

مطالعه آزمایشگاهی و عددی رفتار چرخه‌ای اتصالات خمشی تیر به ستون جعبه‌ای مقاوم‌سازی شده با ورق سخت‌کننده مثلثی

سیدمحمد رضا فاروقی مهر^۱، محمدسهیل قبادی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

با توجه به اهمیت عملکرد لرزه‌ای اتصالات خمشی و مشکلات و معضلات موجود در اجرای این نوع اتصال، ارائه‌ی یک طرح کارآمد و صحیح برای مقاوم‌سازی آن‌ها، کمک شایان‌ذکری به از بین بردن مشکلات آن خواهد کرد. با فرض اینکه در هنگام اجرای جوش شیاری بانفوذ کامل برای اتصال ورق روسری، جوش کیفیت لازم را نداشته باشد و در حد جوش گوشه عمل کند، نیاز به مقاوم‌سازی به‌طور مشخص آشکار می‌شود. به همین منظور، می‌توان با استفاده از ورق سخت‌کننده مثلثی (لچکی) و اتصال آن به ورق روسری و ستون، عملکرد لرزه‌ای آن را بهبود بخشید و به‌عنوان طرح مقاوم‌سازی انتخاب نمود. برای اثبات این موضوع نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت. سپس با انجام مطالعات عددی صحت سنجی آن نیز بررسی شد. با استفاده از مفاهیم بنیادی مقاومت مصالح روشی جهت طراحی لچکی ارائه گردید. به همین دلیل، آنالیز حساسیت با بررسی چندین نمونه‌ی عددی برای صحت‌سنجی روش طراحی پیشنهادی انجام شد. عواملی نیز وجود دارند که می‌توانند در عملکرد لرزه‌ای روش مذکور جهت مقاوم‌سازی این نوع اتصال اثرگذار باشند از جمله‌ی این عوامل می‌توان به تعداد و ضخامت سخت‌کننده‌ها و همچنین نسبت عرض به ضخامت ستون‌های جعبه‌ای اشاره کرد که با مطالعات عددی به بررسی آنها پرداخته شد. استفاده از ستون جعبه‌ای در ادبیات فنی به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است؛ با این حال، استفاده از آن به‌عنوان جایگزین ستون‌های بال‌پهن رایج است. بنابراین، در مقاله پیش‌رو سعی شد با در نظرگیری مورد ذکر شده و مطالعات عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته، تمامی جوانب موجود در طرح مقاوم‌سازی مذکور بررسی گردد. نتایج نشان داد که نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، از مکانیزم شکل‌پذیر برخوردار هستند. به علاوه، در بررسی تعداد لچکی، این نتیجه حاصل شد که تعداد لچکی‌ها و ضخامت آن‌ها اثر قابل توجهی در بال ستون دارد و می‌توان با انتخاب تعداد مناسب از عملکرد نیرو-کنترل آن اطمینان حاصل کرد.

کلمات کلیدی: لچکی، مقاوم‌سازی، عملکرد لرزه‌ای، نمودار هیستریزیس، ستون جعبه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2017.92653.1263	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2017.92653.1263	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	۱۳۹۶/۰۸/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۱۹	۱۳۹۶/۰۸/۰۱	۱۳۹۶/۰۴/۲۶
محمدسهیل قبادی				* نویسنده مسئول:	
msgjobadi@eng.ikiu.ac.ir				پست الکترونیکی:	

Cyclic Behavior of Reinforced Welded Flange Plate Moment Connections with Triangular stiffener Plates

Seyed Mohammadreza Farooghimehr¹, Mohammad Soheil Ghobadi^{2*}

1-M.Sc. in Earthquake Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2-Assistant professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

Regarding the importance of seismic performance and also the problems of moment connections, representing an accurate and efficient scheme to reinforcing could be useful to eliminate these problems. Assuming that (CJP) welds between top flange plate and column face have poor quality or strengthened like fillet welds, the need of reinforcing becomes obvious. For that reason, by using triangular stiffener plate for joining to column face and top flange plate, the seismic behavior could be improved and possible to opt as a reinforcing scheme. To prove that, the experimental specimen was created and investigated. Then, validation was employed with the numerical model of one. By applying the basic concepts of the mechanic of materials, the design of triangular plate was expressed. Along with that, sensitivity analysis with studying on several numerical models carried out to show the accuracy of the proposal procedure design. Moreover, some factors effect on the seismic behavior of this scheme including numbers of stiffener plate, the thickness of stiffener plate, and the width to thickness ratio of box column. While using the box column in literature is rare, it replaces with H-shape column mostly in some countries like Iran. So, this paper tries to consider these cases to cover all aspects of this reinforcing scheme. The results showed this procedure could enhance the seismic behavior of defective moment connections.

ARTICLE INFO

Received: 17/07/2017

Revised: 23/10/2017

Accepted: 10/11/2017

Keywords:

Triangular stiffener plate,
Reinforcing,
seismic behavior,
Hysteresis diagram,
Box column

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.92653.1263

*Corresponding author: Mohammad Soheil Ghobadi

Email address: msghobadi@eng.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

وقوع زلزله نورث ریج در سال ۱۹۹۴ با خرابی‌های گسترده‌ای به‌طور مشخص در سازه‌های فولادی همراه بود. اتصالات خمشی موجود در قاب‌های خمشی دچار آسیب‌دیدگی‌های قابل توجهی از جمله ترک در جوش شیاری بانفوذ کامل شدند که منجر به تردشکن بودن این قبیل اتصالات شد. این در حالیست که از این اتصالات توقع شکل‌پذیری قابل توجهی در قاب‌های خمشی ویژه می‌رفت؛ بنابراین با توجه به مشاهدات به‌دست‌آمده و تحقیقات صورت گرفته، این نوع اتصالات معیوب بوده و نیاز به مقاوم‌سازی داشتند. براساس نتایج بدست آمده از تحقیقات پژوهشگران، مبنایی برای طراحی این اتصالات و هم‌چنین مقاوم‌سازی آنها ارائه داده شد که شامل دو ایده بود: (۱) تقویت اتصال (۲) تضعیف تیر که اساس آئین‌نامه‌های امروزی از جمله AISC در بخش طراحی لرزه‌ای می‌باشد [۱]. در همین راستا، یکی از روش‌های مقاوم‌سازی رایج استفاده از ورق مثلثی به‌عنوان سخت‌کننده می‌باشد که می‌توان به استفاده از لچکی^۱ اشاره کرد که یک روش کارآمد و به‌صرفه است. مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی مقاوم‌سازی با این روش به دو مورد لچکی دارای انحنا - قسمت طولی و لچکی به شکل مثلثی تقسیم می‌شود.

