

ارزیابی عملکرد چرخه ای اتصالات پیچی با صفحه انتهایی بر اساس پارامترهای اتصال

فرزان اخلاصی^۱، حمید صابری^{۲*}، مسعود احمدوند^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

۲- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

۳- مدیر گروه تحصیلات تکمیلی مهندسی عمران، دانشگاه ایوانکی، سمنان، ایران

چکیده

بررسی دقیق عملکرد اتصالات در یک سازه فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و عدم دقت در طراحی و اجرای اتصالات، نه تنها موجب خرابی خود اتصال می‌شود بلکه اثرات ویران کننده‌ای نیز بر سایر اعضای سازه خواهد داشت. اتصال با ورق انتهایی از جمله اتصالات مرسوم و پرکاربرد در سازه‌های فولادی می‌باشد. دو نوع اتصال فلنجی تیر به ستون چهارپیچه و هشت پیچه وجود دارد. اتصال چهارپیچه برای مقادیر کم لنگر و اتصال هشت پیچه برای مقادیر بزرگ لنگر خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رفتار این اتصال به عوامل متعددی بستگی دارد. در این پژوهش رفتار چرخه ای اتصال گیردار تیر به ستون با ورق انتهایی تحت اثر بارگذاری تناوبی ارزیابی شده است. در محاسبات سعی شده است همه پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار این اتصال بررسی شده و راهکارهایی جهت دست یابی به حداکثر ظرفیت اتصال ارائه شود. از آنجایی که رفتار این اتصال به عوامل متعددی بستگی دارد دو مدل کلی اتصال تیر به ستون مختلف دارای تیرهایی به عمق ۳۰ و ۴۰ سانتیمتر برای انجام تحقیق در نظر گرفته شده است. ضخامت ورق انتهایی، جنس ورق انتهایی، ضخامت ستون، مقاومت یا جنس مصالح پیچ، لزوم استفاده از ورق پیوستگی، لچکی و ورق مضاعف از جمله پارامترهایی هستند که در تحلیل‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده ورق انتهایی با ضخامت کم سبب کماتش موضعی ورق می‌شود. استفاده از ورق‌های پیوستگی بسیار مهم بوده و سبب جلوگیری از کماتش‌های موضعی در چشمه اتصال می‌شود. همچنین در مواقعی که ضخامت جان ستون نازک است استفاده از ورق مضاعف نیز ضروری خواهد بود. همچنین استفاده از لچکی سبب بهبود ظرفیت خمشی مقطع می‌شود.

کلمات کلیدی: رفتار تناوبی، اتصالات پیچی، صفحه انتهایی، ورق پیوستگی، شکل پذیری

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۳۹۶/۱۱/۱۸	۱۳۹۷/۰۶/۱۳	۱۳۹۷/۰۷/۰۲	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	10.22065/jsce.2018.118528.1457
					doi: 10.22065/jsce.2018.118528.1457
*نویسنده مسئول: حمید صابری					
پست الکترونیکی: saberi.hamid@gmail.com					

Parametric Investigation of Cyclic Behavior of Bolt End plate Connections

¹Farzan Ekhlasi, ^{2*}Hamid Saberi, ³Masood Ahmadvand, ²Vahid Saberi

1-Graduate student of Structural Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

2-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

3- Faculty of civil engineering department, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

ABSTRACT

Precise investigation of the connections in a steel structure is important, and inaccuracy in the design and implementation of connections not only does cause failure in the connection, but also has a devastating effect on other members of the structure. Bolted end plate connections are commonly used in steel structures. There are two types of beam-to-column flange connections, four-bolt and eight-bolt. The four-bolt connection is used for low anchor values and the eight-bolt connection is used for large bending anchor values. In this study, the cyclic behavior of the restrained beam-to-column connections with end plate under cyclic loading has been evaluated. In the calculations, all of the parameters affecting the behavior of this connection have been investigated and solutions are proposed to reach the maximum connection capacity. Since the behavior of this connection depends on several factors, two general models of beam connection to different columns with beams of 30 and 40 cm depth are considered for research purposes. The thickness of end plate, shape of end plate, thickness of the column flange, strength or material of the bolts, the necessity of using continuity plate, stiffener and doubler plate are among the parameters considered in the analyzes. According to the results of this study, the use of a thin-walled end plate leads to local buckling of plate. The use of continuity plate is very important and prevents local buckling in the panel zone. Also, in cases where the thickness of the column web is low, the use of a doubler plate will also be necessary. In addition, the use of a stiffener improves the flexural strength of the section.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 February 2018

Revise Date: 04 September 2018

Accept Date: 24 September 2018

Keywords:

Cyclic behavior,
Bolted connections,
End plate,
Continuity plate,
Ductility

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.118528.1457

*Corresponding author: Hamid Saberi

Email address: saberi.hamid@gmail.com

۱- مقدمه

با توجه به استفاده روز افزون از سازه‌های فولادی و گسترش کاربرد اتصالات پیچی، بررسی دقیق عملکرد اتصالات در یک سازه فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و عدم دقت در طراحی و اجرای اتصالات، نه تنها موجب خرابی خود اتصال می‌شود بلکه اثرات ویران کننده‌ای نیز بر سایر اعضای سازه خواهد داشت. مجموعه تیر و ورق انتهایی که در آن سوراخ‌هایی تعبیه شده است توسط پیچ‌های پرمقاومت به بال ستون در کارگاه متصل می‌شود. دو نوع اتصال فلنجی تیر به ستون با نام‌های چهارپیچه و هشت پیچه وجود دارد. اتصال چهارپیچه برای مقادیر کم لنگر و اتصال هشت پیچه برای مقادیر بزرگ لنگر خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، رفتار اتصال خمشی فلنجی تحت اثر بارگذاری فزاینده چرخه‌ای با تغییر پارامترهای موثر نظیر جنس ورق انتهایی، جنس پیچ‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور چندین مدل عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود آماده شده و حدود تاثیر پارامترها بر رفتار اتصال فلنجی شناسانده می‌شود. هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار اتصال خمشی با صفحه انتهایی در سازه‌های فولادی تحت بارگذاری فزاینده چرخه-ای با تغییر پارامترهای موثر بر رفتار اتصال نظیر جنس پیچ‌ها و استفاده از سخت کننده (لچکی) و ورق پیوستگی و ورق مضاعف می‌باشد. برای این منظور، توزیع تنش در اجزای اتصال با تغییر پارامترهای یاد شده و تغییر محل مفصل پلاستیک در تیر و ظرفیت خمشی اتصال و رفتار اتصال بر مبنای هیستریزس و ظرفیت دورانی و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این تحقیق می‌تواند به طراحی بهتر و بهینه‌تر اتصال خمشی فلنجی کمک کند.

این تحقیق به ارزیابی عملکرد تناوبی اتصال فلنجی تیر به ستون در قاب‌های فولادی می‌پردازد. استفاده از تحلیل‌های المان محدود که قابلیت شبیه سازی رفتار غیرخطی اتصال را با دقت بسیار زیاد فراهم می‌کند. در این اتصال، تیر فولادی در کارخانه با جوش شیار در بال‌ها و جوش شیار یا جوش گوشه در جان و با کنترل مناسب به ورق انتهایی متصل می‌شود. مجموعه تیر و ورق انتهایی که در آن سوراخ‌هایی تعبیه شده است توسط پیچ‌های پرمقاومت به بال ستون متصل می‌شود.

انواع اتصالات صلب که در سازه‌های فولادی به کار می‌روند عبارتند از: اتصال صلب جوشی با ورق زیرسری و روسری، اتصال صلب با جوش مستقیم تیر به ستون، اتصال صلب با ورق زیرسری و روسری با اتصال ۴ و ۸ پیچه، اتصال صلب با ورق انتهایی (فلنجی) اتصالات خمشی با ورق انتهایی به صورت Flush (همتراز) یا Extended (بلند)، با سخت کننده یا بدون سخت کننده و یا از نظر تعداد پیچ‌ها دسته بندی می‌شوند. در اتصال با ورق انتهایی همتراز، ابعاد ورق انتهایی از بال‌های تیر تجاوز نمی‌کند. در اتصال با ورق انتهایی بلند، ابعاد ورق انتهایی باید به اندازه‌ای از بال‌های تیر فراتر رود که امکان قرارگیری پیچ در بخش بیرونی ورق فراهم گردد. اتصال با ورق انتهایی بلند می‌تواند همراه یا بدون سخت کننده میان بال کششی تیر و ورق انتهایی در صفحه جان تیر باشد. ورق انتهایی بلند برای اتصال گیردار تیر به ستون بکار می‌رود. پژوهشگرانی مانند Borgsmiller, Murray و Watson تحلیل مناسبی از ورق‌های انتهایی بر اساس خطوط گسیختگی ارائه کردند.

