای اتصال T-stub با کمک مدل پیشنهادی و همچنین بررسی حالات شکست پیچ و تغییر فرم پلاستیک در جان سپری اشاره کرد. در این مطالعات پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر رفتار اتصال مورد بررسی قرار گرفته و مکانیزم‌های خرابی و ظرفیت لنگر نهایی و همچنین اثر شدگی مجدد و لاغری پیچ ارزیابی شد [۵-۷]. در تحقیقی دیگر روش طراحی بهینه برای نوعی از اتصال T-stub دارای میراگر لرزه‌ای فولادی در اتصال کنترل خرابی^۳ ارائه شده است که در آن نسبت مقاومت، همچنین نسبت سختی میراگر به تیر و نسبت سختی میراگر به ستون محاسبه و ارائه شده است [۸].

آئین نامه طراحی ANSI/AISC 356-16 صراحتاً تأکید داشته است که برای اتصالات T-stub می‌بایست از سپری‌های نورد شده استفاده شود [۹]. البته تحقیقات زیادی برای بررسی عملکرد اتصالات T-stub دارای سپری‌های جوش شده و غیر نورد شده نیز انجام

³ Damage-Control

پذیرفته است. در این تحقیقات رفتار اتصالات T-stub با سپری غیر نورد شده تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج نشان‌دهنده افزایش مقاومت در حالات شکست مختلف بوده است [۱۱۰ و ۱۱۱]. در نتیجه این تحقیقات نشان داده شده است که در تست‌های آزمایشگاهی خرابی در جوش اتفاق نیفتاده است و استفاده از اتصالات جوشی عموماً باعث افزایش مقاومت می‌گردد. همچنین در تحقیقی دیگر نشان داده شد که با افزایش ضخامت بال T-stub، خمش پلاستیک از بال T-stub به تیر انتقال می‌یابد [۱۲]. در تحقیقات دیگری اثر مقادیر پیش تنیدگی پیچ‌ها بر روی سختی اولیه اتصال بررسی و مدل سختی بر اساس پارامترهای هندسی ارائه شد [۱۳ و ۱۴]. نتایج نشان دادند که با افزایش پیش تنیدگی در پیچ‌ها سختی اولیه نیز افزایش خواهد داشت اما با پیش تنیدگی بیش از اندازه سختی اولیه کاهش خواهد داشت.

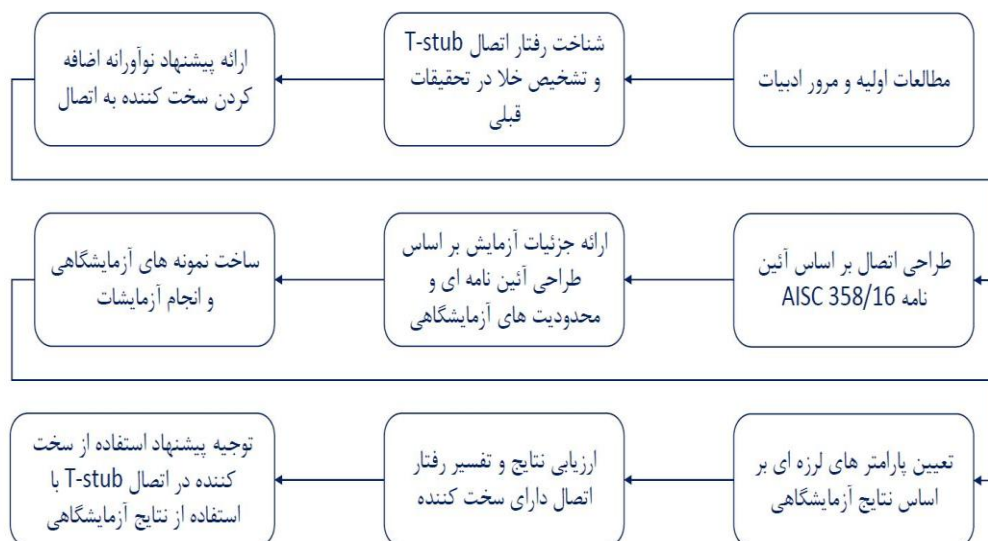
تغییر در مصالح و یا هندسه اتصالات T-stub از مباحث دیگر مورد بررسی محققان بوده است. به منظور ارائه راهکار برای عملکرد بهینه این نوع از اتصال استفاده از فولاد با مقاومت بالاتر برای سپری و پیچ‌ها بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر اتصال بود [۱۵]. همچنین استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین می‌تواند به اتلاف انرژی بیشتر سامانه اتصال T-stub کمک کرده و با استفاده از جان لاغر برای سپری و ایجاد مفصل در جان T-stub ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری را افزایش داد [۱۶]. در تحقیقات دیگری اثر پارامترهای متنوعی برای بهبود رفتار اتصال ارزیابی شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به بررسی اثر ضخامت بال T-stub و بررسی اتصال اصطکاکی به عنوان ابزاری برای جذب انرژی بیشتر اشاره کرد [۱۷ و ۱۸]. نتایج این تحقیقات نشان‌دهنده اثر مثبت تقویت ورق پیوستگی در مقابله با اثر اهرمی در اتصال و اثر پیش تنیدگی بر روی افزایش اصطکاک و جذب انرژی بالاتر می‌باشد. همچنین در تحقیقی جداگانه عملکرد اتصال T-stub نسبت به اتصال دارای ورق انتهایی مقایسه شده که در نتیجه می‌توان به این نکته اشاره کرد که ضخامت بال T-stub اثر بالاتری نسبت به ضخامت بال ورق انتهایی داشته است [۱۹].

در زمینه بررسی انواع اتصالات فولادی، تحقیقات مختلفی بصورت آزمایشگاهی توسط نویسندگان این مقاله انجام شده است که از جمله آنها می‌توان به بررسی اتصال تیر فولادی دارای مقطع کاهش یافته و فیوز قابل جایگزین به ستون فولادی، استفاده از رابط ناودانی برای اتصال تیرهای I شکل به ستون‌های دایره‌ای، و همچنین استفاده از جزئیات جدید اتصال تیر I شکل به ستون با مقطع مستطیلی با استفاده از رابطه ناودانی اشاره نمود که در تمامی این اتصالات آزمایشات نشان‌دهنده عملکرد مناسب جزئیات پیشنهادی برای اتصالات فولادی در بارگذاری‌های چرخه‌ای بوده‌اند [۲۰-۲۲].

در تحقیقات اخیر درباره اتصالات T-stub، ارائه روش‌های نوین طراحی به منظور پوشش ضعف‌های آئین‌نامه‌های بین‌المللی، بررسی استفاده از این اتصالات در زمان استفاده از ستون‌های دایره‌ای فولادی توخالی و پر شده با بتن، و همچنین ارزیابی مقدار و محل اعمال اثر نیروی اهرمی در اتصالات T-stub مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳-۲۶]. در نتیجه این تحقیقات روش‌های طراحی نوین برای اتصالات T-stub، و همچنین روش‌های ارزیابی سختی، مقاومت نهایی، و ظرفیت اتلاف انرژی در این اتصالات ارائه شده است. همچنین نشان داده شده است که در اتصالات T-stub محل اعمال اثر نیروی اهرمی همیشه لبه‌ی بال سپری نبوده و می‌تواند بر اساس ضخامت بال سپری و همچنین فاصله پیچ‌ها از جان سپری متغیر باشد.

مطالعه تحقیقات اخیر نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که پارامترهای تاثیرگذار بر روی اتصالات T-stub از نظر هندسی و مصالح بسیار متفاوت هستند. همچنین اضافه کردن عناصر فولادی به منظور ارتقای پارامترهای لرزه‌ای می‌تواند تأثیر مناسبی بر روی مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و سختی این اتصال داشته باشد. بر این اساس می‌توان گفت استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی در اتصالات T-stub می‌تواند رفتار این اتصالات را تغییر داده و در صورت استفاده از سخت‌کننده با هندسه و ضخامت مناسب امکان بهبود پارامترهای شکل‌پذیری، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی فراهم گردد. همچنین انتظار می‌رود تا با استفاده از سخت‌کننده‌های پیشنهادی صلبیت اتصال نیز افزایش یابد هرچند که محاسبه دقیق‌تر این پارامتر نیازمند مدلسازی‌های عددی گسترده می‌باشد. در تحقیق پیش‌رو تلاش شد تا اضافه

کردن سخت‌کننده‌های فولادی به سپری را به عنوان یک نوآوری در طراحی این اتصالات در یک برنامه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. در این رابطه روند انجام این تحقیق بصورت یک نمودار روند^۴ در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ - نمودار روند تحقیق و گام‌های انجام شده در این مطالعه

به منظور ارزیابی اثر استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی در اتصالات T-stub در تحقیق پیش رو سه نمونه آزمایشگاهی با مقیاس واقعی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در این نمونه‌های آزمایشگاهی تلاش شده است تا اثر استفاده از سخت‌کننده در مقطع سپری اتصال T-stub، و همچنین اثر ضخامت این سخت‌کننده‌ها بر رفتار لرزه‌ای این نوع از اتصال بررسی گردد. نتایج آزمایشات مورد ارزیابی قرار گرفته و پارامترهای لرزه‌ای لنگر نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری، و ظرفیت اتلاف انرژی محاسبه شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که با استفاده از سخت‌کننده‌های پیشنهادی عملکرد این اتصالات ارتقا یافته و همچنین ضخامت سخت‌کننده مورد استفاده عامل تاثیرگذاری بر ارتقای عملکرد اتصال می‌باشد.