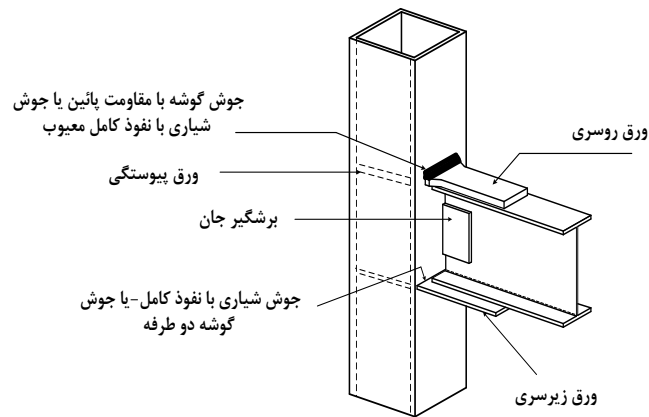
Chen و همکاران [۲-۵] پژوهشی با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و مطالعات عددی بر روی اتصالات خمشی پیش از زلزله نورث ریج در ستون‌های بال‌پهن و هم‌چنین ستون‌های جعبه‌ای و مقاوم‌سازی آنها با قطعه‌ی دارای انحنا - قسمت طولی و لچکی به شکل مثلثی داشتند. مطالعات آنها نشان داد که این قطعه کمک قابل توجهی به کاهش تمرکز تنش در ناحیه‌ی سوراخ دسترسی جوش می‌کند. هم‌چنین، مطالعات عددی کاهش میزان کرنش پلاستیک معادل را در این طرح پیشنهادی جهت مقاوم‌سازی نشان داده است. از طرفی، با جابه‌جایی مفصل پلاستیک از بر ستون به تیر، عملکرد لرزه‌ای این روش مقاوم‌سازی برای این قبیل اتصالات را قابل قبول ارزیابی کرده‌اند. مطالعاتی در زمینه لچکی مثلثی توسط LEE و همکاران [۱، ۶] با ایجاد نمونه‌ی آزمایشگاهی و صحت‌سنجی آنها صورت گرفته است. در مطالعات آنها پیشنهاد شده که قطعه‌ی مثلثی با ساده‌سازی صورت گرفته‌شده به یک عضو محوری معادل تبدیل شود که با استفاده از این مفهوم، روابطی برای طراحی قطعه و جوش توسط آنها مطرح گردید. نمونه‌های عددی و تحلیل‌های مربوطه با تمرکز بر بررسی تئوری تیر انجام شد. مطالعات آنها نشان داد که مکانیزم انتقال نیرو در اتصالات مقاوم‌سازی شده توسط این قطعه با استفاده از تئوری تیر قابل اعتماد نیست.

پژوهش‌هایی با به کارگیری ستون جعبه‌ای در بررسی اتصالات پیش از زلزله‌ی نورث ریج [۷] و هم‌چنین، برای بررسی سخت‌کننده‌های کناری [۸، ۹] صورت گرفته است. به علاوه، تحقیقاتی در زمینه‌ی اتصالات از پیش تأیید شده در ستون جعبه‌ای [۱۰، ۱۱] و هم‌چنین اثر روش جوش کاری در توزیع تنش پسماند در ستون جعبه‌ای در مطالعه‌ی [۱۲] بررسی شده است. ولی به دلیل عدم مطالعه‌ی دقیق و پارامتریک بر روی ستون جعبه‌ای در مقاوم‌سازی اتصالات خمشی به کمک لچکی، این تحقیق برنامه‌ریزی گردید. طراحی دقیق سخت‌کننده‌های مثلثی، اثر ضخامت آنها بر رفتار ستون جعبه‌ای و تعداد مؤثر سخت‌کننده‌های مثلثی در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. پتانسیل شکست نقاط حساس جوش و عملکرد لرزه‌ای اتصال به کمک تحقیق آزمایشگاهی و عددی بررسی گردید که جزئیات آن در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

۲- روش طراحی

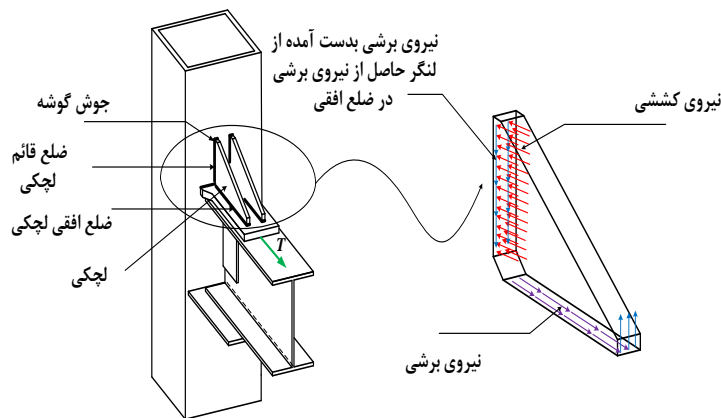
با توجه به اینکه اساس تحقیق پیش‌رو ارائه‌ی روش مقاوم‌سازی می‌باشد، نیاز به نمونه‌ی معیوب جهت این امر مشهود است. در همین راستا، نمونه‌ای که قبادی و همکاران [۱۳، ۱۴] در تحقیقات خود مورد بررسی قرار داده و هم‌چنین آزمایش کرده‌اند، به‌عنوان نمونه‌ی مرجع جهت مقاوم‌سازی انتخاب شد. نقص موجود در جوش اتصالات، مشکل اجرایی رایج در ایران می‌باشد. بر همین اساس، ورق روسری باید با استفاده از جوش شیاری بانفوذ کامل به ستون متصل شود؛ در برخی موارد این جوش ناقص بوده و یا جوش گوشه به جای جوش شیاری استفاده شده که مقاومت کافی ندارد. (شکل ۱).

^۱ Rib



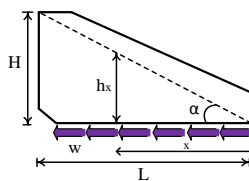
شکل ۱: شکل شماتیک اتصال معیوب

بر همین اساس، عملکرد لرزه‌ای این اتصال با توجه به آزمایش صورت گرفته و مشاهدات و خروجی آن به شدت تحت تأثیر این مشکل اجرایی بوده و شرایط آئین‌نامه‌ای [۱۵، ۱۶] جهت تأیید به‌عنوان یک اتصال تیر به ستون در قاب‌های خمشی ویژه را دارا نمی‌باشد. برای طراحی لچکی سعی شد با توجه به نیروهای به وجود آمده در آن، روشی تحلیلی ارائه گردد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص شده، نیروهای موجود در لچکی شامل نیروهای برشی و کششی می‌باشند؛ به این ترتیب که نیروی محوری حاصل از لنگر پلاستیک مورد انتظار تیر باعث ایجاد نیروی برشی در ضلع افقی لچکی می‌شود این در حالی است که همین نیرو تمایل دارد در ضلع قائم نیروی کششی ایجاد کند. از طرفی، نیروی برشی موجود در ضلع افقی به دلیل وجود خروج از مرکزیت نسبت به ضلع قائم سبب ایجاد لنگر در ضلع قائم می‌شود ولی به دلیل مقید بودن ضلع افقی، این لنگر تبدیل به نیروی برشی در ضلع قائم می‌شود.