۲- تحقیقات گذشته

گراندی و همکارانش در سال ۱۹۸۰ [1]، در زمینه پارامترهای گوناگون و تاثیرگذار بر عملکرد اتصالات گیردار فلنجی مطالعه کردند. آن‌ها در آزمایشات خود سه پارامتر شامل قطر پیچ، ضخامت ورق و سخت کننده ستون در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. پوپوف و تسای در سال ۱۹۹۰ [2] سه نمونه اتصال خمشی فلنجی را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند و با استفاده از آنالیز المان محدود مدلسازی انجام دادند. نتایج نشان داده اتصال با ورق سر دارای ظرفیت اتلاف انرژی عالی می‌باشد. حجازی و بهداد در سال ۱۳۸۸ [3] به بررسی اثرات ورق‌های تقویتی در اتصالات تیر به ستون فلنجی با استفاده از آنالیز المان محدود پرداختند. در این تحقیق ۶ مدل عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS مدلسازی شد و مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده استفاده از سخت کننده به خصوص ورق‌های مثلثی شکل تاثیر چشمگیری در افزایش شکل پذیری، صلبیت و توان تحمل بار در اتصالات فلنجی دارا می‌باشد. جوشی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [4] با استفاده از نرم افزار آباکوس به مدلسازی کامپیوتری اتصال گیردار فلنجی پرداختند. نتایج حاصل از این

تحقیق نشان داد که با افزایش قطر پیچ، ظرفیت باربری خمشی اتصال افزایش می‌یابد و همچنین مد گسیختگی در بال ستون واقع می‌شود. راجش کومار و همکاران در سال ۲۰۱۳ [5] اتصال گیردار فلنجی را تحت اثر حرارت ناشی از آتش‌سوزی بررسی کردند. مدلسازی با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس انجام شد و ضخامت‌های گوناگون ورق انتهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج این تحقیق افزایش ضخامت ورق هرچند باعث افزایش ظرفیت خمشی اتصال می‌گردد اما سبب افزایش نیرو در پیچ‌ها شده و احتمال گسیختگی ترد در پیچ‌ها را افزایش می‌دهد. بلک در سال ۲۰۱۲ [6]، اتصالات تیر به ستون جوشی و پیچی را با استفاده از مدل‌های عددی مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه دو نمونه اتصال جوشی و پیچی با ورق سر، با بهره‌گیری از روش المان محدود در نرم افزار آباکوس تحلیل شد و نتایج آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی گردید. بانی و همکاران در سال ۲۰۱۲ [7] یک رویکرد بر مبنای مدلسازی المان محدود به منظور بررسی عددی عملکرد لرزه‌ای اتصال گیردار با ورق انتهایی پیچ‌شده با در نظر گرفتن نیروی محوری ارائه کردند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد حضور نیروی محوری عملکرد اتصال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. وجود نیروی کششی سبب کاهش ظرفیت خمشی نهایی اتصال می‌گردد. اسمائیل و همکاران در سال ۲۰۱۵ [8] در مطالعه‌ای عددی، عملکرد نهایی اتصالات فولادی با ورق انتهایی را بررسی نمودند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مدل بدون سخت‌کننده با ورق انتهایی همتراز مقاومت خمشی بسیار کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و با افزایش زاویه بالایی سخت‌کننده، ظرفیت خمشی اتصال نیز افزایش می‌یابد. صابری و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [9] به مطالعه و مقایسه اتصال گیردار با ورق انتهایی و اتصال گیردار با استفاده از سپری پرداختند. نتایج نشان داد اتصالات گیردار سپری حساسیت بیشتری به ضخامت اعضا نشان می‌دهد. دسوکی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [10] رفتار اتصال خمشی تیر به تیر I-شکل با ورق انتهایی را به صورت عددی بررسی کردند. در این تحقیق برای تحلیل از نرم افزار Ansys استفاده و پارامترهایی چون عمق تیر، ضخامت ورق، قطر پیچ، رزوه پیچ، مقاومت پیچ و وجود سخت‌کننده در اتصال بررسی شد. قاسمی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [11] با استفاده از الگوریتم فراابتکاری شبکه عصبی مصنوعی به بهینه‌سازی اتصال خمشی فلنجی سخت‌شده پرداختند. شی و چن در سال ۲۰۱۶ [12] یک مطالعه عددی به روش المان محدود بر روی اتصالات خمشی با ورق انتهایی برای مقاومت خمشی بسیار بالا به انجام رساندند. به منظور مطالعه رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی با اتصالات فلنجی، یک مدل المان محدود دقیق و موثر تحت اثر بارگذاری متناوب توسط وانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [13] آماده شد. در این تحقیق هم اتصال فلنجی بلند و هم اتصال فلنجی همتراز مدلسازی و آنالیز شد.

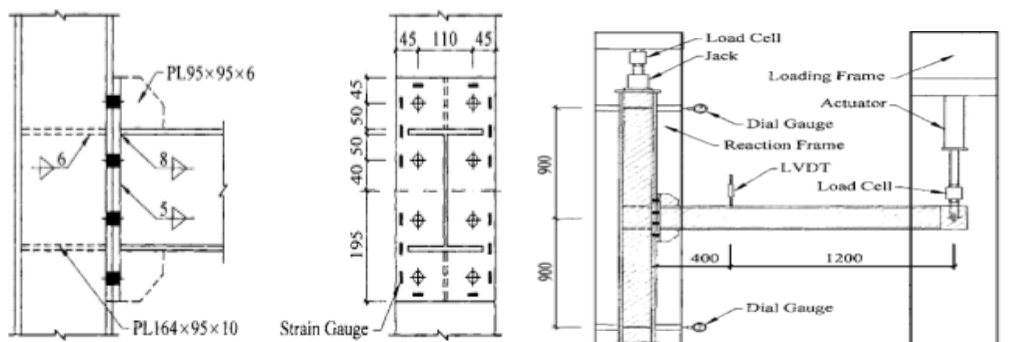
۳- روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از تحلیل‌های غیر خطی و المان محدود، اتصال خمشی تیر به ستون با ورق انتهایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این تحقیق، چندین نمونه اتصال خمشی پیچی با صفحات انتهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل به صورت استاتیکی غیر خطی انجام شد. نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق برنامه المان محدود ABAQUS بوده و ارزیابی تمامی نمونه‌های مورد بررسی، طبق این برنامه انجام شد. با اطمینان از نتایج مدل‌سازی با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، پارامترهای موثر در طراحی اتصالات مانند تعداد پیچ‌ها و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها و همچنین حضور سخت‌کننده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور دو مدل کلی شامل مدل A (تیر به عمق ۳۰ سانتیمتر) و مدل B (تیر به عمق ۴۰ سانتیمتر) در نظر گرفته شده است. هر یک از مدل‌های A و B در حالت‌های مختلفی مدلسازی و تحلیل شده و عملکرد آن‌ها تحت اثر بارهای سیکلی ارزیابی شده است. پارامترهای گوناگونی همچون استفاده از ورق پیوستگی، استفاده از لچکی، استفاده از ورق مضاعف، ضخامت ورق انتهایی، جنس ورق انتهایی، ضخامت بال ستون و مقاومت پیچ در اتصال تیر به ستون با ورق انتهایی بررسی شده است.

صحت‌سنجی

یک تحقیق آزمایشگاهی در زمینه اتصال با ورق انتهایی دارای سخت‌کننده و بدون آن تحت بارهای سیکلی توسط Guo و همکاران در سال ۲۰۰۶ [14] به انجام رسید. یکی از نمونه‌های مورد بررسی در این آزمایش که نمونه S-4 (d) نام دارد جهت صحت‌سنجی و مدلسازی در نرم افزار آباکوس در نظر گرفته شده است.

شکل کلی و ابعاد اعضا در آزمایش Guo مطابق شکل ۱ است. اعضای فولادی دارای فولاد از نوع Q235B بر اساس استاندارد چین است و تنش تسلیم واقعی آن ۳۱۰ مگا پاسکال بدست آمد. از پیچ های اصطکاک پر مقاومت با سایز M20 و از نوع ۱۰/۹ با تنش تسلیم ۹۶۰ مگا پاسکال برای اتصال ورق انتهایی به بال ستون بهره گرفته شد. جهت بارگذاری ابتدا یک نیروی محوری ۵۰۰ کیلو نیوتن متناظر با ۲۰ درصد ظرفیت ستون به آن وارد شد. بارگذاری سیکلی ابتدا بصورت کنترل شونده توسط نیرو انجام شد. در دو سیکل اولیه، بارگذاری تا نیروی ۲۰ کیلو نیوتن انجام شد و در سیکل های بعدی ۱۰ کیلو نیوتن افزایش پیدا کرد. این فرایند ادامه یافت تا آنکه اتصال به نقطه تسلیم رسید. از این مرحله به بعد بارگذاری بصورت کنترل شونده توسط تغییر مکان تنظیم شد. بارگذاری سیکلی همچنان ادامه می-یابد تا آنکه اتصال دچار خرابی شود یا آنکه انحراف شدید در منحنی هیستریزس رخ بدهد. جزئیات ورق انتهایی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱: شکل کلی مدل آزمایشگاهی [14].

شکل ۲: جزئیات ورق انتهایی [14].

مشخصات مقطع تیر و ستون مورد استفاده در آزمایش و ظرفیت خمشی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مقطع تیر و ستون در همه نمونه یکسان است.

Table 1. Dimensions and Calculated Moments of Member Sections [14].

Members	Height (mm)	Width (mm)	Flange thickness (mm)	Web thickness (mm)	Yielding moment (kN m)	Plastic moment (kN m)
Beam	200	150	10	6	93.0	103.4
Column	200	200	18	12	199.1	218.9

در جدول ۲ مشخصات نمونه های مورد بررسی ارائه شده است.

جدول ۲: نمونه آزمایش [14].

نمونه	ضخامت ورق انتهایی [mm]	سخت کننده ورق انتهایی	ورق پیوستگی جان ستون
S-4	۱۸	ندارد	ندارد

همه نمونه های آزمایش شده دارای ظرفیت دورانی در محدوده ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۷۲ رادیان هستند. با این وجود، اختلاف میان حالت های خرابی، لنگر ماکزیمم و ظرفیت استهلاک انرژی در میان آن‌ها قابل توجه بوده است.