۲- روش شناسی

۲-۱- برنامه آزمایشگاهی

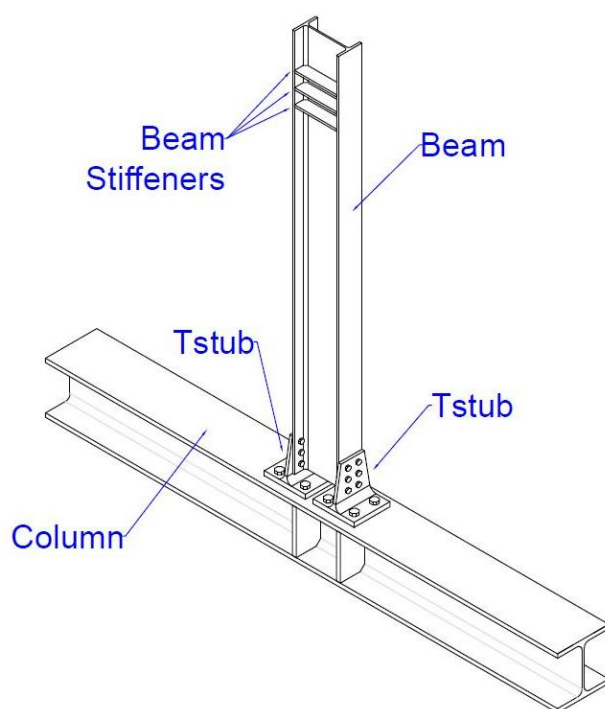
در تحقیق حاضر سه نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شده است. نمونه‌ی اول یک اتصال تیر به ستون توسط T-stub بوده که بر اساس آئین نامه ANSI/AISC 358-16 طراحی گردید [۹]. در این نمونه، برای تیر از مقطع پروفیل نورد شده IPE180 استفاده شده و برای ستون مقطع معادل IPB200 در نظر گرفته شده است. همچنین سپری اتصال T-stub با استفاده از بخشی از مقطع پروفیل نورد شده‌ی IPB240 ساخته شد. در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی مقاطع مورد استفاده در تیر، ستون و سپری T-stub همانند نمونه اول بوده و ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان است.

⁴ Flowchart

در این تحقیق هدف از برنامه آزمایشگاهی ارزیابی عملکرد اتصال T-stub دارای سخت‌کننده‌های فولادی در مقطع سپری T-stub بوده است. برای بررسی اثر این سخت‌کننده‌ها بر عملکرد اتصال T-stub، در نمونه‌های دوم و سوم آزمایشگاهی از سخت‌کننده‌هایی به ضخامت‌های ۸ میلیمتر و ۱۰ میلیمتر به ترتیب استفاده شده است.

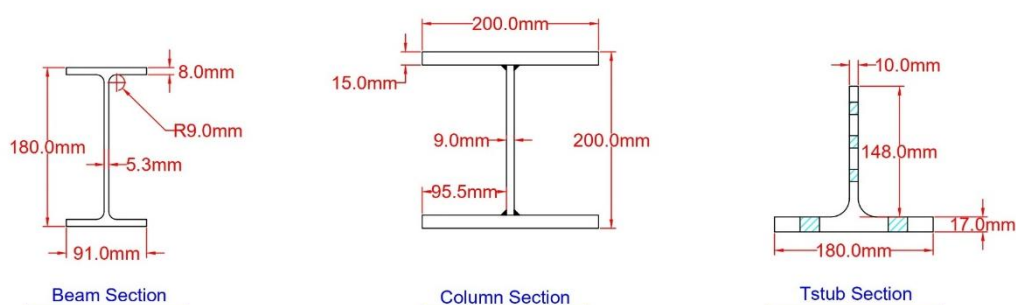
۲ - ۲ - جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

در برنامه آزمایشگاهی این تحقیق نمونه‌ها به گونه‌ای ساخته شدند که ستون در آن‌ها بصورت افقی و تیر به صورت عمودی قرار گیرد تا بتوان آن‌ها را در آزمایشگاه به سادگی نصب نمود. تصویر طرح واره نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۲ قابل مشاهده است.



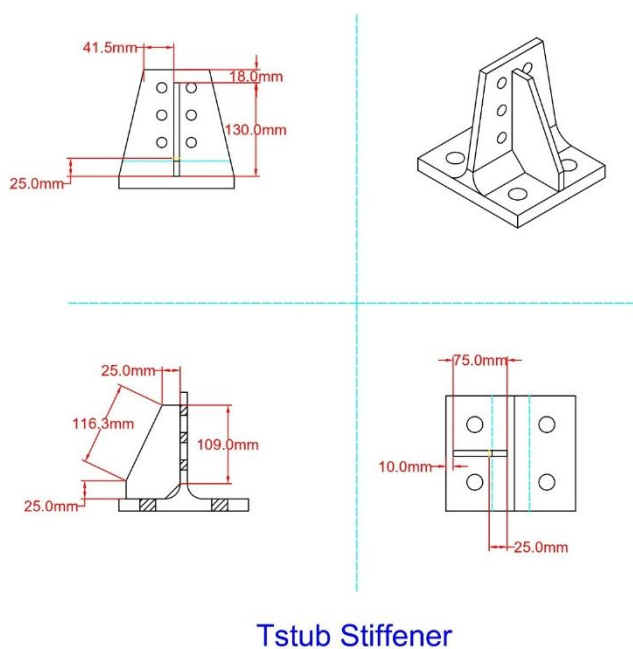
شکل ۲ - تصویر طرح‌واره از اتصال طراحی شده برای نمونه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق چیدمان آزمایش مشابه با تحقیقات معتبر قبلی انتخاب شد [۲۰-۲۲]. بنابراین در تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی طول تیر ۱/۵ متر و طول ستون ۲ متر در نظر گرفته شد. در دو انتهای ستون دو ورق انتهایی برای اتصال به تکیه گاه‌های نگهدارنده در آزمایشگاه اضافه شد. ضمناً در محل اتصال جک به تیر به علت اثرات تمرکز تنش از شش ورق سخت‌کننده به ضخامت ۸ میلیمتر استفاده شد. در راستای بال تیرها دو ورق پیوستگی به ضخامت ۱۵ میلیمتر و همچنین در محل چشمه اتصال از ورق مضاعف با ضخامت ۱۰ میلیمتر و با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر استفاده شد. مقطع پروفیل‌های ستون، تیر و سپری در شکل ۳ قابل مشاهده هستند.



شکل ۳ - مقاطع مورد استفاده برای ستون، تیر و سپری در نمونه‌های آزمایشگاهی

برای نمونه اول آزمایشگاهی از سپری نورد شده که بخشی از مقطع پروفیل IPB240 بوده استفاده گردید. در این نمونه از سخت‌کننده در سپری استفاده نشده و به عنوان نمونه شاهد (TF) مورد آزمایش قرار گرفت. در نمونه دوم آزمایشگاهی از یک سخت‌کننده با ضخامت ۸ میلیمتر در دو طرف سپری اتصال T-stub استفاده گردید. (TFS8) در نمونه سوم آزمایشگاهی نیز از سخت‌کننده با ضخامت ۱۰ میلیمتر در سپری‌های اتصال استفاده شده است. (TFS10) ابعاد و اندازه‌های سپری و محل قرارگیری آن‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴ - جزئیات و محل قرارگیری سخت‌کننده‌ها روی سپری‌های T-stub

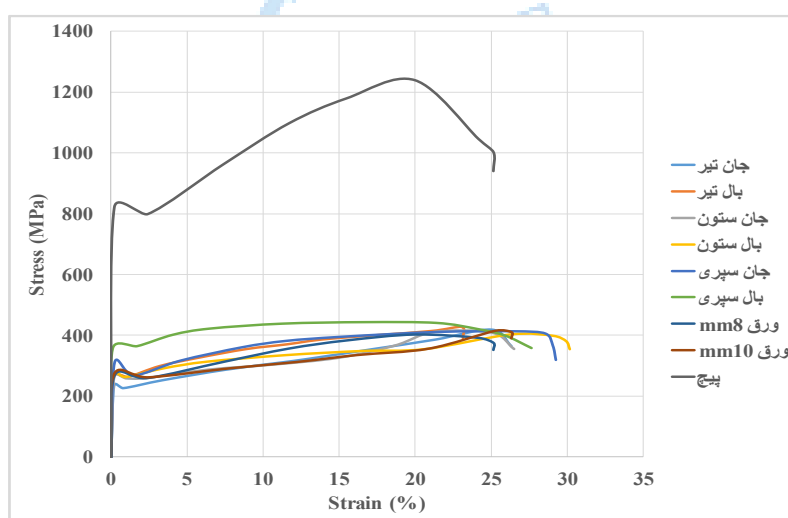
پیچ‌های مورد استفاده برای اتصال ستون به سپری به قطر ۲۰ میلی‌متر و از نوع پیچ‌های پر مقاومت ۱۰/۹ بوده‌اند که طبق طراحی برای هر سپری از ۴ پیچ برای اتصال هر سپری به ستون استفاده شد. در اتصال جان سپری به بال تیر نیز در هر طرف از ۶ پیچ ۱۰/۹ به قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده گردید.

۲-۳- مشخصات مصالح

در نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده در این تحقیق تلاش شد تا برای تمامی نمونه‌ها شرایط یکسانی از نظر استفاده از مصالح و نحوه اجرا در نظر گرفته شود. تمامی جوش‌های مورد استفاده برای اتصالات ورق انتهایی ستون، ورق‌های پیوستگی و ورق‌های مضاعف و همچنین سخت‌کننده‌های تیرها مورد آزمایش‌های غیر مخرب قرار گرفتند. برای اتصال ستون به تکیه‌گاه‌های آزمایشگاهی از ۸ عدد پیچ پر مقاومت ۸/۸ به قطر ۲۷ میلی‌متر استفاده شد. برای تعیین مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی از مصالح مصرفی نمونه‌های آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM/A370 آزمایش کشش استاندارد گرفته شد که نتایج این آزمایشات در جدول ۱ ارائه شده است [۲۷]. همچنین نتایج آزمایشات کشش بر روی نمونه‌های استخوانی مصالح مصرفی در آزمایشات در قالب نمودارهای تنش - کرنش در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۱ - مشخصات مصالح فولادی بر اساس آزمایش کشش استاندارد طبق ASTM/A370 [۲۷]