شکل ۲: جزئیات تقویت به‌وسیله‌ی لچکی و دیاگرام نیروهای اعمال شده به آن

سهام نیروی برشی در مقابل نیروی کششی موجود در ضلع قائم اندک است. شکل ۳ مفهوم طراحی لچکی برای لنگر به وجود آمده از نیروی برشی در ضلع افقی را نشان می‌دهد. به کمک فرمول‌های (۱) تا (۷) نیروی برشی در ضلع قائم به دست می‌آید.



شکل ۱: هندسه ی لچکی

$$P = w \times L \rightarrow w = \frac{P}{L} \quad (1)$$

$$\frac{H}{L} = \tan \alpha \rightarrow \text{Arctan} \frac{H}{L} = \alpha \quad (2)$$

$$\frac{h_x}{x} = \tan \alpha \rightarrow h_x = x \tan \alpha \quad (3)$$

$$M_x = w \times \frac{h_x}{2} \rightarrow M = \int_0^L w \times \frac{h_x}{2} dx \quad (4)$$

$$M = \int_0^L w \times \frac{x \tan \alpha}{2} dx = \int_0^L \frac{P}{L} \times \frac{\tan \alpha}{2} x dx = \frac{P}{L} \times \frac{\tan \alpha}{2} \times \frac{L^2}{2} \quad (5)$$

$$M = \frac{P}{4} \times L \times \tan \alpha = \frac{PH}{4} \quad (6)$$

$$F_v, \text{ due to } m = \frac{M}{L} \quad (7)$$

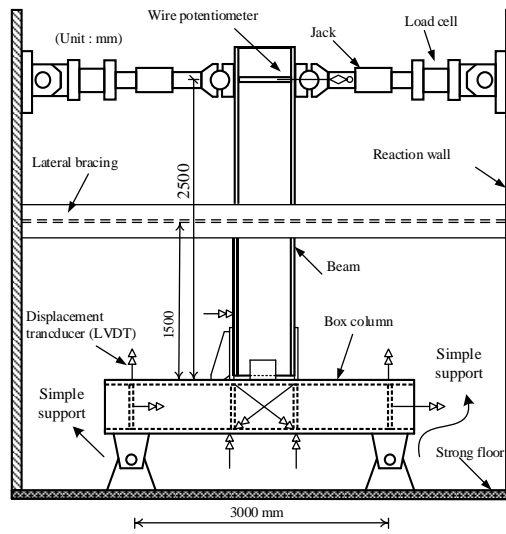
که در فرمول‌های بالا P نیروی برشی در ضلع افقی، w نیروی برشی خطی در ضلع افقی، L طول ضلع افقی، H طول ضلع قائم، α زاویه گوشه لچکی و M لنگر ناشی از نیروی برشی موجود در ضلع افقی می‌باشد.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

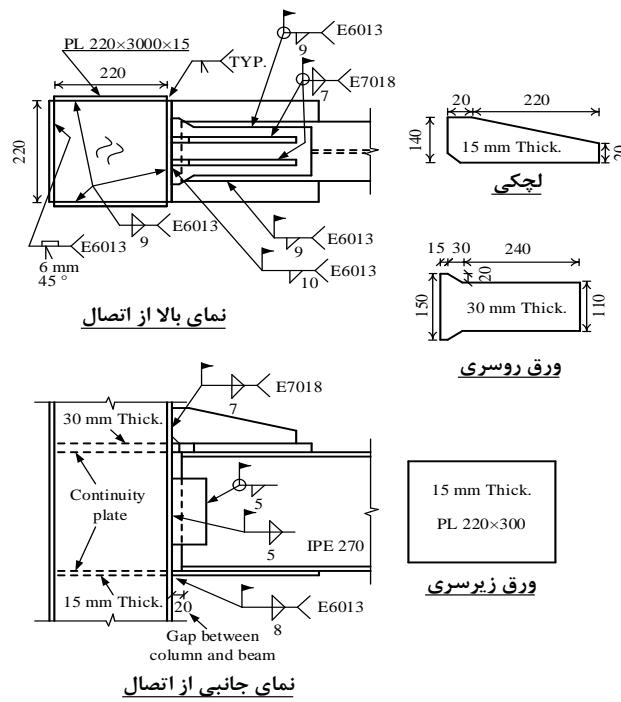
برای ساخت نمونه آزمایشگاهی از فولاد سازه‌ای رایج در کشور (ST37) استفاده شد. همچنین تیر مورد استفاده از پروفیل‌های معمول (IPE) است. ستون‌های جعبه‌ای به دلیل برخورداری از عملکرد مناسب در خمش دوماحوره در مناطق با خطرپذیری زیاد و خیلی زیاد و همچنین در نبود پروفیل‌های بال‌پهن در کشور قابل استفاده است [۱۷]. برای طراحی اتصال ابتدا از قطعات موجود آزمایش کشش برای تعیین مقاومت‌های تسلیم و نهایی گرفته شد (جدول ۱). با توجه به مورد ذکر شده، نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده‌ی اتصال معیوب (RC6) طراحی و ساخته شد (شکل ۴). برای طراحی اعضای اتصال با توجه به در نظر گرفتن آن در قاب خمشی ویژه ضوابط طراحی لرزه‌ای موجود در مبحث دهم که انطباق قابل توجهی با آئین‌نامه‌ی آمریکا دارد [۱۵، ۱۶ و ۱۸] به کار گرفته شد (شکل ۵).

طراحی قطعه‌ی لچکی مطابق با مفاهیم اشاره‌شده صورت گرفت. باید به این نکته اشاره کرد که در طراحی جوش‌ها مقاومت جوش گوشه‌ی عرضی ۱،۵ برابر مقاومت جوش گوشه‌ی طولی مطابق با آئین‌نامه جوش آمریکا در نظر گرفته شد [۱۹]. در این پروژه از الکتروود E6۰۱۳ و E۷۰۱۸ برای جوش و یا اتصال قطعات استفاده گردید. الکتروود E۷۰۱۸ به‌عنوان فلز جوش با چقرمگی بالا شناخته می‌شود که حداقل چقرمگی شارپی^۲ ۷۰ ژول در ۳۰- درجه سانتی‌گراد را دارا می‌باشد [۲۰]. از این‌رو، این نوع از فلز جوش مناسب برای جوش نقاط حساس می‌باشد؛ در همین راستا، برای جوش لچکی به ورق بال ستون و ورق روسری از آن استفاده شد. برای سایر جوش‌ها که به‌عنوان جوش موجود یا قدیمی در نظر گرفته می‌شدند از الکتروود رایج E6۰۱۳ استفاده گردید.