برای مدلسازی اتصال از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. مدلسازی در فضای سه بعدی انجام شده و بخش های گوناگون نمونه آزمایش در مدل نرم افزاری، شبیه سازی شدند. بخش هایی که در مدل ساخته شدند شامل تیر فولادی، ستون فولادی، ورق انتهایی، سخت کننده، ورق پیوستگی، پیچ و مهره می باشند. مطابق با فرآیند آزمایش ابتدا بارگذاری محوری ستون و سپس بارگذاری سیکلی

به انتهای تیر وارد می شود. تیر و ستون، ورق انتهایی و سخت کننده ها از مصالح فولادی با تنش تسلیم برابر با ۳۱۰ مگاپاسکال و برای پیچ ها از فولاد پرمقاومت با تنش تسلیم برابر با ۹۶۰ مگاپاسکال استفاده شده است. ضریب اصطکاک ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

مشخصات مکانیکی المان های مورد استفاده در این مدلسازی در جداول ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳: مشخصات فولاد مورد استفاده در مدلسازی نمونه تحلیلی.

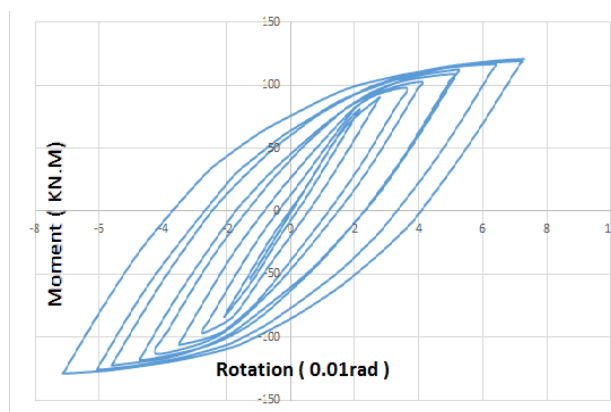
تنش	کرنش	محل مورد استفاده	مصالح
۲۴۰	۰/۰۰۱۱۴۳	تیر ، ستون ، صفحه انتهایی ، لچکی ، ورق پیوستگی و ورق مضاعف	ST-37
۲۴۰	۰/۰۲		
۳۶۰	۰/۱۸		
۳۷۰	۰/۲۰		
۳۷۰	۰/۳۵		
۳۶۰	۰/۰۰۱۷۱۴	صفحه انتهایی	ST-52
۳۶۰	۰/۰۰۵۴۶۸		
۳۸۰	۰/۰۰۷۹۸۵		
۳۹۸	۰/۰۱۲۳۲۴		
۴۱۵	۰/۰۱۹۷۳۲		
۴۳۳	۰/۰۳۱۵۴۳		
۴۵۰	۰/۰۴۹۰۹۶		
۴۶۸	۰/۰۷۳۶۴۵		
۴۸۵	۰/۱۰۶۲۶۶		
۵۰۳	۰/۱۴۷۲۶۶		
۵۲۰	۰/۱۹۸۶۱		

جدول ۴: مشخصات پیچ مورد استفاده در مدلسازی نمونه تحلیلی.

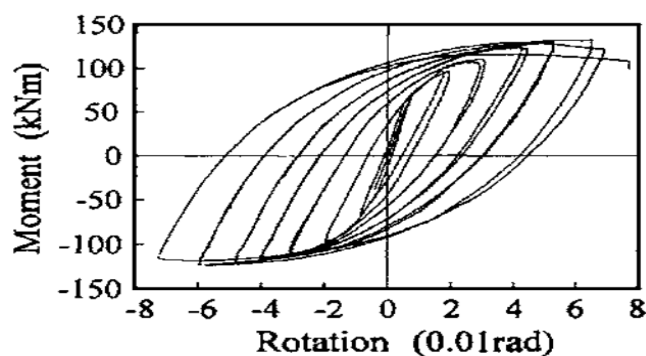
تنش	کرنش	محل مورد استفاده	مصالح
۷۹۴	۰/۰۰۳۸۶	پیچ	۱۰/۹
۱۰۳۵	۰/۰۱۳۵		
۱۰۳۵	۰/۰۳۰۹		
۱۰۴۸	۰/۲۰		
۶۴۰	۰	پیچ	۸/۸
۸۰۰	۰/۰۳۸		
۸۰۰	۰/۱۴۸		

نتیجه صحت سنجی

منحنی هیسترتیک لنگر-انحنا حاصل از مدلسازی عددی و منحنی متناظر با آن حاصل از مدل آزمایشگاهی در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

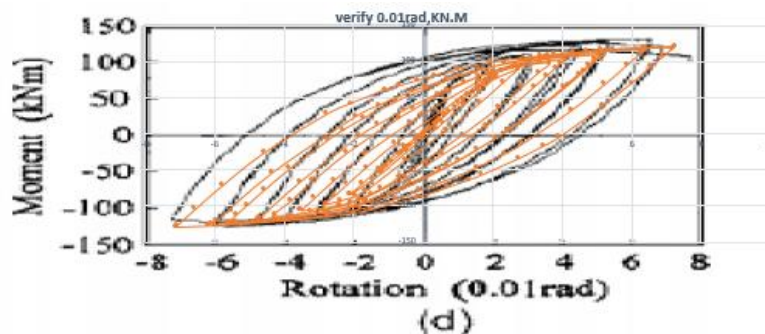


شکل ۳: منحنی لنگر-انحنا حاصل از مدلسازی عددی در آباکوس.



شکل ۴: منحنی لنگر-انحنا حاصل از آزمایش Guo [14].

مقایسه منحنی لنگر-انحنا حاصل از مدلسازی عددی در آباکوس با منحنی لنگر-انحنا حاصل از آزمایش Guo در شکل ۵ آمده است.

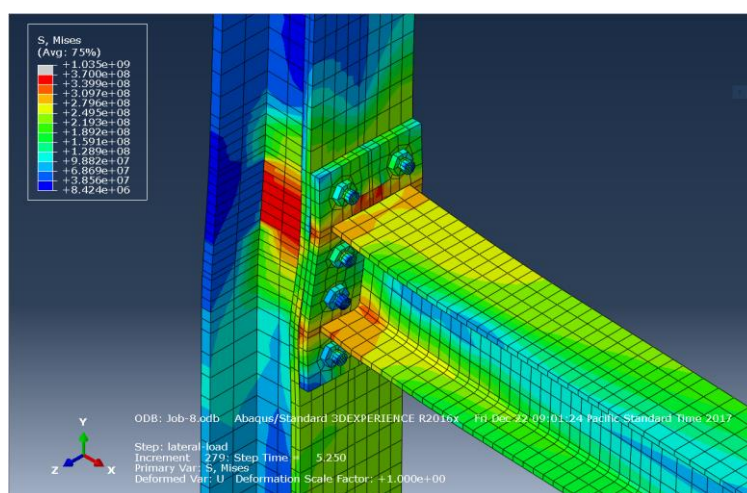


شکل ۵: منحنی لنگر-انحنای حاصل از مدلسازی عددی در آباکوس و آزمایش Guo [14].

همانگونه که در شکل ۵ به وضوح نمایان است، مدل المان محدود توانسته رفتار مدل آزمایشگاهی را به نحو مناسبی پیش بینی کند. حداکثر لنگر خمشی بدست آمده از آزمایش برابر با ۱۲۳ کیلونیوتن-متر است و حداکثر لنگر خمشی در مدل المان محدود برابر با ۱۲۵ کیلونیوتن-متر می باشد.

همانطور که از شکل ۶ پیداست در این مدل کمناش موضعی ورق انتهایی و بال ستون رخ داده است.

دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۷ رادیان می باشد

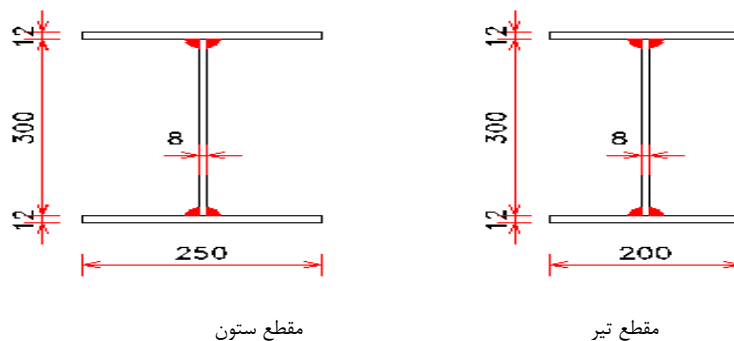


شکل ۶: کانتور تنش و تغییر شکل در مدل صحت سنجی

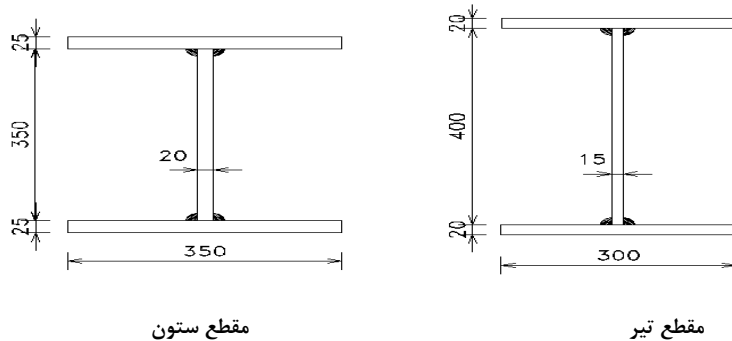
معرفی مدل های مورد مطالعه

برای انجام این تحقیق، دو مدل کلی شامل مدل A (تیر به عمق ۳۰ سانتیمتر) و مدل B (تیر به عمق ۴۰ سانتیمتر) در نظر گرفته شده است. هر یک از مدل های A و B در حالت های مختلفی مدلسازی و تحلیل می شوند و عملکرد آنها تحت اثر بارهای سیکلی ارزیابی می شود. پارامترهای گوناگونی همچون استفاده از ورق پیوستگی، استفاده از لچکی، استفاده از ورق مضاعف، ضخامت ورق انتهایی، جنس ورق انتهایی، ضخامت بال ستون و مقاومت پیچ در اتصال تیر به ستون با ورق انتهایی بررسی می شود.