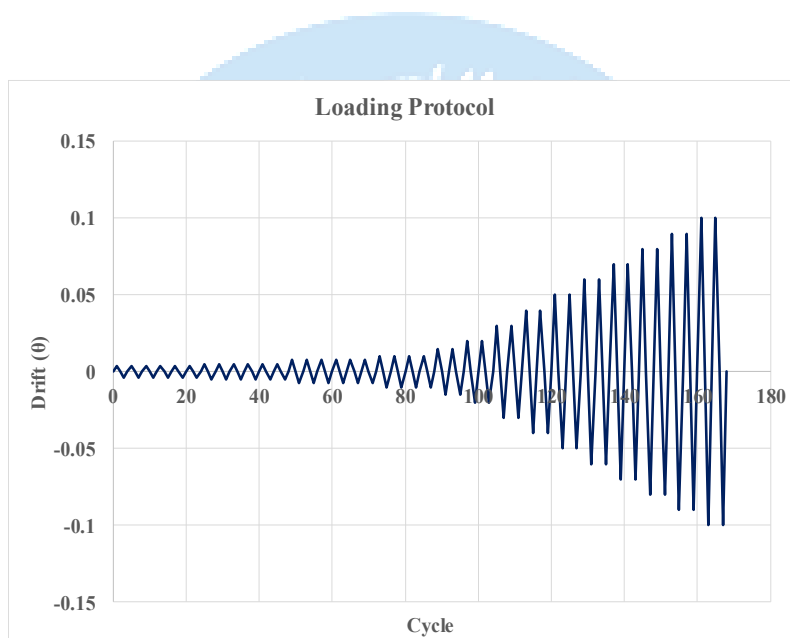
افزایش طول (%)	تنش نهایی (مگا پاسکال)	تنش تسلیم (مگا پاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	
۲۶/۲۵	۴۴۳/۴۰	۳۵۶/۸۷	۱۹۸/۱۷	بال سپری (۱۷ میلی‌متر)
۲۴/۱۲	۴۱۳/۹۸	۳۱۲/۱۰	۱۸۵/۲۰	جان سپری (۱۰ میلی‌متر)
۲۰/۱۲	۴۰۲/۷۱	۲۷۲/۶۱	۱۸۲/۱۰	بال ستون (۱۵ میلی‌متر)
۱۸/۰۷	۴۱۰/۷۷	۲۶۶/۱۵	۱۸۲/۴۲	جان ستون (۹ میلی‌متر)
۲۵/۷۲	۴۲۶/۸۱	۲۶۴/۹۲	۱۹۱/۶۰	بال تیر (۸ میلی‌متر)
۲۳/۵۱	۴۱۸/۶۹	۲۳۶/۴۲	۱۹۴/۲۱	جان تیر (۵.۳ میلی‌متر)
۱۹/۲۱	۳۹۲/۲۹	۲۶۷/۲۷	۱۷۶/۹۱	سخت‌کننده (۸ میلی‌متر)
۱۸/۱۸	۴۱۴/۸۱	۲۷۱/۵۲	۱۸۳/۹۰	سخت‌کننده (۱۰ میلی‌متر)



شکل ۵ - نمودارهای تنش - کرنش نتایج تست کشش مصالح مورد استفاده برای نمونه‌های آزمایشگاهی

۲-۴- پروتکل بارگذاری

تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شدند. در این آزمایشات بارگذاری به صورت شبه استاتیکی وارد شده و سرعت جک هیدرولیکی به قدری پایین در نظر گرفته شد تا از اثرات دینامیکی بارگذاری اجتناب گردد. بارگذاری بصورت چرخه‌ای و بر اساس آئین‌نامه ATC-24 که روش‌های بارگذاری آزمایشگاهی اتصالات فولادی در آن ارائه شده است به نمونه‌ها وارد شد [۲۸]. در این استاندارد بارگذاری، جابجایی‌های نسبی و تعداد تکرار بارگذاری‌های چرخه‌ای برای هر جابجایی نسبی بیان شده است. در این پروتکل جابجایی‌های نسبی $0/005$ ، $0/00375$ و $0/0075$ در شش سیکل بارگذاری به نمونه‌ها اعمال می‌شوند. پس از آن دررفت معادل $0/01$ در چهار سیکل و دررفت $0/015$ در دو سیکل به نمونه‌ها اعمال می‌گردد. پس از اعمال این دررفت‌ها و با وارد شدن به دررفت $0/02$ با هر دو سیکل بارگذاری، یک درصد به مقدار دررفت اضافه می‌شود. نمودار پروتکل بارگذاری بر اساس جابجایی‌های نسبی بر حسب رادیان و تعداد سیکل‌های بارگذاری در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶ - پروتکل بارگذاری نمونه‌ها در برنامه آزمایشگاهی [۲۸]

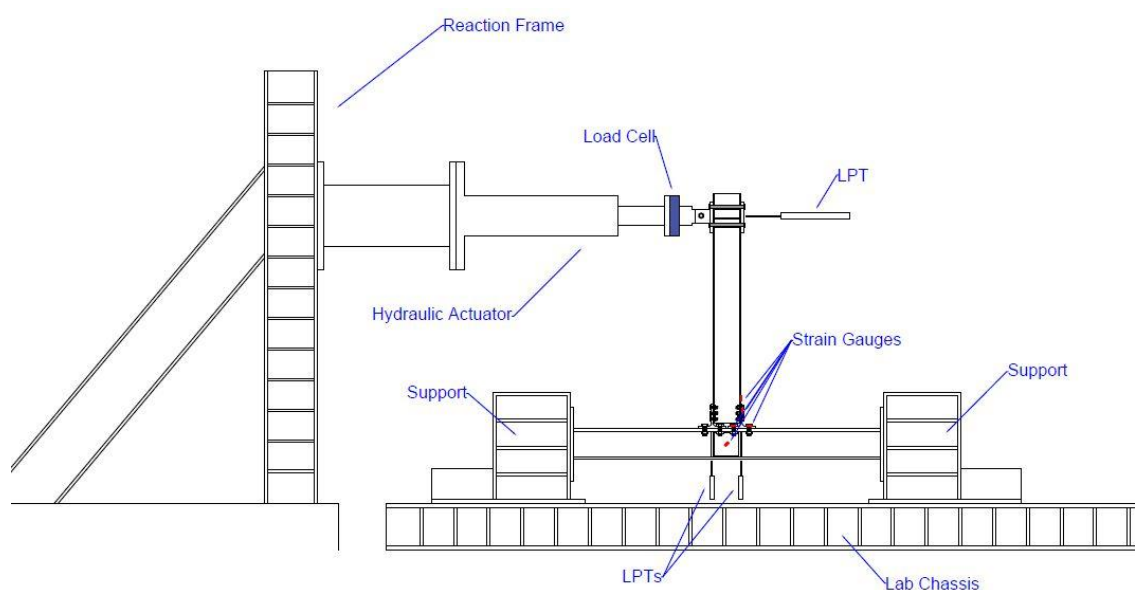
۲-۵- چیدمان آزمایش

اجرای آزمایشات در آزمایشگاه تحقیقاتی سازه دانشگاه آزاد واحد کرمانشاه انجام پذیرفت. برای اعمال بارگذاری به نمونه‌های آزمایشگاهی از یک جک هیدرولیکی با طول ۶۰۰ میلیمتر و ظرفیت بارگذاری ۱۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. همچنین برای ثبت نیرو در تست‌ها از یک لودسل^۶ با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و دقت ± 200 نیوتن بهره گرفته شد. برای ثبت جابجایی در راستای اعمال بارگذاری از یک پتانسیومتر خطی^۷ (LPT) با دقت $\pm 0/05$ میلیمتر استفاده شد. همچنین از دو پتانسیومتر خطی برای برداشت مقادیر دوران در محل چشمه اتصال استفاده شد که طول بازه اندازه‌گیری آن‌ها ۱۰۰ میلیمتر و ۵۰ میلیمتر بوده است. شکل ۷ نشان‌دهنده تصویر طرح‌واره از چیدمان آزمایش می‌باشد.

⁵ Drift

⁶ Load Cell

⁷ Linear Potentiometer Transducer



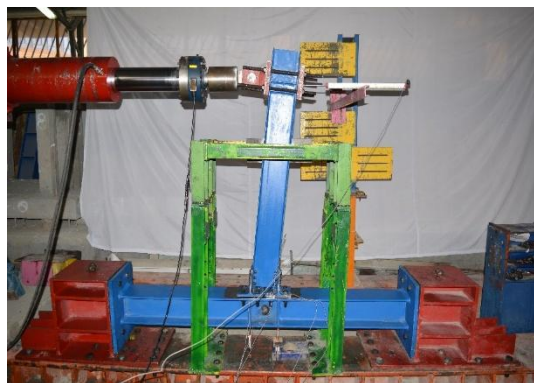
شکل ۷ - تصویر طرح‌واره چیدمان آزمایش

در هر نمونه از پنج کرنش سنج برای ارزیابی کرنش در محل‌های مختلف اتصال استفاده شد. کرنش سنجهای نوع YEFLA-5 بودند. یک کرنش سنج در محل چشمه اتصال، دو کرنش سنج روی بال سپری T-stub، یک کرنش سنج روی جان سپری و یک کرنش سنج روی بال تیر در نزدیکی اتصال پیچی تیر و سپری قرار گرفتند. محل تمامی کرنش سنجهای در آزمایشات یکسان بوده است. برای ثبت اطلاعات دستگاه‌های سنجش از یک دیتا لاگر^۸ ۲۸ کاناله استفاده شد. در تمامی آزمایشات قبل از شروع آزمایش تمامی پیچ‌های اتصال و تکیه گاه‌ها پیش تنیده شدند.

۲-۶- شرح آزمایشات

نمونه شاهد (TF) با شروع بارگذاری تا جابجایی معادل دریافت ۱٪ بصورت خطی عمل کرده و در ازای افزایش مقادیر جابجایی، نیرو بصورت نسبتاً خطی افزایش داشت. با ادامه‌ی بارگذاری نرخ افزایش نیرو افت داشته و عملاً اتصال وارد فاز غیر خطی گردید. تا رسیدن به جابجایی معادل دریافت ۶٪ تغییر فرم هندسی مشهودی در هیچکدام از اجزای سامانه بوجود نیامد. با ادامه بارگذاری تغییر شکل مشخصی در محل بال تیر بالاتر از محدوده اتصال به جان سپری ایجاد گردید. با رسیدن به جابجایی معادل دریافت ۸٪ آزمایش متوقف شده و لنگر نهایی ۶۵/۱۲ کیلونیوتون - متر برای این نمونه ثبت گردید. تصاویر این آزمایش در شکل ۸ قابل مشاهده است.