² Charpy V notch toughness



شکل ۴: شکل شماتیک ابزاربندی نمونه آزمایشگاهی (RC6)

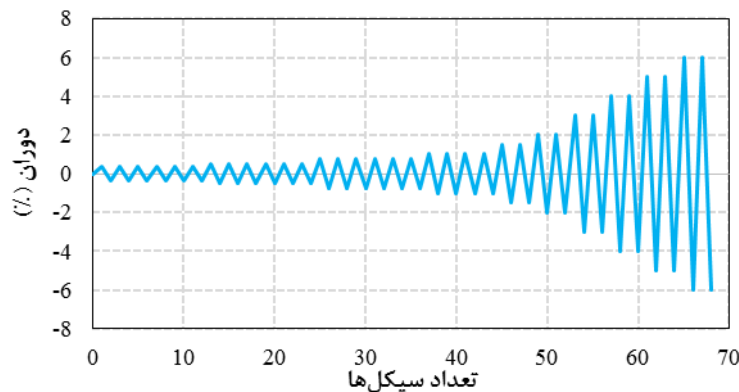


شکل ۵: مشخصات قطعات نمونه‌ی آزمایشگاهی (RC6)

جدول ۱: نتایج آزمایش کشش

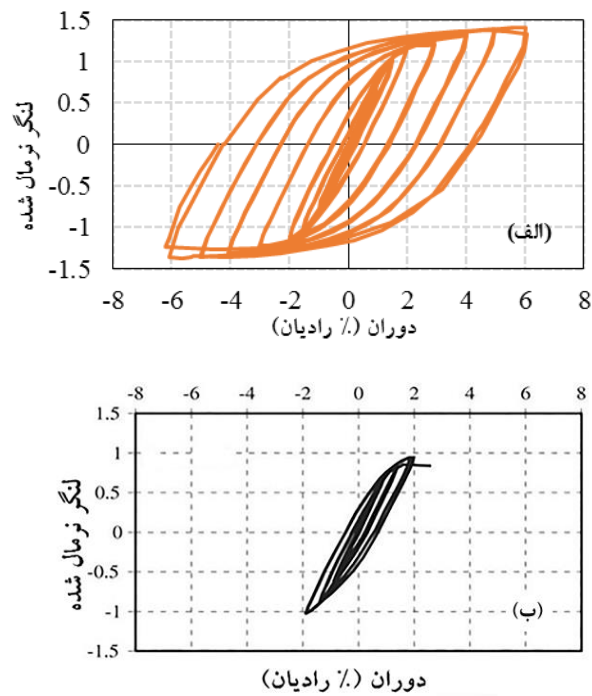
اعضا	F_y (Mpa)	F_u (Mpa)	F_y / F_u	کشیدگی (%)
بال تیر (ST-۳۷)	۳۱۱	۴۳۸	۰.۷۱	۲۲
جان تیر (ST-۳۷)	۳۳۴	۴۶۴	۰.۷۲	۳۰
ورق روسری (۳۰ میلی متر ضخامت)	۲۶۷	۴۲۴	۰.۶۳	۲۷
ورق ستون، ورق زیرسری و لچکی (۱۵ میلی متر ضخامت)	۳۲۰	۴۶۰	۰.۶۹	۲۷
الکتروود E۶۰۱۳ - قطر ۴ میلی متر	۴۶۰	۵۲۲	۰.۸۸	۴
الکتروود E۷۰۱۸ - قطر ۴ میلی متر	۵۴۰	۶۲۷	۰.۸۶	۱۶

برای پیاده سازی شرایط زلزله، بارگذاری چرخه ای موجود در آئین نامه ی طراحی لرزه ای آمریکا [۱۵] استفاده گردید (شکل ۶). این نوع از بارگذاری برای بررسی اتصال خمشی تیر به ستون در نظر گرفته شده است. مطابق با این آئین نامه، برای بررسی اتصال خمشی از نوع ویژه، اتصال باید تا دوران ۴ درصد بارگذاری شود ولی می توان به ازای یک درصد افزایش دوران، دو سیکل به آن اضافه کرد. بنابراین در این آزمایش به ازای افزایش دوران از ۴ تا ۶، دو سیکل به ازای هر یک به آزمایش اضافه شد.

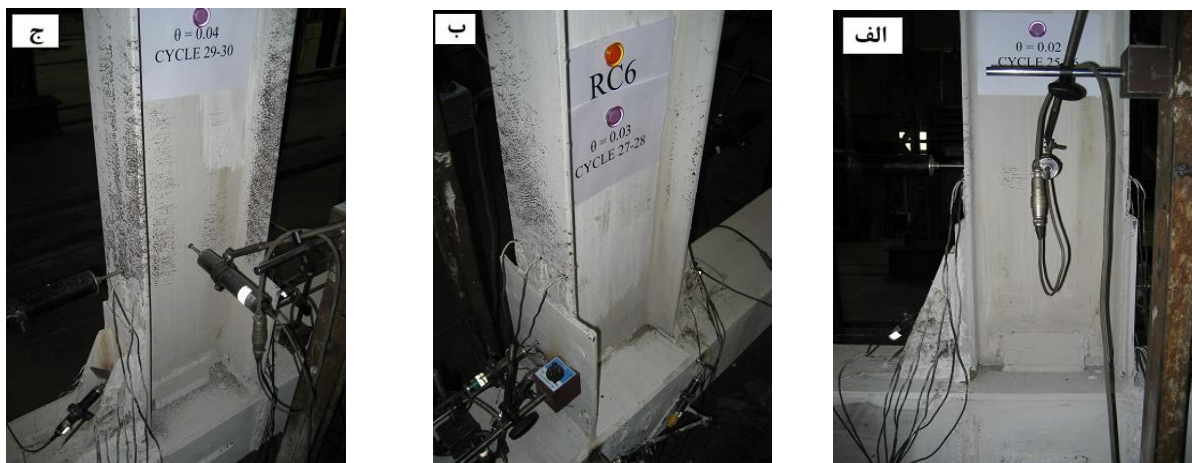


شکل ۶: تاریخچه بارگذاری چرخه ای

همان طور که نمودار هیستریزیس (شکل ۷) اتصال آزمایش شده نشان می دهد، اتصال از نوع اتصال پر مقاومت بوده و علاوه بر تحمل دوران های بیشتر از حد آئین نامه ای (۴٪)، با کاهش مقاومت بسیار ناچیزی روبه رو بوده است. مطالعاتی در زمینه مقاوم سازی اتصالات خمشی با ورق کناری صورت گرفته است [۲۱] که علی رغم تفاوت در اتصال ورق، نتیجه مشابه به این مورد حاصل شده است.