مقطع تیر و ستون مورد استفاده در مدل های A و B در شکل های ۷ و ۸ به نمایش در آمده است.

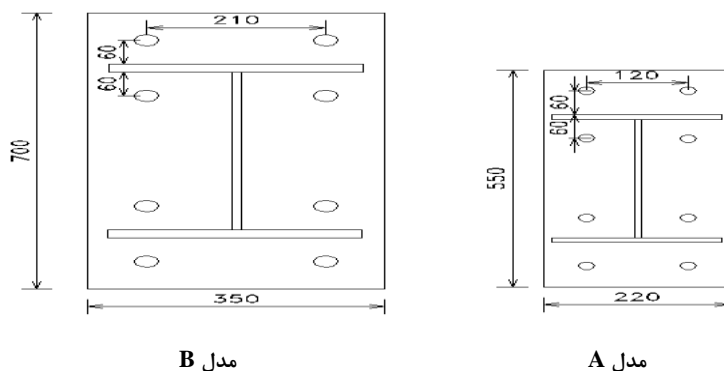


شکل ۷: مقطع تیر و ستون (مدل A)



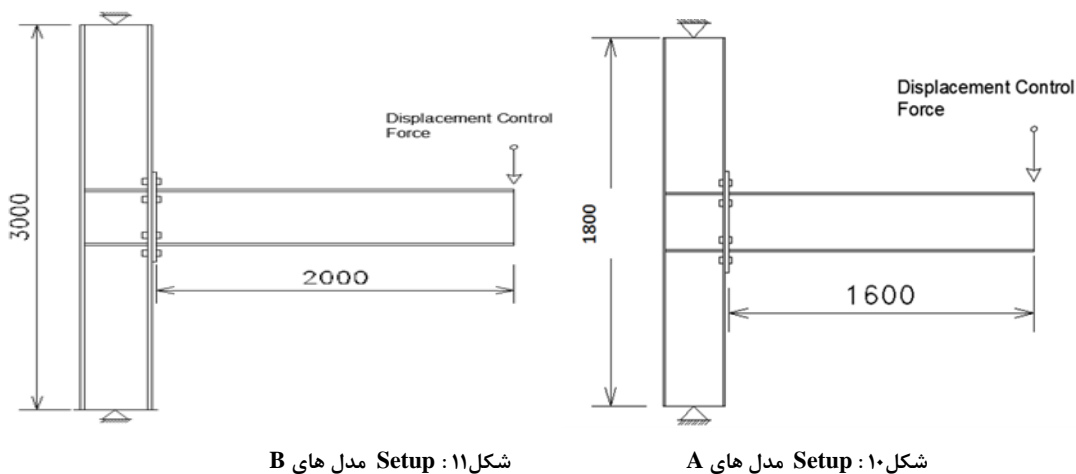
شکل ۸: مقطع تیر و ستون (مدل B)

مشخصات ورق انتهایی مدل های A و B در شکل ۹ به نمایش در آمده است.



شکل ۹: مشخصات ورق انتهایی مدل های مورد بررسی

Setup مدل های A و B در شکل ۱۰ و ۱۱ به نمایش در آمده است.



شکل ۱۱: Setup مدل های B

شکل ۱۰: Setup مدل های A

در جدول های ۵ و ۶ مشخصات و پارامترهای مورد بررسی در هر مدل معرفی شده اند.
جدول ۵: مشخصات مدل های A.

مدل	ضخامت ورق انتهایی [mm]	ضخامت بال ستون [mm]	جنس بولت	لچکی	ضخامت لچکی [mm]	ورق پیوستگی	ضخامت ورق پیوستگی [mm]	ورق مضاعف	ضخامت ورق مضاعف [mm]
A0 ST-37	۱۰	۱۲	پر مقاومت	-	-	-	-	-	-
A1 ST-37	۱۵	۱۲	پر مقاومت	-	-	-	-	-	-
A2 ST-37	۱۵	۱۲	پر مقاومت	دارد	۱۲	دارد	۱۲	-	-
A3 ST-37	۲۰	۱۲	پر مقاومت	دارد	۲۰	دارد	۱۲	دارد	۸
A4 ST-37	۲۰	۲۰	پر مقاومت	دارد	۲۰	دارد	۱۲	دارد	۸
A1 ST-52	۱۵	۱۲	پر مقاومت	-	-	-	-	-	-
A4 ST-52	۲۰	۲۰	پر مقاومت	دارد	۲۰	دارد	۱۲	دارد	۸

جدول ۶: مشخصات مدل های B.

مدل	ضخامت ورق انتهایی [mm]	ضخامت بال ستون [mm]	جنس بولت	لچکی	ضخامت لچکی [mm]	ورق پیوستگی	ضخامت ورق پیوستگی [mm]
B1 ST-37	۳۰	۲۵	معمولی	-	-	-	-
B2 ST-37	۳۰	۲۵	پر مقاومت	-	-	-	-
B3 ST-37	۳۰	۲۵	پر مقاومت	دارد	۲۵	دارد	۲۰
B3 ST-52	۳۰	۲۵	پر مقاومت	دارد	۲۵	دارد	۲۰

گفتنی است در اتصال A، لنگر پلاستیک تیر، ۳۰۰ کیلو نیوتن - متر می باشد. در اتصال B، لنگر پلاستیک تیر، ۱۰۰۰

کیلو نیوتن - متر می باشد.

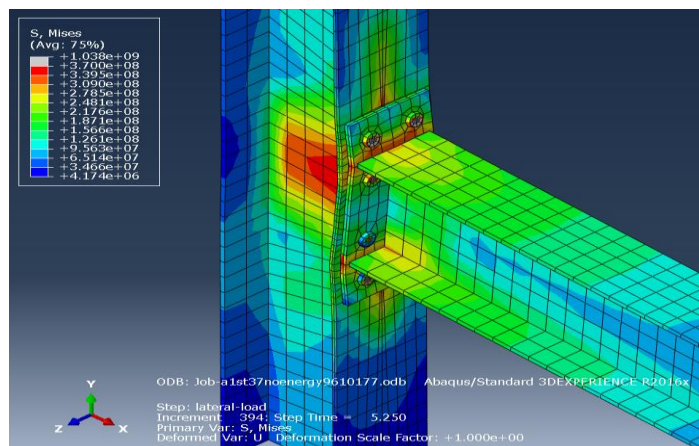
مد خرابی

- مدل A0 ST-37

در این مدل کمناش موضعی ورق انتهایی و بال ستون رخ داده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۶۸۷ رادیان می باشد.

- مدل A1 ST-37

همان طور که از شکل ۱۲ پیداست در این مدل، تسلیم چشمه اتصال و همچنین کمناش موضعی ورق انتهایی و بال ستون رخ داده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۶۷۹ رادیان می باشد.



شکل ۱۲: کانتور تنش و تغییر شکل در مدل A1 ST-37

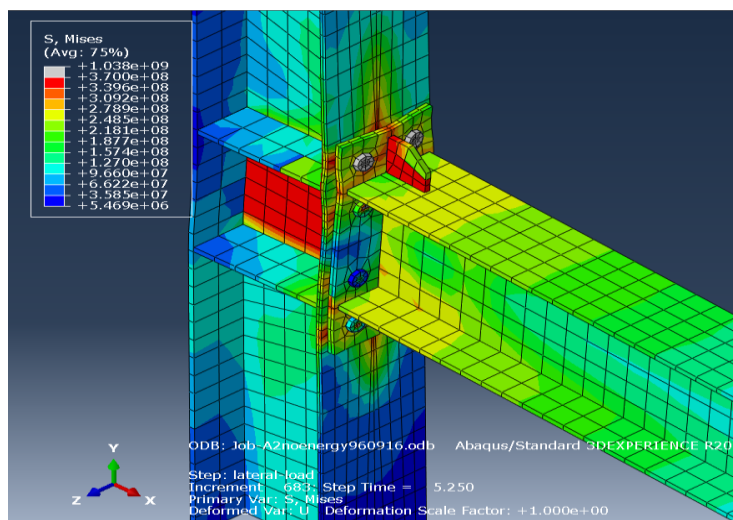
- مدل A1 ST-52

در این مدل کماتش موضعی ورق انتهایی و بال ستون رخ داده است. دورانی که باعث خرابی می شود $0/067$ رادیان می باشد.

- مدل A2 ST-37

همان طور که از شکل ۱۳ پیداست در این مدل رفتار غیرخطی این اتصال به دلیل تسلیم چشمه اتصال و تسلیم بال ستون می باشد.

دورانی که باعث خرابی می شود $0/064$ رادیان می باشد.