⁸ Data Logger



(ب)



(الف)

شکل ۸ - نمونه آزمایشگاهی شاهد (TF) تغییر فرم محسوس بال تیر در محل اتصال به سپری در دررفت ۶٪ (ب) نمونه در دررفت ۸٪

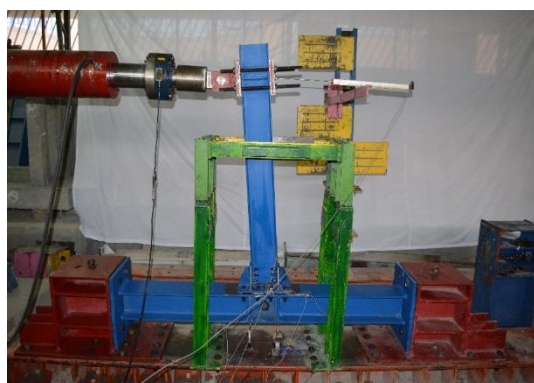
نمونه دوم (TFS8) دارای دو سخت‌کننده در طرفین سپری T-stub به ضخامت ۸ میلیمتر بوده است. در این آزمایش اثر استفاده از سخت‌کننده‌ها نسبت به نمونه اول نشان داده شد. در این آزمایش مقاومت نمونه در دررفت‌های مختلف نسبت به نمونه TF بیشتر بود. نمونه تا جابجایی معادل دررفت ۱٪ بصورت خطی عمل کرده و تغییر شکلی در آن ایجاد نگردید. با افزایش مقادیر جابجایی و رسیدن به جابجایی معادل دررفت ۴٪ رنگ در ناحیه جان تیر پوسته شده که نشان‌دهنده‌ی شروع کمناش موضعی در جان تیر بوده است. با رسیدن به دررفت ۵٪ تغییر شکل‌های کوچکی در بال تیر ایجاد شده و کمناش در این ناحیه شروع گردید. این تغییر شکل‌ها نشان‌دهنده‌ی اثر مطلوب استفاده از سخت‌کننده‌ها و دور شدن مفصل پلاستیک از محل اتصال می‌باشد. با رسیدن به جابجایی معادل دررفت ۸٪ لنگر نهایی ۷۰/۸۸ کیلو نیوتن - متر ثبت شده و آزمایش متوقف گردید. شکل ۹ نشان‌دهنده‌ی مراحل آزمایش است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۹ - نمونه آزمایشگاهی دوم (TFS8) الف) ابتدای آزمایش ب) شروع کمانش موضعی در جان تیر در دررفت ۴٪ ج) شروع کمانش موضعی در بال تیر در دررفت ۵٪ د) پایان آزمایش در دررفت ۸٪

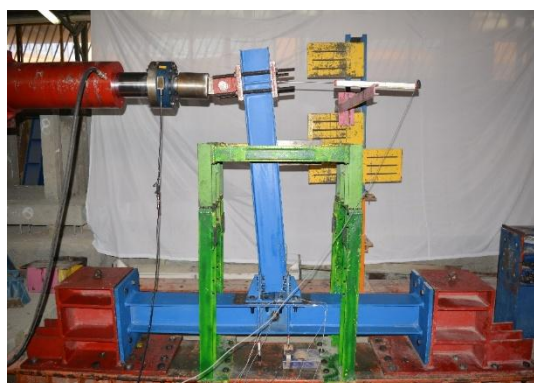
با افزودن سخت کننده‌های ۱۰ میلی‌متر به طرفین سپری، نمونه سوم (TFS10) مورد آزمایش قرار گرفت. افزایش مقاومت در هر دررفت نسبت به نمونه TFS8 نشان‌دهنده‌ی اثر ضخامت سخت کننده بر روی عملکرد سامانه است. همانند دیگر نمونه‌ها با شروع بارگذاری تا جابجایی معادل دررفت ۱٪ رفتار نمونه خطی بوده است. با ادامه بارگذاری بر خلاف نمونه TF و مشابه نمونه TFS8 تغییر فرم مشهودی در سپری‌ها ایجاد نگردید. در این نمونه با رسیدن به جابجایی معادل دررفت ۶٪ کمانش موضعی در محل بال تیر بالاتر از اتصال سپری T-stub شروع شده و همچنین رنگ در ناحیه جان تیر پوسته شد. کمانش موضعی در بال تیر با رسیدن به دررفت ۷٪ بطور کامل رخ داده و در دررفت ۸٪ بیشتر شد. این تغییر فرم در بال و جان تیر در نمونه TFS10 نسبت به نمونه TFS8 در دررفت بالاتری رخ داده و بارزتر بوده است (شکل ۱۰). لنگر نهایی این نمونه نیز از نمونه TFS8 بالاتر بوده و در جابجایی معادل دررفت ۸٪ برابر با ۷۴/۱۴ کیلو نیوتون - متر قرائت شده است.



(ب)



(الف)



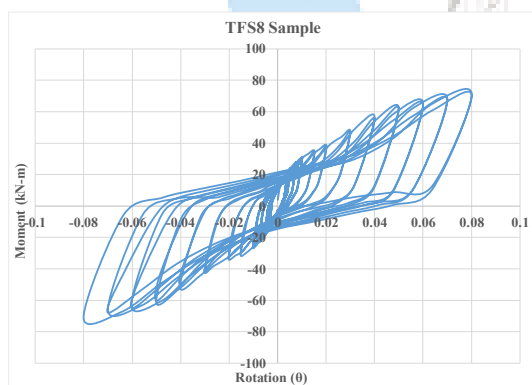
(د)



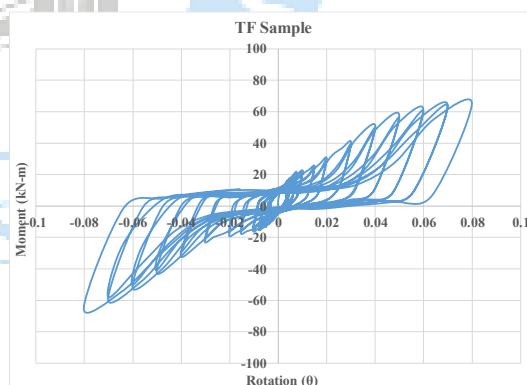
(ج)

شکل ۱۰ - نمونه آزمایشگاهی (TFS10) الف) شروع کمانش در بال و جان تیر در دریفت ۶٪ ب) کمانش موضعی مشهود در بال تیر در دریفت ۷٪ ج) افزایش کمانش موضعی در بال و جان تیر در دریفت ۸٪ د) پایان آزمایش در دریفت ۸٪

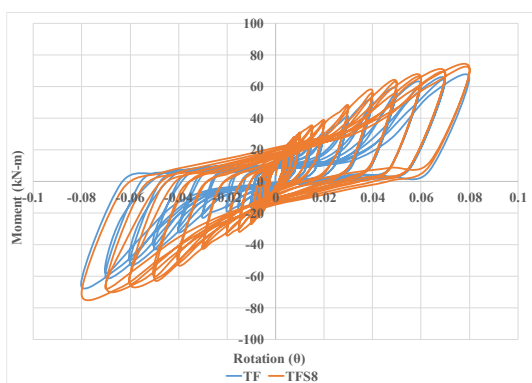
نتایج آزمایشات در قالب نمودارهای چرخه‌ای لنگر - دوران بدست آمده‌اند که در شکل ۱۱ برای هر سه نمونه ارائه شده‌اند. همچنین نمودارهای مقایسه‌ای برای نمونه‌های دارای سخت‌کننده با نمونه شاهد در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که با نگاهی اجمالی به این نمودارها قابل استنباط است می‌توان به این نتیجه رسید که با افزودن سخت‌کننده به اتصال T-stub لنگر نهایی و بطور کلی لنگر در دریفت‌های مختلف به صورت مشهودی افزایش داشته است. نتایج آزمایشات نشان داده است که استفاده از سخت‌کننده در سپری اتصال می‌تواند ظرفیت باربری اتصال را بالاتر برده و محل مفصل پلاستیک را به خارج از ناحیه اتصال انتقال دهد. این مسأله با ایجاد کمانش موضعی در بال تیر در نمونه‌های TFS8 و TFS10 قابل مشاهده است همچنین نتایج کرنش سنج‌ها در نمونه‌های آزمایشگاهی تأییدکننده‌ی این موضوع می‌باشند. به جهت ارزیابی دقیق اثر سخت‌کننده‌های پیشنهادی پارامترهای لرزه‌ای محاسبه و ارزیابی خواهند شد.



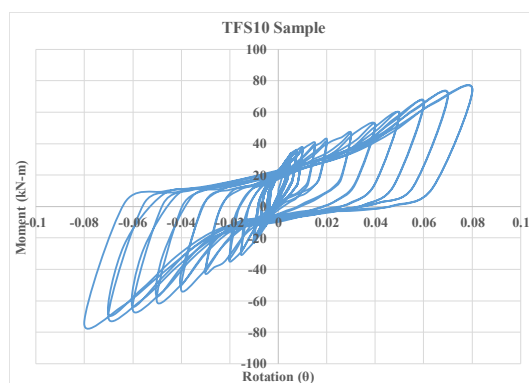
(ب)



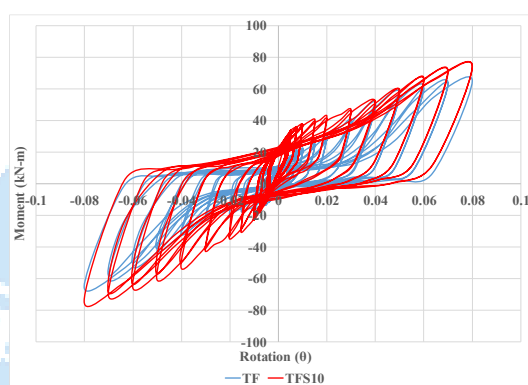
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

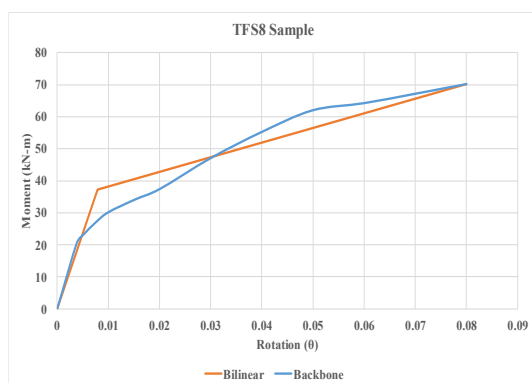
شکل ۱۱ - نمودارهای چرخه‌ای آزمایشات الف) TF ب) TFS8 ج) TFS10 د) مقایسه نمونه‌های TF و TFS8 ه) مقایسه نمونه‌های TF و TFS10

۳- نتایج و بررسی آن‌ها

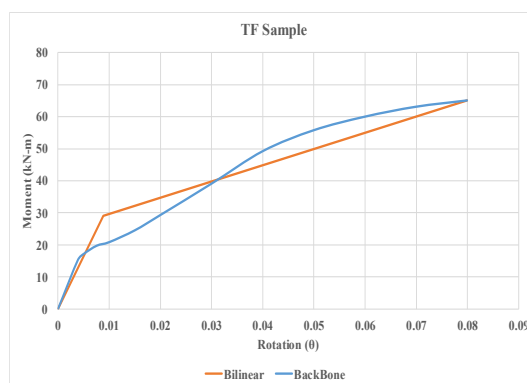
۳-۱- محاسبه پارامترهای لرزه‌ای

با انجام تست‌های آزمایشگاهی نمودارهای چرخه‌ای لنگر-دوران بدست آمدند. برای ارزیابی دقیق نتایج می‌بایست با استفاده از دستورالعمل‌های آئین نامه‌ای پارامترهای لرزه‌ای را از نمودار چرخه‌ای برای هر آزمایش استخراج کرد. پارامترهای لرزه‌ای مورد بررسی در این تحقیق شامل لنگر نهایی، سختی، شکل‌پذیری، و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی بوده است. برای بدست آوردن نقطه تسلیم نمودار و محاسبه این پارامترها لازم است تا نمودار استخوانی بر اساس نمودارهای چرخه‌ای بدست آمده و برای هر نمودار استخوانی یک نمودار دو خطی معادل ترسیم گردد.