شکل ۸ رفتار اتصال را در دوران‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهدات حاکی از عدم ایجاد ترک در نواحی با تمرکز تنش یا تنش بالا می‌باشد. از طرفی، مفصل پلاستیک در تیر و در فاصله‌ای مشخص از وجه ستون تشکیل شده است که بیانگر عملکرد لرزه‌ای مناسب از دیدگاه طراحی لرزه‌ای می‌باشد. آزمایش مذکور در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شده است.



شکل ۸: عملکرد نمونه‌ی آزمایشگاهی در دوران مختلف



ادامه شکل ۸ :

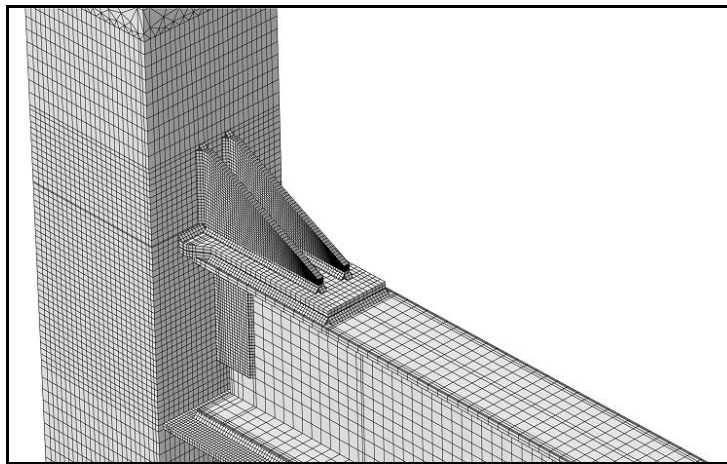
۴- مطالعات عددی

با ایجاد مدل‌های عددی یا تحلیلی می‌توان صحت سنجی و هم‌چنین مطالعه‌ی دقیق نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش را بررسی کرد. از طرفی، این مدل‌ها امکان بررسی نقاط حساس با تمرکز تنش و میزان کرنش بالا و هم‌چنین آنالیز حساسیت در راستای بررسی پارامترهای دخیل را فراهم می‌سازد. در همین جهت، جنبه‌ی تحلیلی این پژوهش به سه قسمت تقسیم می‌شود: (۱) بررسی صحت سنجی مدل عددی نمونه‌ی آزمایش‌شده (۲) مطالعه‌ی پارامتریک بر روی قطعه‌ی لچکی برای صحت سنجی روش طراحی ارائه‌شده (۳) مطالعه پارامتریک بر روی ستون جعبه‌ای به همراه ترکیب تعداد و ضخامت لچکی. در بخش مدل‌های عددی به‌طور کلی ۳۰ مدل تمام‌مقیاس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای با سیکل‌های کامل [۱۵] قرار گرفت.

۴-۱- بررسی صحت‌سنجی مدل عددی نمونه‌ی آزمایش‌شده

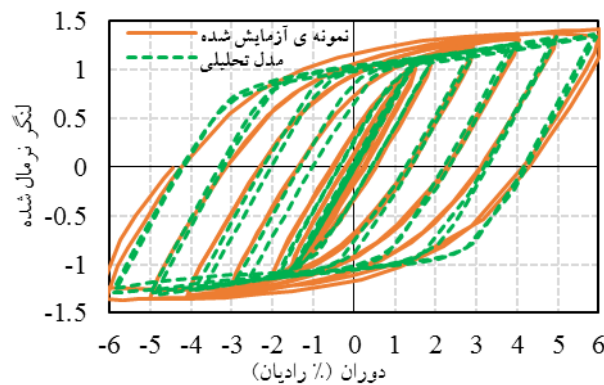
مدل عددی نمونه‌ی آزمایش‌شده به‌وسیله‌ی نرم‌افزار آباکوس به‌عنوان یک برنامه اجزاء محدود ساخته شد [۲۲]. المان‌های سالیید هشت‌گه‌ای و به‌صورت انتگرال کامل (C3D8) برای مدل‌سازی قطعات از جمله جوش‌ها استفاده گردید. به دلیل کاهش زمان تحلیل و هم‌چنین وجود نقاط با تنش پائین یا اهمیت کمتر، با استفاده از المان‌های چهاروجهی (C3D4) ناحیه‌ی انتقالی جهت ایجاد المان‌های سالیید با مش بزرگ‌تر ایجاد گردید. از طرفی، با توجه به مدل‌سازی جوش‌ها در نمونه‌های عددی و هم‌چنین حصول نتایج دقیق‌تر، مش بندی ریزتر به جوش‌ها اختصاص داده شد (شکل ۹).

مشخصات مکانیکی مصالح به‌کاررفته در مدل عددی بر اساس نتایج آزمایش کشش می‌باشد. نمودار تنش-کرنش آنها به شکل دوخطی و با در نظرگیری سخت‌شوندگی کینماتیکی در نظر گرفته شد هم‌چنین مقدار نسبت پواسون ۰٫۳ انتخاب شد. برای تطابق با شرایط واقعی اثر نقص اولیه با استفاده از تحلیل کماتش و در نظر گرفتن مدهای آن اعمال گردید. تنش فون میسز به‌عنوان معیار پلاستیسیته انتخاب شد.



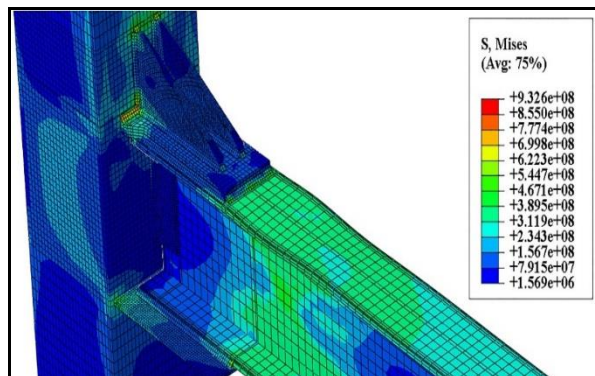
شکل ۹: الگوی مش بندی

شکل ۱۰ مقایسه‌ی نمودار هیستریزیس مدل عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تطابق قابل قبولی بین این دو نمودار وجود دارد از این جهت توزیع تنش و کرنش مدل عددی تا حد زیادی با نمونه‌ی واقعی مطابقت دارد.



شکل ۱۰: مقایسه‌ی نمودار هیستریزیس مدل عددی و نمونه‌ی آزمایش شده (RC6)

شکل ۱۱ توزیع تنش فون میسز و همین‌طور تغییر شکل مدل در انتهای بارگذاری (دوران ۶ درصد) را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر عملکرد لچکی در بهبود این نوع اتصال خمشی، مدل بدون لچکی ساخته شد تا وضعیت جوش شیاری با نفوذ کامل معیوب و یا در حالت بحرانی‌تر، جوش گوشه با مقاومت پائین ورق روسری به ستون در دو حالت با لچکی و بدون لچکی مطالعه شود. تحلیل اجزاء محدود به‌کاررفته در این تحقیق بر پایه‌ی حل رابطه‌ی سختی حاکم بر تحلیل استاتیکی است که توسط الگوریتم نیوتن - رافسون به بررسی همگرایی تفاضل نیروهای خارجی و داخلی به وجود آمده پرداخته می‌شود و در پایان هر همگرایی نتایج ثبت می‌شود؛ بنابراین، با توجه به این نوع تحلیل مواردی هم‌چون نقاط با پتانسیل شکست یا ترک باید با استفاده از پارامترهایی مشخص بیان شود.