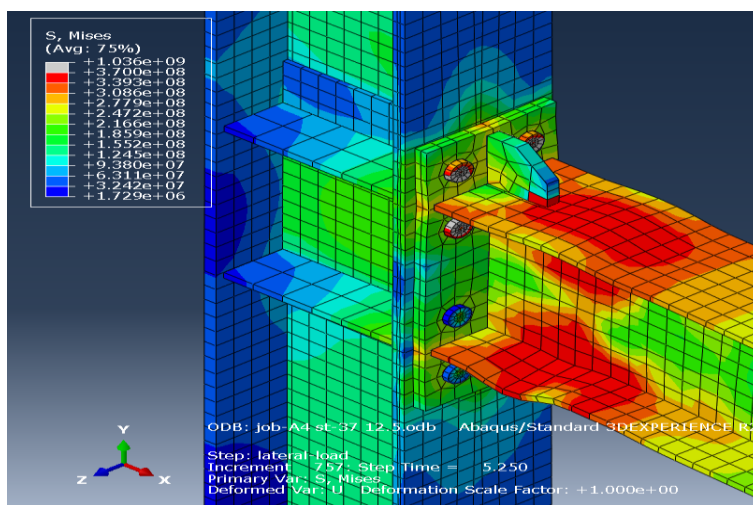
شکل ۱۳: کانتور تنش و تغییر شکل در مدل A2 ST-37

- مدل A3 ST-37

در این مدل تسلیم بال ستون همچنان نقطه ضعف این اتصال می باشد. دورانی که باعث خرابی می شود $0/06$ رادیان می باشد.

- مدل A4 ST-37

همان طور که از شکل ۱۴ مشخص است در این مدل رفتار غیر خطی تماماً به تیر منتقل شده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۵۷ رادیان می باشد.



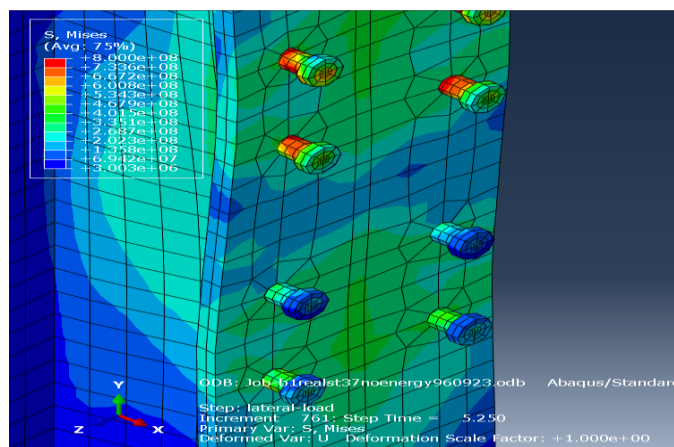
شکل ۱۴: کانتور تنش و تغییر شکل در مدل A4 ST-37

– مدل A4 ST-52

در این مدل رفتار غیر خطی تماماً به تیر منتقل شده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۶۸ رادیان می باشد.

– مدل B1 ST-37

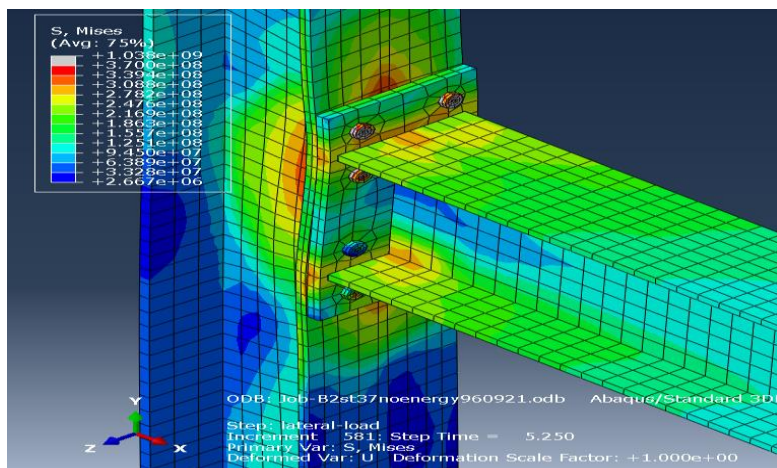
همان طور که از شکل ۱۵ پیداست خرابی به دلیل شکست پیچ رخ داده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۵۶ رادیان می باشد.



شکل ۱۵: کانتور تنش و تغییر شکل در مدل B1 ST-37

– مدل B2 ST-37

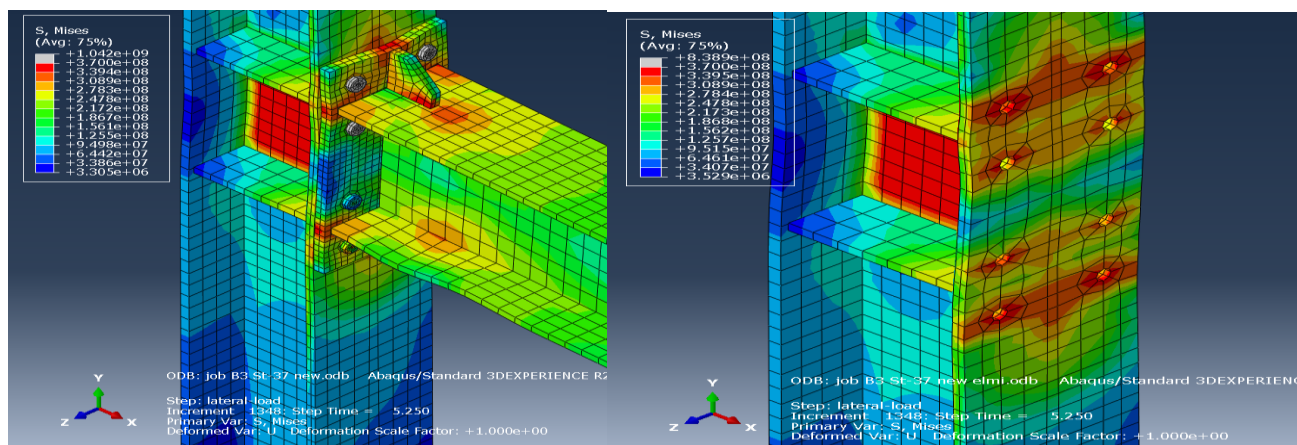
همان طور که در شکل ۱۶ پیداست در این مدل خرابی به دلیل کمناش موضعی جان و بال ستون رخ داده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۵۴ رادیان می باشد.



شکل ۱۶: کانتور تنش و تغییرشکل در مدل B2 ST-37

- مدل B3 ST-37

همان طور که در شکل ۱۷ و ۱۸ مشخص است در این مدل تسلیم در ناحیه لچکی و اطراف سوراخ و چشمه اتصال اتفاق افتاده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۴۸ رادیان می باشد.



شکل ۱۸: کانتور تنش و تغییرشکل در مدل B3 ST-37

شکل ۱۷: کانتور تنش و تغییرشکل در مدل B3 ST-37

- مدل B3 ST-52

در این مدل تسلیم در ناحیه لچکی و اطراف سوراخ و چشمه اتصال اتفاق افتاده است. دورانی که باعث خرابی می شود ۰/۰۵۴ رادیان می باشد