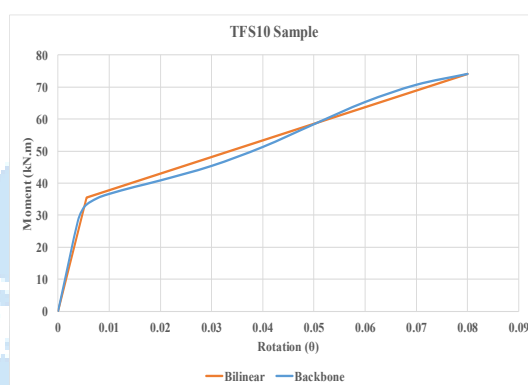
نمودار استخوانی از تعیین کمترین لنگر بیشینه در هر دریافت از بارگذاری بدست می‌آید. نمودار دو خطی معادل نیز بر اساس دستورالعمل آئین نامه FEMA440 [۲۹] و بر اساس اصل هم ارزی انرژی بدست می‌آید. در تصویر ۱۲ نمودارهای استخوانی و دوخطی معادل برای سه نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲ - نمودارهای دوخطی معادل برای نمونه‌های آزمایشگاهی (الف) TF (ب) TFS8 (ج) TFS10

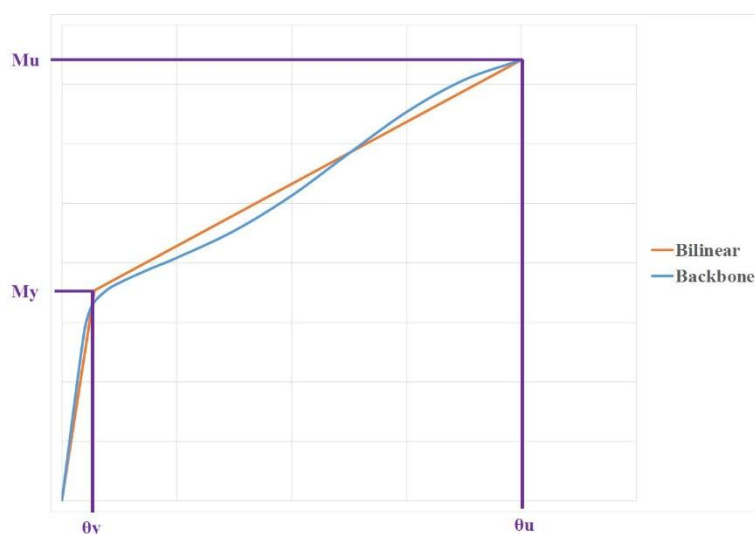
۳-۲ - پارامترهای لرزه‌ای در نمونه‌های آزمایشگاهی

بر اساس نمودارهای چرخه‌ای و نمودارهای دوخطی معادل بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی پارامترهای لرزه‌ای محاسبه شدند. در این محاسبات که بر اساس استاندارد FEMA 356 انجام گرفته است نمودار دوخطی معادل بر اساس دستورالعمل‌های بیان شده و اصل هم ارزی انرژی تعیین شده و با تعیین نقطه تسلیم منجر به تعیین پارامترهای سختی موثر و شکل پذیری می‌گردد [۳۰]. شکل ۱۳ تصویر طرح‌واره‌ای بر اساس نمودار دوخطی معادل برای نمونه TFS10 را نشان می‌دهد. در این تصویر لنگر نقطه تسلیم با M_y و لنگر نهایی نمودار استخوانی با M_u نشان داده شده است. همچنین دوران نقطه تسلیم با θ_y و دوران نقطه نهایی با θ_u نشان داده شده است. بر اساس این پارامترها سختی موثر و شکل پذیری به ترتیب بر اساس روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند:

$$K_e = \frac{M_y}{\theta_y} \quad (1-1)$$

$$\mu = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (2-1)$$

لنگر نهایی بالاترین لنگری است که در تست آزمایشگاهی برای هر نمونه در نمودار چرخه‌ای به ثبت رسیده است. ظرفیت اتلاف انرژی نیز بر اساس محاسبه مساحت سطح زیر نمودار چرخه‌ای بدست می‌آید. جدول ۲ مقادیر پارامترهای لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ - تصویر طرح‌واره نحوه ترسیم نمودار دوخطی معادل و پارامترهای لنگر و دوران تسلیم و نهایی

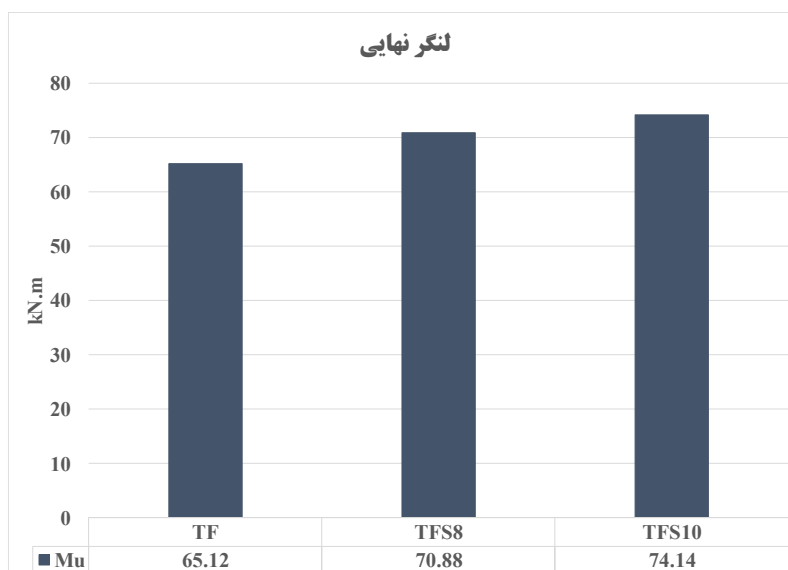
جدول ۲ - پارامترهای لرزه‌ای بدست آمده برای نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه	لنگر نهایی (کیلو نیوتن متر)	سختی مؤثر (کیلو نیوتن متر بر متر)	شکل پذیری	ظرفیت اتلاف انرژی (کیلو نیوتن در متر)
TF	۶۵/۱۲	۳۲۹۲/۱۹	۹/۰۵	۲۸/۰۴
TFS8	۷۰/۸۸	۴۷۴۲/۳۳	۱۰/۱۸	۴۳/۳۳
TFS10	۷۴/۱۴	۶۳۱۷/۶۳	۱۴/۲۷	۴۶/۹۲

همانطور که از اعداد جدول ۲ قابل استنباط است، استفاده از سخت‌کننده در مقطع سپری اتصال T-stub توانسته است پارامترهای لرزه‌ای در اتصال را ارتقا دهد. با اضافه شدن سخت‌کننده به اتصال T-stub لنگر نهایی، سختی و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی بصورت مشهودی افزایش داشته‌اند. پارامتر شکل‌پذیری نیز با افزودن سخت‌کننده به اتصال افزایش چشمگیری داشته است. در ادامه تفسیر دقیق‌تری از نتایج آزمایشات درباره پارامترهای لرزه‌ای مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱ - مقاومت خمشی نهایی

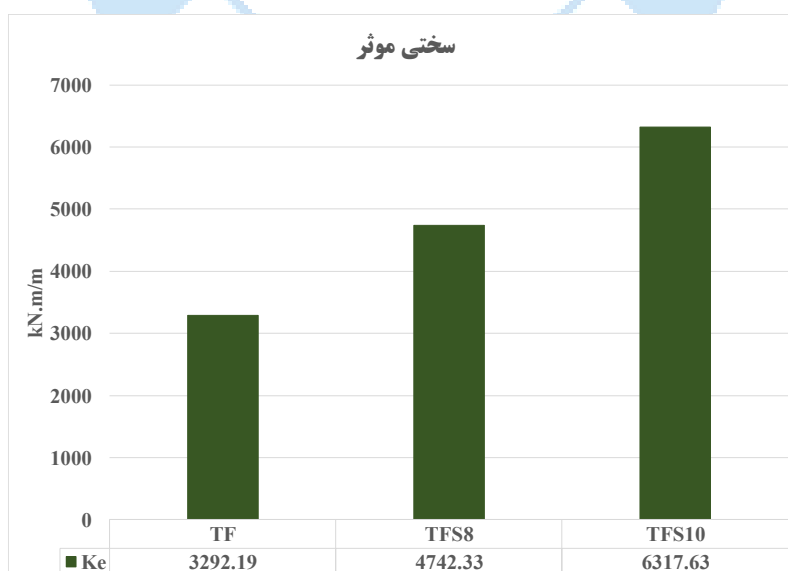
اثر استفاده از سخت‌کننده‌ها بر پارامتر لنگر نهایی در شکل ۱۴ بصورت یک نمودار میله‌ای نشان داده شده است. همانطور که نمودار بیانگر می‌باشد، استفاده از سخت‌کننده‌های پیشنهادی در نمونه‌های آزمایشگاهی باعث افزایش مقادیر لنگر نهایی گردیده است. اعداد لنگر نهایی نشان می‌دهد که استفاده از ورق سخت‌کننده ۸ میلیمتری باعث افزایش لنگر نهایی در حدود ۹٪ نسبت به نمونه شاهد (TF) شده است. این در حالی است که اضافه کردن ضخامت سخت‌کننده به ۱۰ میلیمتر باعث افزایش لنگر نسبت به نمونه شاهد به مقدار ۱۳/۸٪ شده است. بنابراین بکار بردن سخت‌کننده‌ها در اتصال T-stub می‌تواند باعث افزایش مقاومت خمشی نهایی گردد و نتایج نمونه‌های دارای سخت‌کننده بطور مشخصی نشان‌دهنده اثر تعیین‌کننده‌ی ضخامت سخت‌کننده‌ها در این اتصال می‌باشد.