شکل ۱۱: توزیع تنش فون میسز و تغییر شکل در انتهای بارگذاری مدل عددی نمونه‌ی آزمایش شده (واحد: Pa)

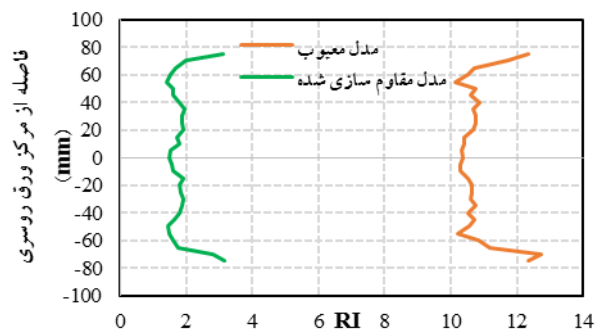
به همین منظور باید پارامتری وجود داشته باشد که بیانگر وضعیت نقاط حساس در دوران‌های مختلف (مخصوصاً ۴ درصد) باشد و بتوان بر اساس آن رفتار شکل‌پذیر یا ترد را تعیین کرد. در همین راستا پارامتر شاخص شکست^۳ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. شاخص شکست به عنوان پارامتری برای ارزیابی پتانسیل شکست شکل‌پذیر قطعات فولادی شناخته می‌شود. هرچه میزان شاخص شکست کمتر باشد پتانسیل رفتار شکل‌پذیر بیشتر است. اولین بار در یک پروژه‌ی تحقیقاتی با تمرکز بر مطالعه‌ی خواص مواد فولادی مطرح شد [۲۳]. پژوهشگران دیگری [۲۴، ۲۵] از این پارامتر در مطالعات خود بر روی اتصالات مختلف استفاده کردند. شاخص شکست مطابق فرمول ۸ تعریف می‌شود:

$$RI = \frac{\varepsilon_p / \varepsilon_y}{\exp(-1.5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})} \quad (8)$$

$$PEEQ Index = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p}}{\varepsilon_y} \quad (9)$$

که در آن ε_p ، ε_y ، σ_m ، σ_{eff} ، به ترتیب کرنش پلاستیک معادل، کرنش تسلیم، تنش هیدرواستاتیک، تنش معادل (که به عنوان تنش فون میسز شناخته می‌شود) می‌باشند. نسبت کرنش پلاستیک معادل به کرنش تسلیم (فرمول ۹) که در صورت کسر فرمول ۸ نمایان است معرف شاخص PEEQ می‌باشد. این شاخص مقیاسی برای اندازه‌گیری میزان تقاضای کرنش پلاستیک محلی است. که در آن ε_{ij}^p کرنش پلاستیک در عضو در جهت i و j است. با توجه به پارامتر تعریف شده برای بررسی عملکرد لچکی در مقایسه با مدلی که لچکی وجود ندارد، شاخص شکست در جوش معیوب ورق روسری در دو مدل با یکدیگر مقایسه شد. همان‌طور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد مقدار شاخص شکست در جوش معیوب در مدل بدون لچکی عدد قابل توجهی است و در مقابل در مدل تقویت شده به وسیله‌ی لچکی میزان این پارامتر کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. در نتیجه، مقاوم‌سازی به روش مذکور عملکرد این نوع اتصال معیوب را بهبود می‌بخشد.

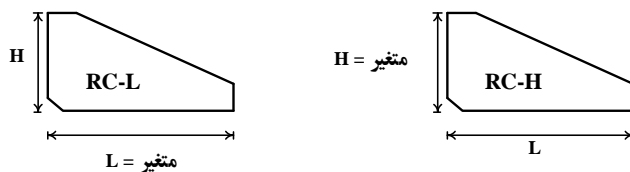
³ Rupture Index



شکل ۱۲: مقایسه‌ی شاخص شکست در مدل تقویت شده به وسیله‌ی لچکی و مدل معیوب در جوش ورق روستری

۲-۴- مطالعه‌ی پارامتریک بر روی قطعه‌ی لچکی برای صحت سنجی روش طراحی ارائه شده

برای کنترل صحت روش طراحی ارائه شده در این تحقیق آنالیز حساسیت بر روی لچکی صورت گرفت. برای این منظور، مدل‌هایی در دو دسته ساخته شدند؛ دسته‌ی اول با در نظر گرفتن اندازه‌ی طراحی شده ضلع قائم لچکی به همراه نسبت‌های مختلفی از اندازه‌ی طراحی شده‌ی ضلع افقی و دسته‌ی دوم دقیقاً برعکس (شکل ۱۳ و جدول ۲). سایر اجزاء، مطابق نمونه‌ی آزمایشگاهی می‌باشد. در نتیجه دوازده مدل عددی برای تحلیل حساسیت قطعه‌ی مثلثی در جهت بررسی اندازه‌های به دست آمده از روش طراحی ارائه شده، ساخته شد.



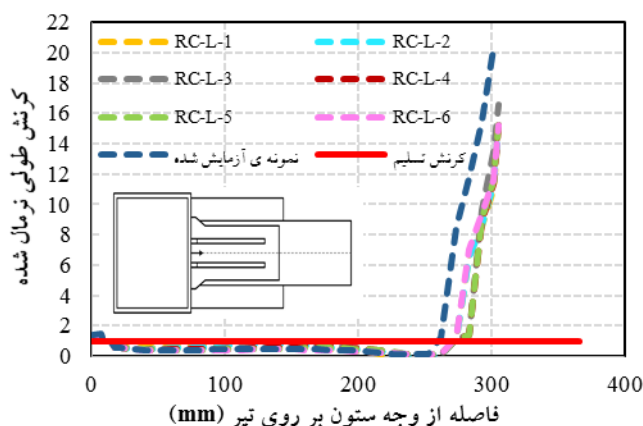
شکل ۱۳: هندسه‌ی شمانیک لچکی برای مطالعه‌ی پارامتریک