۴- بحث بر روی نتایج

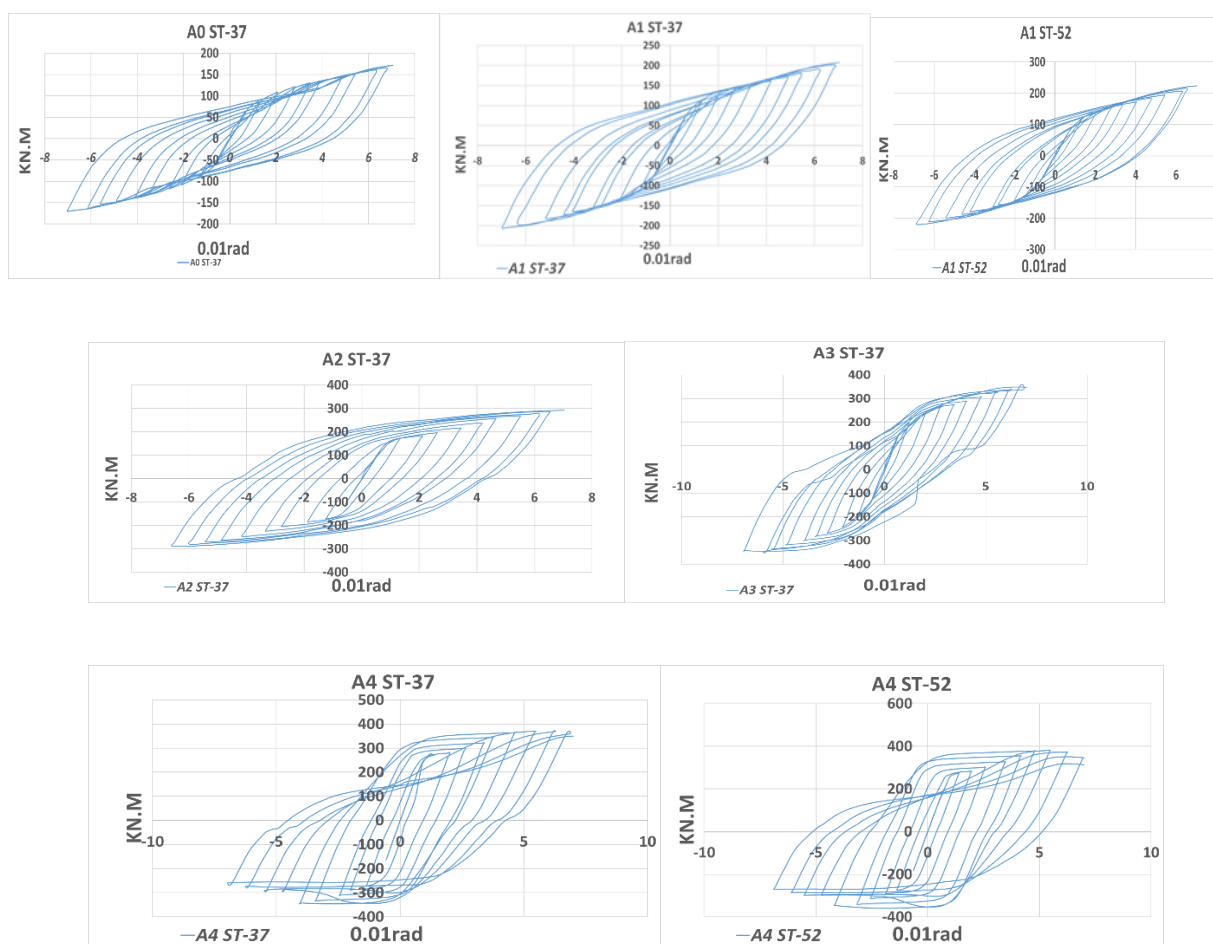
۴-۱ ظرفیت خمشی و رفتار خمشی اتصالات

در جدول ۷ مقایسه بین مدل های A0 ST-37 تا A4 ST-37 و همچنین مدل های A1 ST-52 و A4 ST-52 را بر حسب ظرفیت خمشی اتصال نشان داده شده است.

جدول ۷: ظرفیت خمشی نمونه های A.

ظرفیت خمشی اتصال KN.M	نمونه ها
۱۷۲	A0 ST-37
۲۰۸	A1 ST-37
۲۹۲	A2 ST-37
۳۵۸	A3 ST-37
۳۷۳	A4 ST-37
۲۲۴	A1 ST-52
۳۸۰	A4 ST-52

نمودارهای هیستریزیس لنگر-دوران نمونه های A در شکل ۱۹ نشان داده شده است.



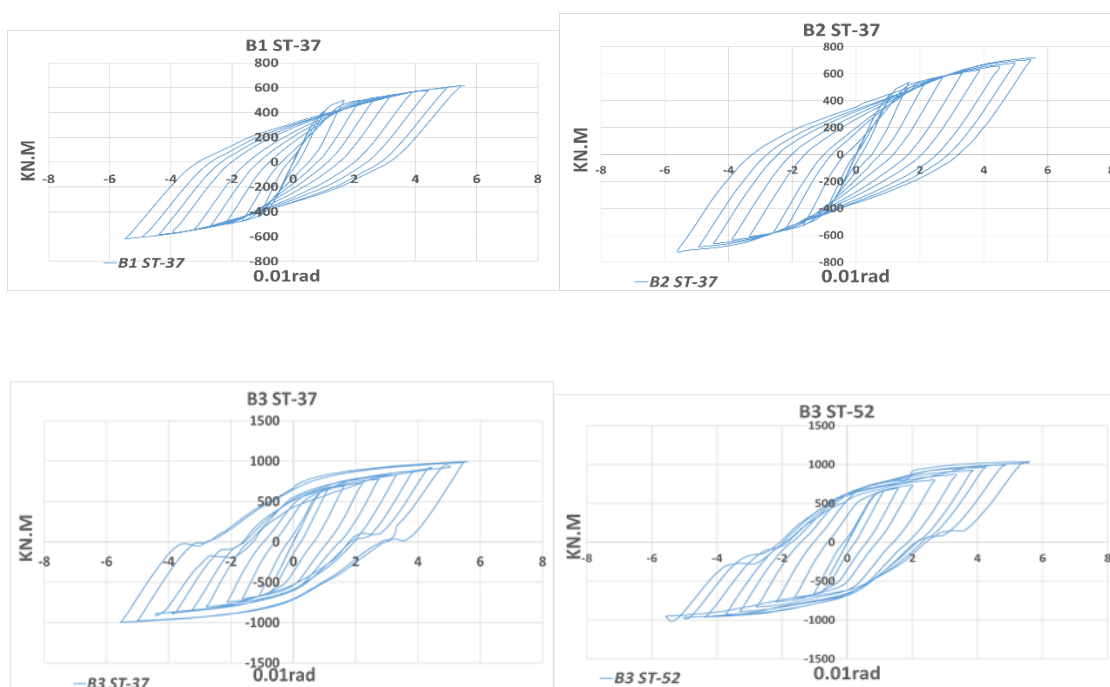
شکل ۱۹: نمودارهای هیستریزیس لنگر-دوران مدل های A

در جدول ۸ مقایسه بین مدل های B1 ST-37 تا B3 ST-37 و همچنین مدل B3 ST-52 بر حسب ظرفیت خمشی اتصال نشان داده شده است.

جدول ۸: ظرفیت خمشی نمونه های B

ظرفیت خمشی اتصال KN.M	نمونه ها
۶۱۹	B1 ST-37
۷۲۰	B2 ST-37
۹۹۷	B3 ST-37
۱۰۳۶	B3 ST-52

نمودارهای هیستریزیس لنگر-دوران نمونه های B در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



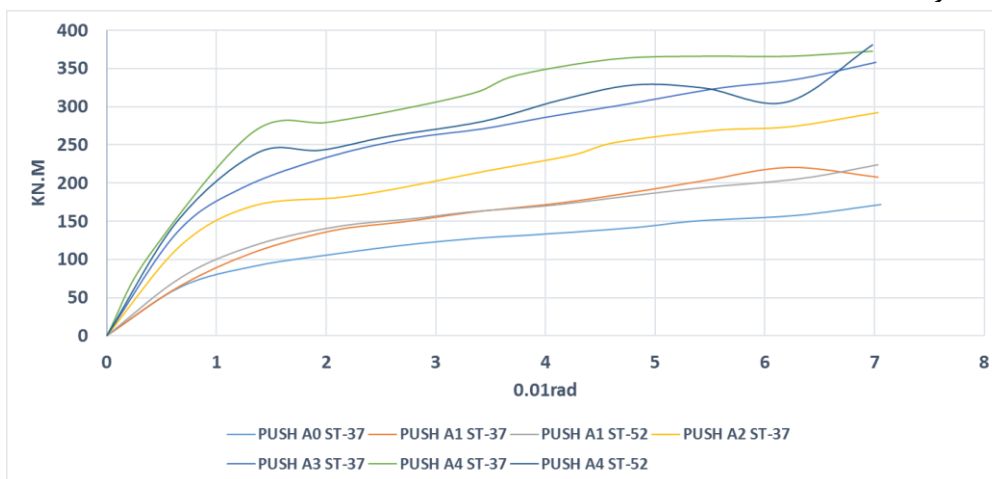
شکل ۲۰: نمودارهای هیستریزیس لنگر-دوران مدل های B

۴-۲ بررسی سختی دورانی اتصالات

برای محاسبه سختی دورانی ابتدا منحنی پوش اور را دو خطی کرده و محل تلاقی خط اول و دوم روی نمودار دوران و لنگر جاری شدگی میباید و سختی دورانی از تقسیم ممان جاری شدگی بر دوران جاری شدگی حاصل میشود.

پوش منحنی هیستریزیس لنگر-دوران مدل های A1 ST-37 تا A4 ST-37 در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در این بین، مدل A0 ST-37 که فاقد لچکی، ورق پیوستگی و ورق مضاعف است با سختی دورانی ۹۲۰۰ کیلو نیوتن-متر بر رادیان

کمترین سختی اولیه و مدل A4 ST-37 با سختی دورانی ۲۵۴۰۰ کیلو نیوتن-متر بر رادیان بیشترین سختی دورانی را داراست. کاملاً مشخص است افزودن لچکی، ورق پیوستگی و ورق مضاعف و نیز افزایش ضخامت ورق اتصال تا تامین حداقل ضخامت مورد نیاز، موجب افزایش سختی دورانی اتصال می‌شود. همچنین استفاده از فولاد ST-52 سبب افزایش سختی دورانی در مدل A1 ST-52 شده است. سختی دورانی مدل A1 ST-52 ۳ درصد افزایش نسبت به مدل A1 ST-37 داشته است و سختی دورانی در مدل A4 ST-52 نسبت به مدل A4 ST-37 ۳ افزایش پیدا کرده است.



شکل ۲۱: پوش منحنی هیستریزیس لنگر-دوران مدل‌های A1 ST-37 تا A4 ST-37, A1 ST-52, A4 ST-52

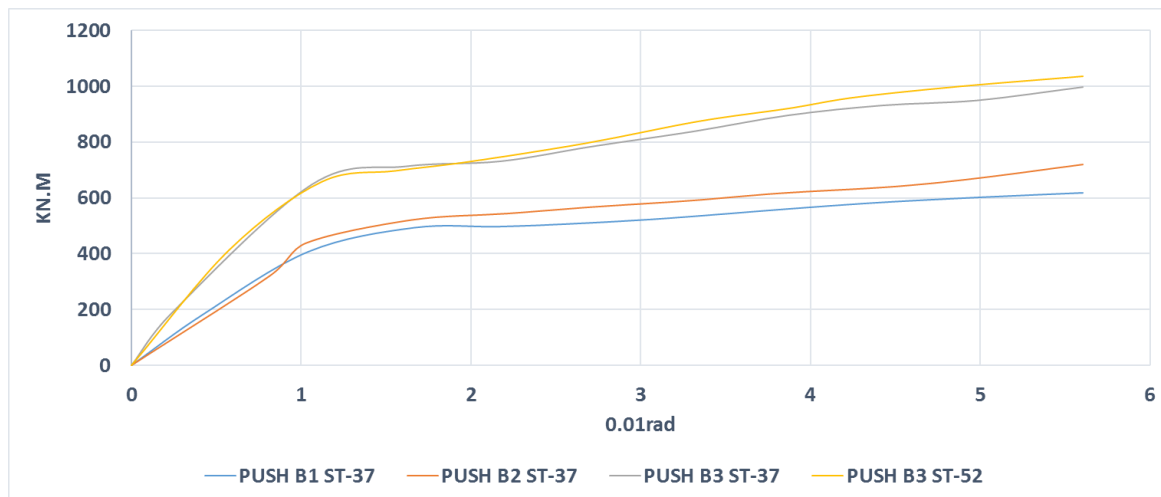
در جدول ۹ مقایسه بین مدل‌های A0 ST-37 تا A4 ST-37 و همچنین مدل‌های A1 ST-52 و A4 ST-52 را بر حسب سختی دورانی اتصال نشان داده شده است.