شکل ۱۴ - نمودار میله‌ای لنگر نهایی برای نمونه‌های آزمایشگاهی

۳-۲-۲- سختی مؤثر

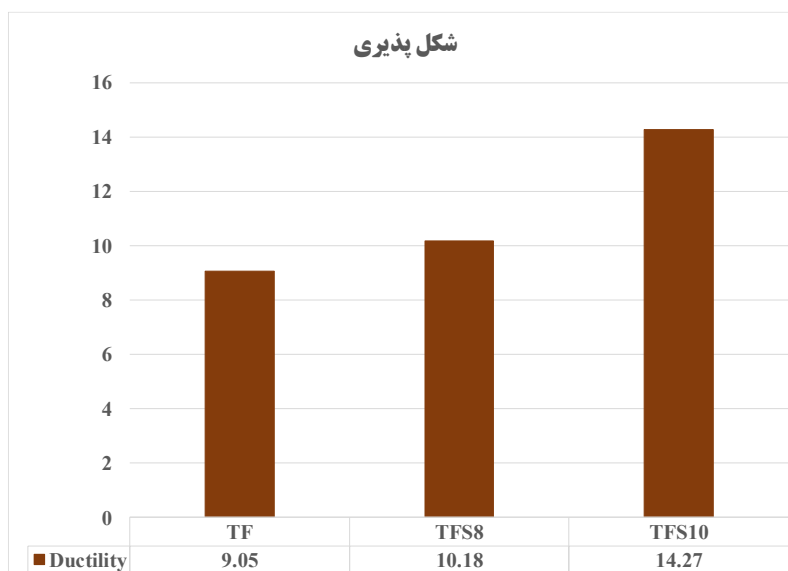
سختی مؤثر در نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از مقادیر لنگر - دوران در محدوده خطی نمودار دوخطی معادل بدست آمده است. سختی مؤثر در نمونه‌های دارای سخت‌کننده بصورت قابل توجهی نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. اضافه کردن سخت‌کننده ۸ میلیمتر و ۱۰ میلیمتر سختی مؤثر را به نسبت نمونه شاهد به ترتیب ۴۴٪ و ۹۲٪ افزایش داده است. این افزایش مقادیر سختی می‌تواند نشان‌دهنده‌ی افزایش صلبیت در سامانه اتصال به واسطه حضور سخت‌کننده‌ها در محل سپری بوده باشد. بنابراین ضخامت سخت‌کننده را باید به گونه‌ای تعیین نمود که سختی مؤثر اتصال دارای سپری غیر نورد شده به حد قابل قبول آئین نامه‌ای برسد. شکل ۱۵ نشان‌دهنده‌ی نمودار میله‌ای مقایسه‌ای برای پارامتر سختی در نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۱۵ - نمودار میله‌ای سختی مؤثر برای نمونه‌های آزمایشگاهی

۳-۲-۳- شکل پذیری

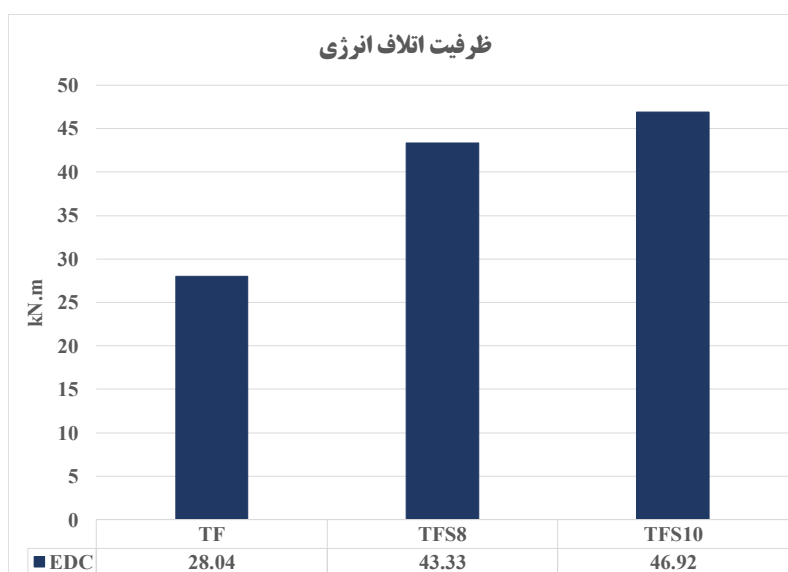
شکل پذیری از نسبت دوران معادل لنگر نهایی به دوران نقطه تسلیم در نمودار دوخطی معادل قابل تعریف است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در نمونه TFS8 شکل پذیری به مقدار ۱۲٪ و در نمونه TFS10 این پارامتر به مقدار ۵۸٪ افزایش داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده‌های پیشنهادی نه تنها مقاومت و سختی نمونه‌های آزمایشگاهی را افزایش داده است بلکه تأثیر قابل توجهی بر شکل پذیری نمونه‌ها نیز گذاشته است. مقادیر افزایش شکل پذیری در نمونه‌های TFS8 و TFS10 نشان می‌دهد که ضخامت سخت‌کننده در افزایش شکل پذیری پارامتر تأثیرگذاری است. شکل ۱۶ نشان‌دهنده نمودار میله‌ای پارامتر شکل پذیری برای نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۱۶ - نمودار میله‌ای شکل پذیری برای نمونه‌های آزمایشگاهی

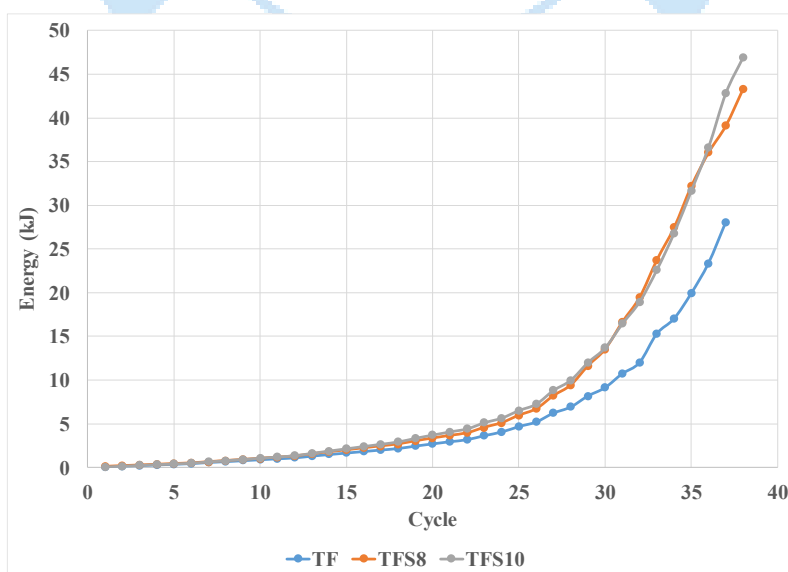
۳-۲-۴ - ظرفیت اتلاف انرژی

ظرفیت اتلاف انرژی در نمونه شاهد (TF) برابر با ۲۸/۰۴ کیلونیوتن - متر بدست آمده است. این مقدار ظرفیت اتلاف انرژی جمعی برای این نمونه تا دریفت ۸٪ بوده است. در نمونه‌های TFS8 و TFS10 مقادیر اتلاف انرژی با توجه به افزایش لنگر در این نمونه‌ها به ترتیب ۵۴٪ و ۶۷٪ نسبت به نمونه TF رشد داشته‌اند. با توجه به اینکه مساحت حلقه‌های بارگذاری چرخه‌ای بطور مستقیمی تأثیر گرفته از افزایش مقاومت و سختی سازه می‌باشد، افزایش ظرفیت اتلاف انرژی در نمونه‌های دارای سخت‌کننده با توجه به ارتقای سختی مؤثر و لنگر نهایی در آن‌ها دور از انتظار نبوده است. شکل ۱۷ نمودار میله‌ای مقادیر ظرفیت اتلاف انرژی را نشان داده است.



شکل ۱۷ - نمودار میله‌ای ظرفیت اتلاف انرژی برای نمونه‌های آزمایشگاهی

شکل ۱۸ نشان‌دهنده نمودار مقایسه‌ای ظرفیت اتلاف انرژی تجمعی برای نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در این نمودار می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌های آزمایشگاهی TFS8 و TFS10 با استفاده از سخت‌کننده توانسته‌اند بطور کلی با افزایش مقادیر بارگذاری مقادیر بیشتری از انرژی را جذب کنند. این نمودار بر اساس مساحت حلقه‌های بارگذاری در سیکل‌های مختلف بارگذاری می‌باشد. با توجه به پروتکل بارگذاری جابجایی نسبی ۱٪ از سیکل ۲۴ام به بعد به اتصال اعمال می‌گردد. نمودار اتلاف انرژی تجمعی نیز نشان‌دهنده این موضوع است که با افزایش دوران بیش از ۱٪ اتصالات دارای سخت‌کننده توانسته‌اند مقادیر قابل توجهی از انرژی را نسبت به نمونه شاهد جذب کنند.