جدول ۲: مشخصات هندسی لچکی برای مطالعه‌ی پارامتریک

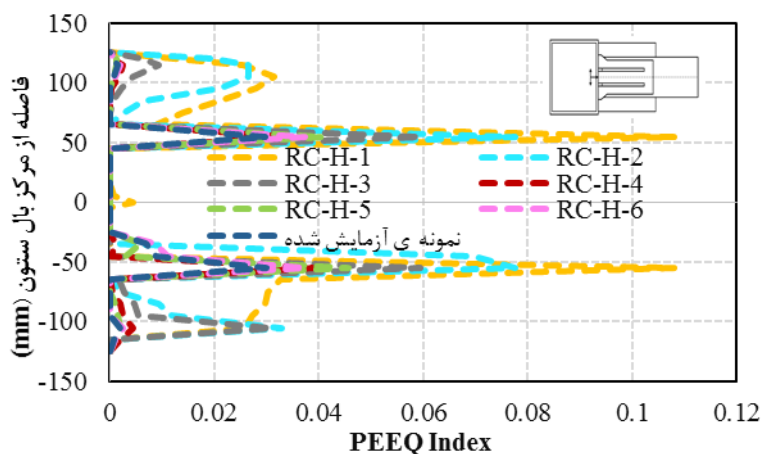
اسم نمونه‌ها						ضلع لچکی
RC-L-1	RC-L-2	RC-L-3	RC-L-4	RC-L-5	RC-L-6	ضلع افقی (L)
0.5L	0.6L	0.7L	0.8L	0.9L	1.1L	
RC-H-1	RC-H-2	RC-H-3	RC-H-4	RC-H-5	RC-H-6	ضلع قائم (H)
0.5H	0.6H	0.7H	0.8H	0.9H	1.1H	

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در مدل‌هایی که ضلع افقی به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده، با فاصله گرفتن از برستون در خط مرکزی تیر کرنش طولی نرمال شده کاهش می‌یابد؛ به این معنا که با نزدیک شدن به مقدار طراحی شده (نمونه آزمایش شده) در دوران ۴ درصد، اتصال کرنش کمتر از کرنش تسلیم را تجربه می‌کند. در نوک ورق روستری و ادامه‌ی آن در خط مرکزی تیر کرنش افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی تشکیل مفصل پلاستیک در مکان مناسب در نمونه‌ی طراحی شده (آزمایش شده) نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. با مشاهده شکل ۱۵ می‌توان نتیجه گرفت که شاخص PEEQ در وجه ستون در مدل‌های مربوط به ضلع قائم به‌عنوان پارامتر مورد بررسی با

افزایش اندازه‌ی ضلع قائم از 0.5H تا مقدار طراحی شده (H) کرنش پلاستیک کمتر می‌شود. در نتیجه، ستون در نمونه‌ی طراحی شده در وضعیت مناسبی قرار دارد.



شکل ۱۴: کرنش طولی نرمال شده در طول خط مرکزی بال تیر در مدل‌های RC-L در انتهای ۴ درصد



شکل ۱۵: شاخص PEEQ در عرض وجه ستون در پائین لچکی در مدل‌های RC-H در انتهای ۴ درصد

۴-۳- مطالعه پارامتریک بر روی ستون جعبه‌ای به همراه ترکیب تعداد و ضخامت لچکی

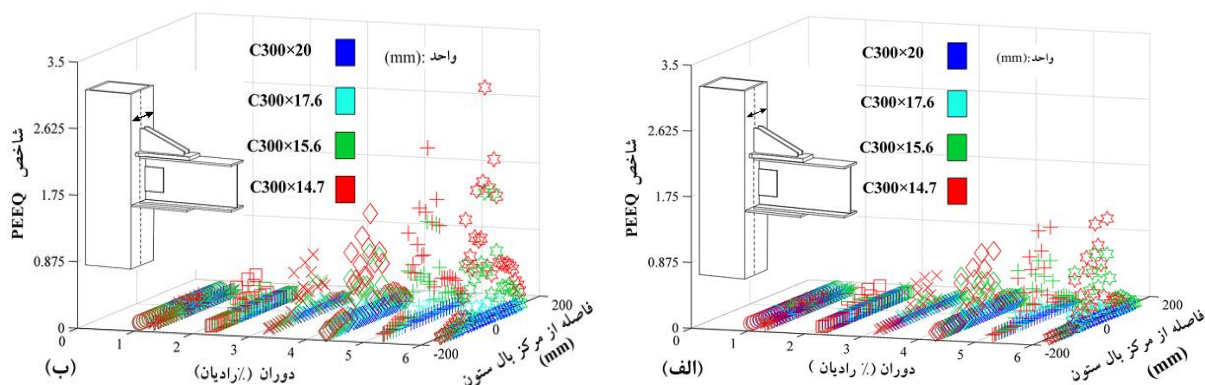
همان‌طور که اشاره شد، مطالعات بسیار کمی در زمینه‌ی ستون‌های جعبه‌ای صورت گرفته است؛ بنابراین، برای بررسی همه‌جانبه‌ی این نوع از مقاوم‌سازی به مطالعه‌ی ستون جعبه‌ای پرداخته شد. در همین راستا، برای ارزیابی شکل‌پذیری ستون و اثر آن بر این روش مقاوم‌سازی، ستون جعبه‌ای با نسبت عرض به ضخامت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. ابعاد ستون بر اساس سطوح شکل‌پذیری زیاد و متوسط انتخاب گردید. لازم به ذکر است که سطوح شکل‌پذیری بر اساس ضوابط لرزه‌ای آئین‌نامه آمریکا [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت با این توجه که مبحث دهم [۱۶] تطابق تقریباً کاملی با این آئین‌نامه دارد. مدل‌ها به دو دسته از لحاظ تعداد (دوتایی و سه‌تایی) تقسیم شدند که در این دسته‌بندی ضخامت هم به‌عنوان متغیر دیگر استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳: مشخصات مدل‌های عددی برای مطالعه پارامتریک ستون جعبه‌ای (واحد: mm)

$\sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq 0.6$ شکل پذیری متوسط		$\sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq 0.6$ شکل پذیری زیاد	
۱۴,۷-۳۰۰	۱۵,۶-۳۰۰	۱۷,۶-۳۰۰	۲۰-۳۰۰
ابعاد ستون (عرض-ضخامت)			
تعداد لچکی- ابعاد (ضلع قائم × ضلع افقی × ضخامت (چپ به راست))			
C300×20			
C300×17.6			
Double-90×140×20	Double-110×190×15	Triple-90×130×15	Triple-110×190×10
C300×15.6			
C300×14.7			
ورق زیرسری		ورق روسری	
تیر			
IPE300			
ساق جوش	طول ورق	ضخامت	عرض ورق
۹	۲۶۰	۱۵	۲۶۰
ساق جوش	طول ورق	ساق جوش	ساق جوش
۹	۲۶۰	۹	۲۶۰
عرض	عرض	عرض	عرض
۱۷۰	۱۲۰	۳۰	۲۲۰
عرض	عرض	عرض	عرض
قسمت پهن	قسمت باریک	قسمت	قسمت
۱۷۰	۱۲۰	۳۰	۲۲۰