جدول ۹: سختی دورانی نمونه‌های A.

نمونه‌ها	سختی دورانی اتصال Kn.m/rad
A0 ST-37	۹۲۰۰
A1 ST-37	۱۱۳۰۰
A2 ST-37	۱۸۳۰۰
A3 ST-37	۱۹۹۰۰
A4 ST-37	۲۵۴۰۰
A1 ST-52	۱۱۶۰۰
A4 ST-52	۲۶۰۰۰

پوش منحنی هیستریزیس لنگر-دوران مدل‌های B1 ST-37 تا B3 ST-37 در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مدل B1 ST-37 که فاقد لچکی، ورق پیوستگی است و دارای پیچ معمولی است با سختی دورانی ۴۰۱۷۰ کیلو نیوتن-متر بر رادیان کمترین سختی دورانی و مدل B3 ST-37 با سختی دورانی ۷۲۵۰۰ کیلو نیوتن-متر بر رادیان بیشترین سختی دورانی را داراست. استفاده از پیچ پرمقاومت به جای

پیچ معمولی تاثیر زیادی بر روی سختی دورانی ندارد ولی استفاده از ورق پیوستگی و لچکی، موجب افزایش سختی دورانی اتصال شده است. همچنین استفاده از فولاد ST-52 در صفحه انتهایی سبب افزایش سختی دورانی در مدل B3 ST-52 شده است.



شکل ۲۲: پوش منحنی هیستریزیس لنگر-دوران مدل‌های B1 ST-37 تا B3 ST-37, B3 ST-52

در جدول ۱۰ مقایسه بین مدل‌های B1 ST-37 تا B3 ST-37 را و همچنین مدل B3 ST-52 بر حسب سختی دورانی اتصال نشان داده شده است:

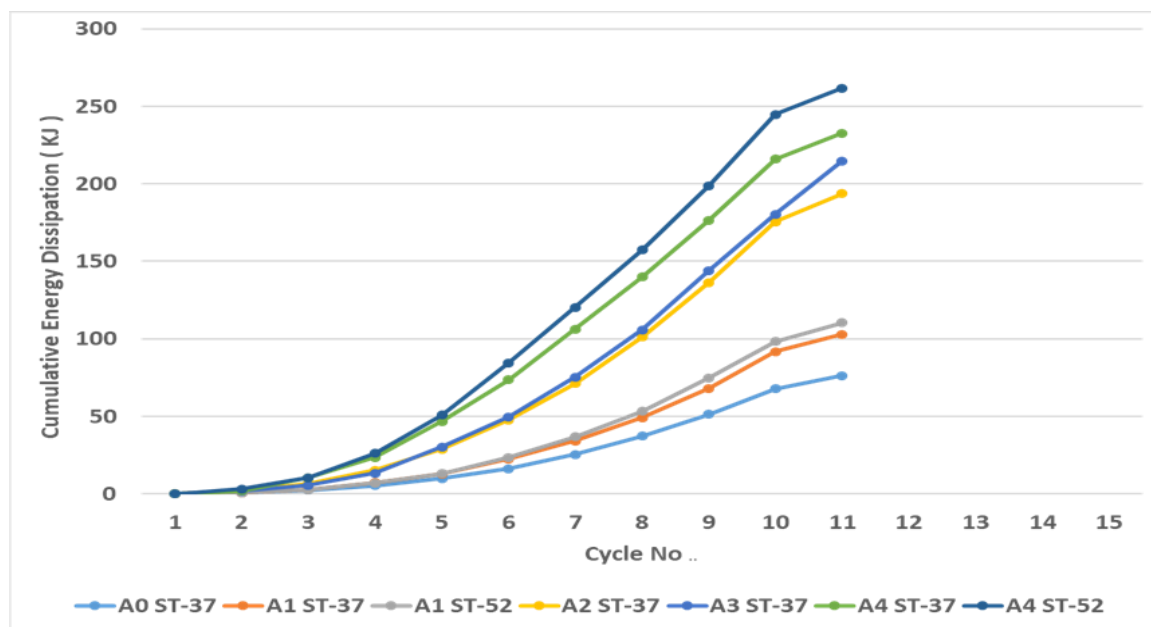
جدول ۱۰: سختی دورانی نمونه‌های B

سختی دورانی اتصال Kn.m/rad	نمونه‌ها
۴۰۱۷۰	B1 ST-37
۴۲۰۰۰	B2 ST-37
۷۲۵۰۰	B3 ST-37
۷۳۶۶۰	B3 ST-52

۳-۴ بررسی جذب انرژی

میزان جذب انرژی در مدل‌های A0 ST-37 تا A4 ST-37 و همچنین A1 ST-52 و A4 ST-52 در شکل ۲۳ نشان داده شده است. جذب انرژی در مدل A4 ST-37 بیشتر از جذب انرژی در مدل‌های A0 ST-37 و A1 ST-37 است. دلیل این امر دستیابی به حلقه‌های هیستریزیس بزرگتر و کامل‌تر و همچنین استفاده از ظرفیت پلاستیک شدگی تیر و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر در مدل A4 ST-37 می‌باشد.

در مدل های A0 ST-37 و A1 ST-37 دلیل جذب انرژی کم بخاطر پلاستیک شدگی کم تیر و گسیختگی زودهنگام بوده است. همچنین جذب انرژی مدل های A1-ST52 و A4 ST-52 بیشتر از مدل های A1 ST-37 و A4 ST-37 می باشد که علت آن استفاده از فولاد ST-52 در ورق انتهایی می باشد.



شکل ۲۳: جذب انرژی در مدل های A0 ST-37 تا A4 ST-37, A1 ST-52, A4 ST-52

در جدول ۱۱ مقایسه بین مدل های A0 ST-37 تا A4 ST-37 و همچنین A1 ST-52 و A4 ST-52 را بر حسب جذب انرژی نشان داده شده است.

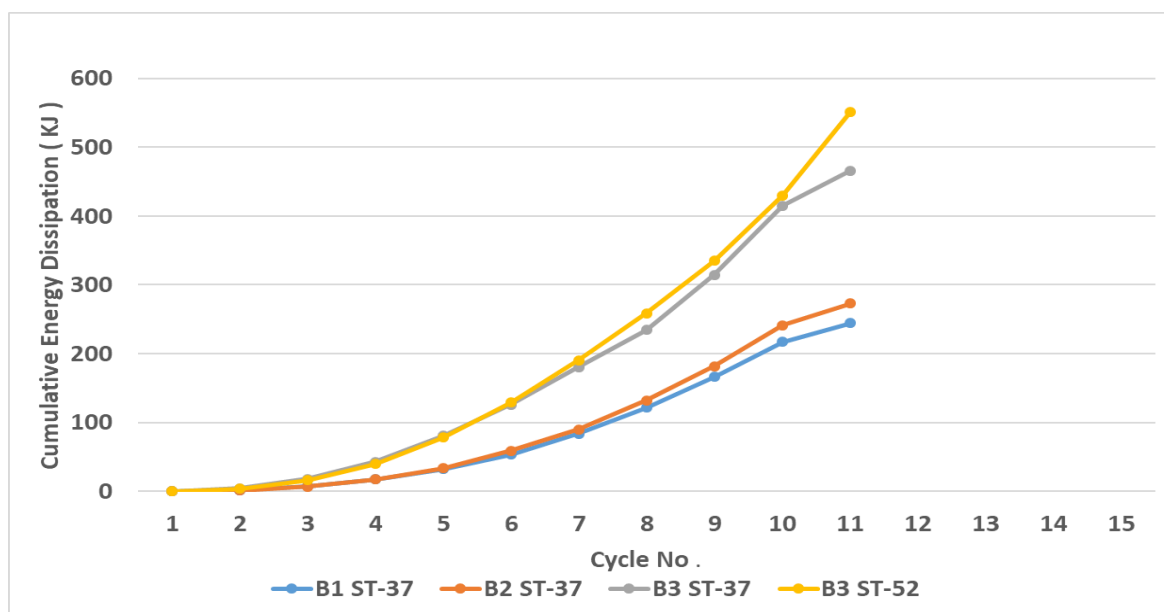
جدول ۱۱: جذب انرژی نمونه های A.