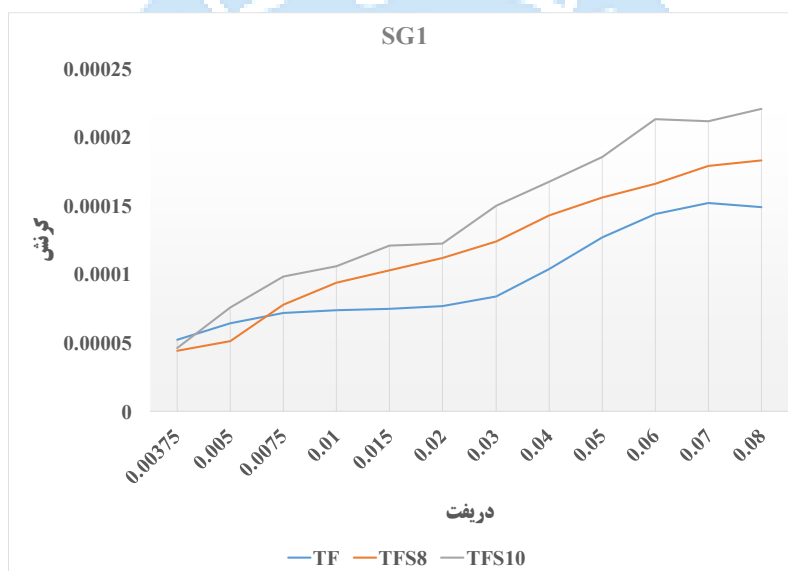


شکل ۱۸ - نمودار ظرفیت اتلاف انرژی تجمعی برای نمونه‌های آزمایشگاهی

۳-۳ - مقایسه کرنش در نمونه‌های مختلف

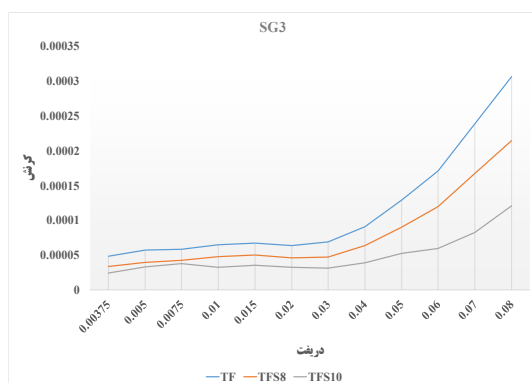
به منظور مقایسه کرنش در نواحی مختلف اتصال T-stub در نمونه‌های مختلف، در هر نمونه آزمایشگاهی پنج کرنش سنج مورد استفاده قرار گرفت. در تمامی نمونه‌ها کرنش سنج اول (SG1) در چشمه اتصال ستون با زاویه ۴۵ درجه نصب گردید. کرنش سنج دوم (SG2) و سوم (SG3) بر روی بال سپری T-stub به ترتیب در قسمت داخلی و خارجی اتصال نصب شدند. کرنش سنج چهارم (SG4) بر روی جان سپری و کرنش سنج پنجم (SG5) بر روی بال تیر در فاصله ۵۰ میلی‌متر از سپری اتصال نصب گردید.

نتایج مقادیر قدر مطلق کرنش در دررفت‌های مختلف در کرنش سنج SG1 نشان‌دهنده‌ی این موضوع هستند که با افزودن سخت‌کننده به نمونه‌های آزمایشگاهی مقادیر کرنش در چشمه اتصال نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. افزایش ضخامت سخت‌کننده در نمونه TFS10 نسبت به نمونه TFS8 کرنش را در چشمه اتصال افزایش داده است. از این بحث می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سخت‌کننده در کل باعث افزایش کرنش در چشمه اتصال می‌شود و ضخامت بیشتر سخت‌کننده باعث افزایش کرنش در این ناحیه می‌گردد. نتایج شکل ۱۹ نشان می‌دهد که حداکثر کرنش ثبت شده نیز نسبتاً از کرنش تسلیم کمتر است. بنابراین افزایش کرنش در چشمه اتصال تغییری را در طراحی چشمه اتصال ایجاد نخواهد کرد.

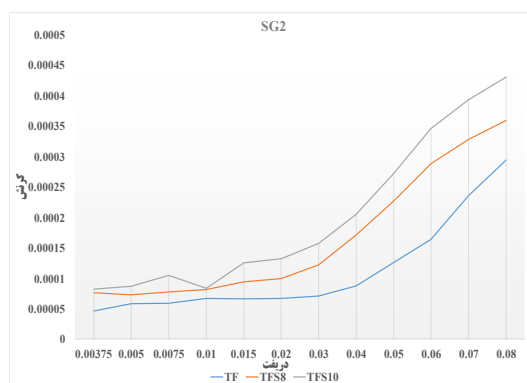


شکل ۱۹ - نمودار کرنش در چشمه اتصال برای نمونه‌های آزمایشگاهی

دو کرنش سنج SG2 و SG3 بر روی بال T-stub نصب شده بودند که شکل ۲۰ نمودار مقایسه‌ای این دو کرنش سنج را برای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مقایسه نتایج کرنش در SG2 نشان می‌دهد که با اضافه کردن سخت‌کننده کرنش کمی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. در بال خارجی سپری (SG3) نتایج متفاوت است. اضافه کردن سخت‌کننده باعث کاهش تغییر شکل سپری شده و کرنش را در ناحیه SG3 کاهش داده است.



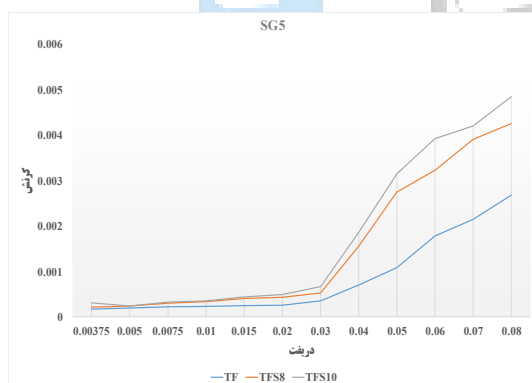
(ب)



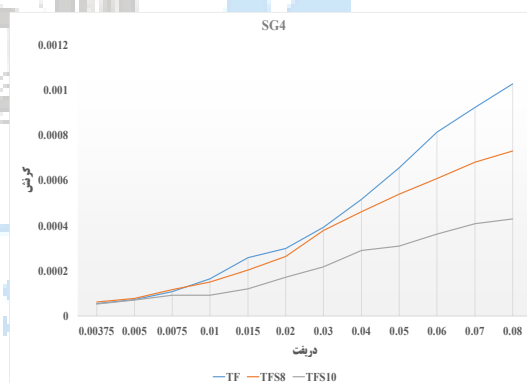
(الف)

شکل ۲۰ - کرنش در نمونه‌های آزمایشگاهی الف) بال داخلی سپری ب) بال خارجی سپری

با اضافه کردن سخت‌کننده تغییر شکل جان سپری کاهش یافته است و کرنش در SG4 کم شده است. کرنش در بال تیر ارتباط مستقیمی با مقاومت خمشی نهایی نمونه دارد. به عبارتی با افزایش مقاومت خمشی نهایی نمونه کرنش در SG5 بیشتر می‌شود. وجود سخت‌کننده‌ها باعث افزایش مقاومت خمشی اتصال و طبعاً افزایش کرنش در بال تیر خواهد شد. نتایج مقادیر کرنش سنج‌ها بخوبی نشان می‌دهند که با اضافه کردن سخت‌کننده‌ها به سپری‌های اتصال و افزایش ضخامت آن‌ها، تغییر شکل‌ها در اتصال و اجزای آن کمتر شده و در تیر افزایش یافته است. شکل ۲۱ نشان‌دهنده نمودارهای مقایسه‌ای برای مقادیر ثبت شده در کرنش سنج‌های SG4 و SG5 است.



(ب)

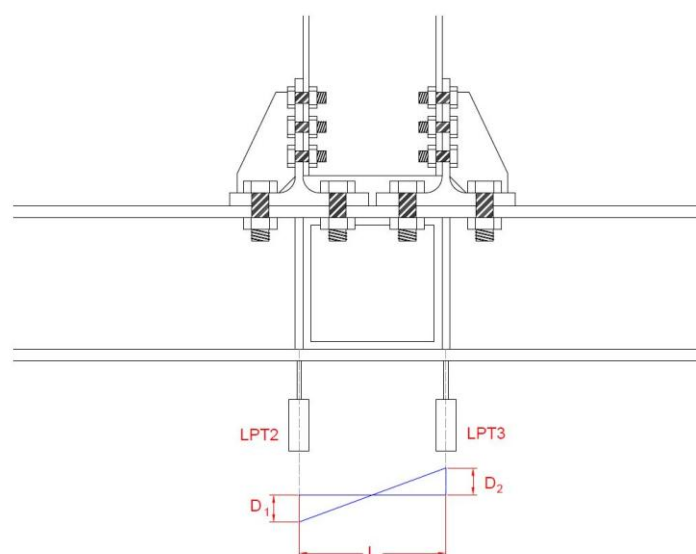


(الف)

شکل ۲۱ - کرنش در نمونه‌های آزمایشگاهی الف) جان سپری ب) بال تیر

۳-۴ - دوران در چشمه اتصال

در انجام آزمایشات این تحقیق دو پتانسیومتر خطی (LPT) در راستای ورق‌های پیوستگی ستون قرار داده شدند تا با استفاده از نتایج این دستگاه‌ها دوران در چشمه اتصال مورد بررسی قرار بگیرد. با استفاده از نتایج بدست آمده از این ابزارها و از تقسیم قدر مطلق تفاضل آن‌ها بر طول چشمه اتصال می‌توان دوران در چشمه اتصال در نمونه‌های آزمایشگاهی را محاسبه نمود. شکل ۲۲ نشان‌دهنده موقعیت قرارگیری ابزار اندازه‌گیری و محاسبه دوران بر اساس جابجایی در نقاط انتهایی چشمه اتصال می‌باشد.



شکل ۲۲ - شکل طرح واره محل قرارگیری LPT ها در چشمه اتصال

بر اساس نتایج آزمایشگاهی و اعداد ثبت شده توسط LPT2 و LPT3 نصب شده در طرفین چشمه اتصال مقادیر بیشینه مطلق دوران برای نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف در جدول ۳ آورده شده است. این مقادیر طبق رابطه (۳) بدست آمده است که در این آزمایشات مقدار L برابر با ۱۹۰ میلی‌متر بوده است.

$$\theta = \frac{|D_2 - D_1|}{L} \quad (۳-۱)$$

جدول ۳ - مقادیر دوران در چشمه اتصال برای نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه آزمایشگاهی	TF	TFS8	TFS10
دوران (رادیان)	۰/۰۰۰۲۶۶	۰/۰۰۰۳۳۵	۰/۰۰۰۴۱۴

همانطور که نتایج آزمایشگاهی برای دوران در چشمه اتصال نشان می‌دهند، بالاترین دوران در چشمه اتصال مربوط به نمونه TFS10 می‌باشد و کمترین دوران در چشمه اتصال به نمونه TF مربوط می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که با افزایش مقاومت خمشی نهایی اتصال میزان دوران منتقل شده به ستون افزایش یافته است. بنابراین اضافه نمودن سخت‌کننده دوران در چشمه اتصال را افزایش می‌دهد اما همانطور که در بخش ۳-۳ مشاهده شده است کرنش در چشمه اتصال حتی با اضافه شدن سخت‌کننده در T-stub به حد تسلیم نرسیده و با حد تسلیم فاصله زیادی دارد. بنابراین می‌توان بیان داشت که اضافه کردن سخت‌کننده به اتصال T-stub مشکلی در چشمه اتصال ایجاد نمی‌کند.

۴ - نتیجه‌گیری

اتصالات پیچ و مهره‌ای در سازه‌های فولادی انواع مختلفی دارند که اتصالات T-stub با توجه به عدم استفاده از جوشکاری و سهولت در نصب یکی از مهمترین اتصالات از پیش تأیید شده در آئین‌نامه‌های طراحی محسوب می‌شود. در تحقیق پیش رو تلاش شد تا با ارائه جزئیاتی از اتصال T-stub که دارای سخت‌کننده است، عملکرد این سامانه اتصال بهبود یافته و راهکاری برای ارتقا رفتار لرزه‌ای این

اتصالات ارائه گردد. در این راستا سه نمونه آزمایشگاهی با مقیاس کامل از اتصالات T-stub ساخته و تحت بارگذاری قرار گرفتند. یک نمونه بعنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد (TF) که طبق ضوابط آئین نامه ANSI/AISC 358-16 طراحی گردید. در دو نمونه بعدی از سخت کننده‌هایی در مقطع سپری اتصال به ضخامت‌های ۸ میلیمتر برای (TFS8) و ۱۰ میلیمتر برای (TFS10) استفاده شد.

نتایج آزمایشات بطور کلی نشان دادند که استفاده از سخت کننده‌های پیشنهادی می‌تواند پارامترهای لرزه‌ای مقاومت خمشی نهایی، سختی مؤثر، شکل پذیری، و ظرفیت اتلاف انرژی را در این اتصالات افزایش دهند. همچنین مقایسه نمونه‌های دارای ضخامت مختلف سخت کننده نشان داد که ضخامت در ورق سخت کننده یکی از پارامترهای مهم برای تعیین رفتار دقیق این جزئیات از اتصال می‌باشد. در نمونه‌های آزمایشگاهی دارای سخت کننده مقاومت خمشی نهایی ۹٪ و ۱۳/۸٪ (برای ضخامت ۸ میلیمتر و ۱۰ میلیمتر) افزایش داشت. سختی مؤثر با اضافه کردن سخت کننده ۸ میلیمتر و ۱۰ میلیمتر به ترتیب ۴۴٪ و ۹۲٪ رشد داشته و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی به ترتیب ۵۴٪ و ۶۷٪ افزایش داشت. پارامتر شکل پذیری نیز ۱۲٪ و ۵۸٪ برای ضخامت ۸ میلیمتر و ۱۰ میلیمتر افزایش داشته است. این نتایج نشان دهنده این موضوع هستند که در اتصالات T-stub دارای سپری نورد شده استفاده از سخت کننده‌های پیشنهادی می‌تواند باعث افزایش و بهبود پارامترهای لرزه‌ای گردد. بطور کلی نتایج این تحقیق می‌تواند در موارد زیر خلاصه گردد:

- ۱) استفاده از سخت کننده در اتصال T-stub باعث افزایش مقاومت، سختی، شکل پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی می‌گردد.
- ۲) سخت کننده کرنش در چشمه اتصال را افزایش می‌دهد اما این افزایش به مقداری نیست که چشمه اتصال به مرز تسلیم برسد. بنابراین استفاده از ورق مضاعف طبق ضوابط آئین نامه‌ای کفایت می‌کند.
- ۳) استفاده از سخت کننده هیچ مشکلی برای پیچ‌ها ایجاد نکرده و شکست در پیچ‌ها در طول آزمایش مشاهده نشد.
- ۴) نتایج نشان داد که اضافه نمودن سخت کننده باعث می‌شود در نهایت کماتش در بال تیر در انتهای بارگذاری مشاهده شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود سخت کننده باعث می‌شود که مفصل پلاستیک از محل اتصال فاصله بیشتری بگیرد و با اطمینان بیشتری در داخل تیر ایجاد گردد.
- ۵) این تحقیق نشان داد که استفاده از سخت کننده در اتصال T-stub باعث ارتقا رفتار اتصال می‌شود. اگرچه تعیین ضخامت سخت کننده و اثر آن بر ارتقا رفتار لرزه‌ای نیازمند تحلیل‌های عددی گسترده‌ای است که توسط نویسندگان مقاله در حال انجام است.

۵- منابع

- [1] de la Croix Kombate, T. J. Taşkın, K. (2022). State-of-the-art review on the behaviour of T-stubs and prying action. *Journal of Constructional Steel Research*, 191, 107203. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107203>
- [2] Piluso, V. Faella, C. Rizzano, G. (2001). Ultimate behavior of bolted T-stubs. I: Theoretical model. *Journal of structural engineering*, 127(6), 686-693. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(686\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(686))
- [3] Hu, D. Papadopoulos, J. Adams, G. G. (2020). Prying action in an elastic T-stub tensile connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 169, 106027. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106027>
- [4] Bezerra, L. M. Bonilla, J. Freitas, C. S. Massicotte, B. (2022). Behavior of T-stub steel connections bolted to rigid bases. *Journal of Constructional Steel Research*, 192, 107242. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107242>
- [5] Hu, J. W. Leon, R. T. Park, T. (2012). Mechanical models for the analysis of bolted T-stub connections under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 78, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.05.011>
- [6] Kong, Z. Kim, S. E. (2018). Numerical estimation for initial stiffness and ultimate moment of T-stub connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 141, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.11.008>
- [7] Lyu, J. Yan, S. He, S. Zhao, X. Rasmussen, K. (2023). Mechanical model for the full range behaviour of bolted T-stubs. *Journal of Constructional Steel Research*, 200, 107652. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107652>
- [8] Park, H. Y. Oh, S. H. (2019). Design range of the damper of a T-stub damage-controlled system. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105719. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105719>
- [9] ANSI/AISC 358-16, Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA, 2016.

- [10] Herrera, R. A. Bravo, M. Gómez, G. Aedo, G. (2013). Performance of built-up T-stubs for Double T moment connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 88, 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.022>
- [11] Bravo, M. A. Herrera, R. A. (2014). Performance under cyclic load of built-up T-stubs for Double T moment connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.08.005>
- [12] Herrera, R. Salas, C. Beltran, J. F. Nuñez, E. (2017). Experimental performance of double built-up T moment connections under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 742-749. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.08.022>
- [13] Liang, G. Guo, H. Liu, Y. Li, Y. (2018). Q690 high strength steel T-stub tensile behavior: Experimental and numerical analysis. *Thin-Walled Structures*, 122, 554-571. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.042>
- [14] Hantouche, E. G. Abboud, N. H. (2014). Stiffness modeling of bolted thick built-up T-stub connections including secondary prying effect. *Journal of Constructional Steel Research*, 95, 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.12.012>
- [15] Chen, Z. Gao, F. Wang, Z. Lin, Q. Huang, S. Ma, L. (2023). Performance of Q690 high-strength steel T-stub under monotonic and cyclic loading. *Engineering Structures*, 277, 115405. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115405>
- [16] Wang, M. Dong, K. Liu, M. (2020). Damage control mechanism and seismic performance of a steel moment connection with replaceable low-yield-point steel double T-stub fuses. *Thin-Walled Structures*, 157, 107143. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107143>
- [17] Hantouche, E. G. Kukreti, A. R. Rassati, G. A. (2012). Investigation of secondary prying in thick built-up T-stub connections using nonlinear finite element modeling. *Engineering structures*, 36, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.030>
- [18] Qin, Y. Shu, G. P. Wang, W. (2020). Seismic behavior of self-centering steel connections with friction T-stubs. *Journal of Constructional Steel Research*, 173, 106263. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106263>
- [19] Saberi, V. Gerami, M. Kheyroddin, A. (2014). Comparison of bolted end plate and T-stub connection sensitivity to component thickness. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.012>
- [20] Garoosi, A. M. TahamouliRoudsari, M. Hashemi, B. H. (2018, November). Experimental evaluation of rigid connection with reduced section and replaceable fuse. In *Structures* (Vol. 16, pp. 390-404). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.010>
- [21] Tahamouli Roudsari, M. Sohaei, S. Torkaman, M. Alizadeh, A. Safaei, S. Haghaninia, A. MohammadiMajid, M. (2021). Experimental investigation of I-shaped beam to circular column rigid connection with stiffened and non-stiffened channel link. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(13), 2605-2627. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1628129>
- [22] Garoosi, A. R. M. Roudsari, M. T. Torkaman, M. Bonyadirad, S. Saeedmanesh, A. Lotfi, H. R. , ... & Alipour, A. (2021). Introducing new rigid I-beam to box column connections by using a stiffened channel link. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 41(4), 533-548.
- [23] Garfamy, H. M., Abar, B. M., & D'Aniello, M. (2023). Seismic response of CFST Double-Tee moment connections: Design criteria and experimental tests. *Engineering Structures*, 293, 116670. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116670>
- [24] Ajwad, A., Di Benedetto, S., Latour, M., & Rizzano, G. (2024). A COMPONENT METHOD APPROACH FOR SINGLE-SIDED BEAM-TO-COLUMN JOINTS WITH CHS COLUMN AND WELDED DOUBLE-TEE BEAM. *Thin-Walled Structures*, 112055. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112055>
- [25] Khani, R., Hosseinzadeh, Y., & Asl, M. H. (2023). Investigating the prying force magnitude and location in the T-stub connection based on the energy method. *Engineering Structures*, 280, 115655. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115655>
- [26] Di Benedetto, S., Francavilla, A. B., Latour, M., & Rizzano, G. (2024). Seismic behaviour of a steel moment resisting frame structure featuring hourglass double split tee joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 180, 108616. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108616>
- [27] American Society for Testing and Materials, A370-02.(2002). Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- [28] ATC-24.(1992). "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures". ATC-24, Redwood City, CA
- [29] FEMA, A. (2005). 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, Redwood City.
- [30] FEMA-356.: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings American Society of Civil Engineers (2000)