نمونه ها	جذب انرژی اتصال KJ
A0 ST-37	۷۶
A1 ST-37	۱۰۳
A2 ST-37	۱۹۴
A3 ST-37	۲۱۵
A4 ST-37	۲۳۳
A1 ST-52	۱۱۰
A4 ST-52	۲۶۲

میزان جذب انرژی در مدل های B1 ST-37 تا B3 ST-37 و همچنین B3 ST-52 در شکل ۲۴ نشان داده شده است. جذب انرژی در مدل B3 ST-37 بیشتر از جذب انرژی در مدل های B1 ST-37 و B2 ST-37 است. زیرا استفاده از ورق پیوستگی موجب

جلوگیری از کماتش موضعی در بال و جان ستون شده و حلقه های هیستریزیس کامل تر در مدل B3 ST-37 می باشد و در نهایت جذب انرژی بالاتری فراهم شده است.

در مدل های B1 ST-37 و B2 ST-37 دلیل جذب انرژی کم بخاطر پلاستیک شدگی کم تیر و گسیختگی زودهنگام بوده است. همچنین استفاده از فولاد ST-52 جذب انرژی را بالاتر برده است و 19 درصد باعث افزایش جذب انرژی در مدل B3 ST-52 نسبت به مدل B3 ST-37 شده است.



شکل ۲۴: جذب انرژی در مدل های B1 ST-37 تا B3 ST-37 و B3 ST-52

در جدول ۱۲ مقایسه بین مدل های B1 ST-37 تا B3 ST-37 و مدل B3 ST-52 را بر حسب جذب انرژی نشان داده شده است:

جدول ۱۲: جذب انرژی نمونه ای B.

جذب انرژی اتصال KJ	نمونه ها
۲۴۴	B1 ST-37
۲۷۳	B2 ST-37
۴۶۶	B3 ST-37
۵۵۲	B3 ST-52

۵- نتیجه گیری

اتصال A مربوط به تیر با لنگر پلاستیک ۳۰۰ کیلو نیوتن-متر می باشد. در مدل A0 ST-37 که فاقد ورق پیوستگی و ضخامت کافی برای ورق اتصال است ظرفیت خمشی ۱۷۲ کیلو نیوتن-متر است. استفاده از ورق اتصال با ضخامت مناسب، ظرفیت اتصال را به ۲۰۸ کیلو نیوتن-متر رساند ولی کماتش موضعی بال ستون مانع از رفتار هیستریزیس مناسب است. در این حالت استفاده از ورق پیوستگی و لچکی سبب بهبود رفتار غیرخطی و افزایش مقاومت اتصال تا ۲۹۲ کیلو نیوتن-متر شده است. ولی همچنان تسلیم چشمه اتصال و بال

ستون به دلیل ضخامت کم، دلیل اصلی خرابی در این اتصال است. با افزودن ورق مضاعف برای تقویت چشمه اتصال و نیز افزایش ضخامت بال ستون، ظرفیت اتصال به ۳۷۳ کیلو نیوتن متر رسید و حلقه های هیستریزس کاملی بدست آمد. در این حالت رفتار غیرخطی تماما در تیر رخ می دهد و جذب انرژی به حداکثر مقدار رسیده است. همچنین استفاده از فولاد ST-52 باعث افزایش ظرفیت خمشی شده است. در نمونه A1 ST-52 ظرفیت خمشی ۲۲۴ کیلو نیوتن - متر می باشد که نسبت به نمونه A1 ST-37 ۸ درصد افزایش داشته است و در مدل A4 ST-52 این افزایش به ۳ درصد رسیده است.

اتصال B مربوط به تیر با لنگر پلاستیک ۱۰۰۰ کیلو نیوتن-متر می باشد. در مدل B1 ST-37 که از پیچ معمولی استفاده شده و فاقد سخت کننده و ورق پیوستگی است مقاومت خمشی ۶۱۹ کیلو نیوتن-متر بدست آمده است. استفاده از پیچ پر مقاومت، مقاومت خمشی را به ۷۲۰ کیلو نیوتن-متر می رساند ولی همچنان رفتار هیستریزس نامناسب بوده و خرابی در ستون رخ داده است. در ادامه استفاده از ورق پیوستگی و سخت کننده (لچکی) ظرفیت خمشی را تا ۹۹۷ کیلو نیوتن-متر افزایش می دهد. در این حالت حلقه های هیستریزس کامل تر و خرابی به دلیل تسلیم تیر و چشمه اتصال رخ داده است. همچنین استفاده از فولاد ST-52 باعث افزایش ظرفیت خمشی شده است. در نمونه B3 ST-52 ظرفیت خمشی به ۱۰۳۶ کیلو نیوتن-متر می باشد که نسبت به نمونه B3 ST-37، ۴ درصد افزایش داشته است.

برخی از مهم ترین نتایجی که از این تحقیق بدست آمده است به شرح زیر می باشد:

- استفاده از ورق پیوستگی تاثیر بسزایی در جلوگیری از کمناش موضعی جان و بال ستون داشته و سبب بهبود عملکرد غیرخطی و چرخه ای اتصال می گردد و می تواند موجب افزایش شکل پذیری و استهلاک انرژی و افزایش سختی خمشی در محل اتصال شود.
- ضخامت ورق انتهایی که بر اساس روابط گسیختگی محاسبه می شود مقدار مناسبی است. استفاده از ضخامت کمتر سبب کمناش موضعی ورق انتهایی می شود و استفاده از ضخامت بیشتر تاثیر چندانی در ظرفیت خمشی اتصال ندارد.
- استفاده از پیچ های پر مقاومت در اتصال با ورق انتهایی ضروری است. در غیر این صورت پیچ ها دچار تسلیم می شوند که به هیچ وجه مطلوب نیست.
- استفاده از ورق مضاعف در مواردی که جان ستون نازک است برای جلوگیری از تسلیم در چشمه اتصال ضروری است.
- استفاده از لچکی سبب توزیع تنش در محل ورق انتهایی و بال ستون می شود و ظرفیت خمشی را بهبود می بخشد.
- استفاده از فولاد ST-52 در ورق انتهایی ظرفیت خمشی را بهبود می بخشد.
- در صورتی که بال ستون نازک باشد، اتصال خمشی نمی تواند به حداکثر ظرفیت خود برسد و رعایت حداقل ضخامت برای بال ستون الزامی است.
- میزان سختی خمشی اتصالات و سختی دورانی اتصالات و همچنین میزان جذب انرژی در صورت استفاده از ورق پیوستگی، لچکی و ورق مضاعف افزایش می یابد.

مراجع

- [1] Grundy, P., Thomas, I. R. and Bennett, I.D. (1980). "*Beam-to-Column Moment Connections*". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 106, No. ST 1, pp. 3 13-330.
- [2] Tsai, K.C. and Popov, E. P. (1990). "*Cyclic Behavior Of End-Plate Moment Connections*". Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 1 16, No. 1 1, pp. 29 17 – 2930.
- [3] حجازی، مهرداد. و بهداد، حامد. (۱۳۸۸) آنالیز المان محدود و اثرات ورق های تقویتی در اتصالات تیر به ستون فلنجی. هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
- [4] Joshi, prasanna. and Solanki , J G. (2014). "*COMPUTATIONAL MODELLING OF INDIAN STANDARD EXTENDED END PLATE MOMENT CONNECTION*". International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science www.ijates.com. Volume No.02, Issue No ۰۷ ISSN (online): 2348-7550. Page | 417
- [5] Rajeshkumar.B., Dr. YaminiSreevalli,i.(2013). "*Behaviour of Bolted Endplate Connection under Elevated Temperature*". International Journal of Research in Civil Engineering, Architecture & Design Volume 1, Issue 1, July-September, 2013, pp. 51-55, © IASTER 2013 www.iaster.com, ISSN Online: 2347-2855.
- [6] Balc, Roxana. (2012). "*Numerical models of welded and bolted beam to column connections*". Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture Vol. 55, No1.
- [7] Baei, Mahmoud. and Ghassemieh, Mehdi. and Goudarzi, Alireza. (2012). "*Numerical Modelling of End-Plate Moment Connection Subjected to Bending and Axial Forces*". The Journal of Mathematics and Computer Science Vol. 4No.3 (2012) 463 – 472.
- [8] Ismail, R. E. S. and Fahmy, A.S. and Khalifa ,A. M. and Mohamed ,Y. M. (2015). "*Numerical Study on Ultimate Behaviour of Bolted End-Plate Steel Connections*". Latin American Journal of Solids and Structures.
- [9] Saberi, Vahid. and Gerami, Mohsen. and Kheyroddin, Ali. (2014) "*Comparison of bolted end plate and T-stub connection sensitivity to component thickness*". Journal of Constructional Steel Research 98 ,134–145.
- [10] Dessouki, Abdelrahim Khalil. and Youssef, Ahmed Hassan. and Ibrahim, Mohamed Mostafa. (2013). "*Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections*". Ain Shams Engineering Journal 4, 685–699.
- [11] Ghassemieh, Mehdi. and Nasser, Mohsen. (2012). "*Evaluation of Stiffened End-Plate Moment Connection through Optimized Artificial Neural Network*". Journal of Software Engineering and Applications, 5, 156-167.
- [12] Chen, Xuesen. and Shi, Gang. (2016). "*Finite element analysis and moment resistance of ultra-large capacity. end-plate joints*". Journal of Constructional Steel Research 126 , 153–162..
- [13] Wang, Meng. and Shi, Yongjiu. and Wang, Yuanqing. and Shi . Gang. (2013). "*Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections*", Journal of Constructional Steel Research 90 (2013) 140–152.
- [14] Guo, Bing. and Gu, Qiang. and Liu, Feng .(2006). "Experimental Behavior of Stiffened and Unstiffened End-Plate Connections under Cyclic Loading", JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING © ASCE