نکته‌ی اساسی در این قسمت عدم استفاده از لچکی به شکل تک است که به دلیل اعمال ضوابط طراحی لرزه‌ای در محاسبات می‌باشد. در این مورد دو حالت به وجود می‌آید که حالت اول با در نظر گرفتن ضخامت زیاد است که به موجب آن طول اضلاع لچکی کمتر شده و باعث طبله کردن ورق بال ستون به سبب ضخامت کمتر آن نسبت به ورق لچکی می‌شود. حالت دوم، با در نظر گرفتن ضخامت کمتر لچکی، به موجب آن طول ضلع قائم لچکی بزرگتر می‌شود که باعث عدم امکان کف سازی می‌شود؛ از طرفی، طول ضلع افقی لچکی بزرگتر می‌شود که باعث بیشتر شدن آن از طول ورق روسری می‌شود که در مجموع امکان استفاده از ورق لچکی تک را از بین می‌برد. در مجموع ۱۶ مدل در این قسمت ایجاد شد که تحت بارگذاری با چرخه‌ی کامل [۱۵] قرار گرفت.

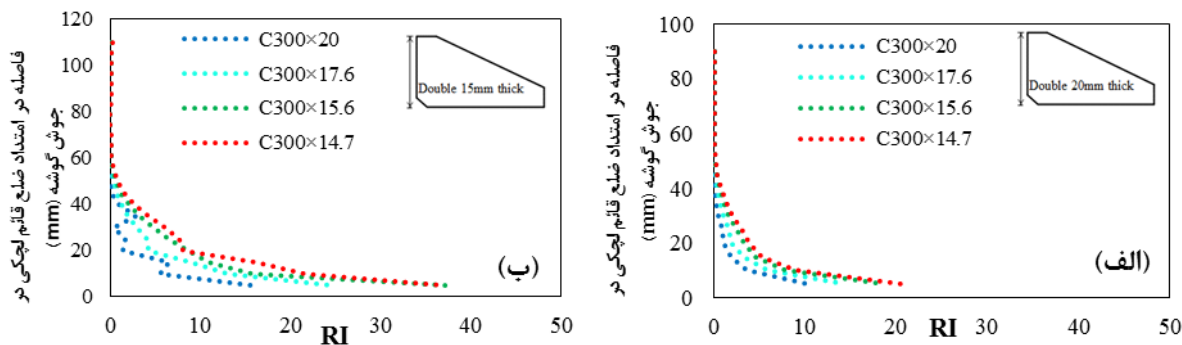
نتایج نشان می‌دهد که در مدل‌های دوتایی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر (شکل ۱۶-الف)، ستون با ضخامت ۱۴,۷ میلی‌متر که با توجه به ثابت بودن عرض ستون‌ها در رده‌ی شکل‌پذیری متوسط قرار می‌گیرد، کرنش‌های پلاستیک بیشتری نسبت به سایر ستون‌ها تجربه می‌کند. این در حالیست که در مدل‌های دوتایی با ضخامت ۱۵ میلی‌متر (شکل ۱۶-ب) مقادیر کرنش‌های پلاستیک موردتقاضا بیشتر از موارد مشابه در مدل‌های دوتایی با ضخامت ۲۰ میلی‌متر است و در ستون با ضخامت ۱۴,۷ میلی‌متر ورق ستون رفتار غیرخطی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد. در نهایت، لچکی ضخیم‌تر و کوچک‌تر در حالت دوتایی شرایط بهتری را از نظر عملکرد مناسب ستون به‌عنوان عضو نیرو کنترل ایجاد می‌کند.



شکل ۱۶: شاخص PEEQ در عرض وجه ستون در پایین لچکی (الف) مدل های Double Rib- 20 mm thick (ب) مدل های Double Rib- 15 mm thick

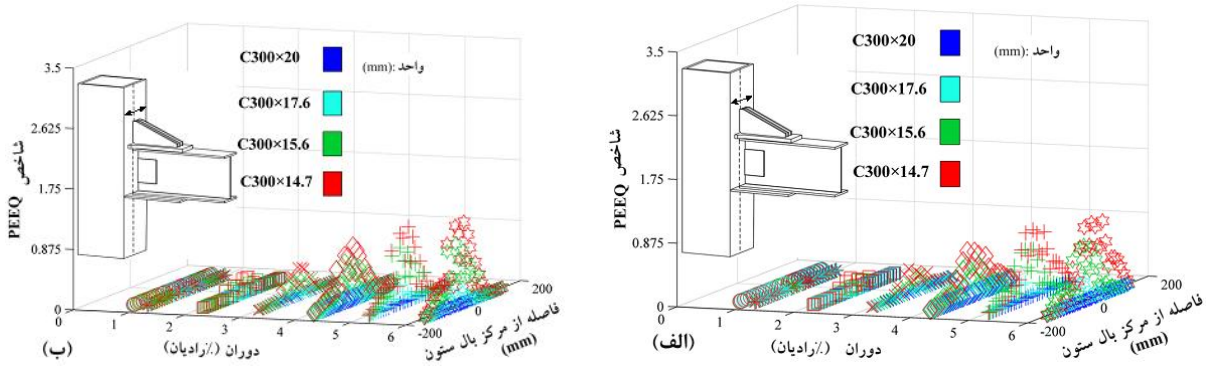
نتایج قبلی حاکی از وضعیت ستون در مدل های دوتایی بودند ولی برای بررسی دقیق تر از جهت مکانیزم شکست نیاز به مطالعه دقیق تر در نقاط متصل کننده یا جوش ها می باشد. به این منظور، وضعیت شاخص شکست در جوش قائم لچکی که متصل کننده ی لچکی به ورق ستون می باشد مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۱۷ تفاوت کلی بین مدل های دوتایی با ضخامت ۲۰ میلی متر و مدل های مشابه ولی با ضخامت ۱۵ میلی متر را نشان می دهد. مقادیر کم شاخص شکست در مدل های با ضخامت ۲۰ میلی متر نسبت به مدل های دوتایی دیگر، مشهود است. باین حال، مدل های با ستون دارای ضخامت ۱۵٫۶ و ۱۴٫۷ میلی متر شرایط نسبتاً یکسان دارند و تمایل برای شکست ترد در ناحیه ی اتصال برای این مدل ها وجود دارد (شکل ۱۷- الف). در مقابل، در مدل های دوتایی با ضخامت ۱۵ میلی متر (شکل ۱۷- ب) مشخصاً ستون با ضخامت ۱۴٫۷ میلی متر دارای شاخص شکست بیشتر است و در نتیجه در حالت شکست ترد قرار دارد. در کل، پتانسیل شکست ترد ناحیه ی اتصال در مدل های دوتایی با ضخامت ۲۰ میلی متر کمتر است و در مقابل در مدل های با دوتایی با ضخامت ۱۵ میلی متر بیشتر است.

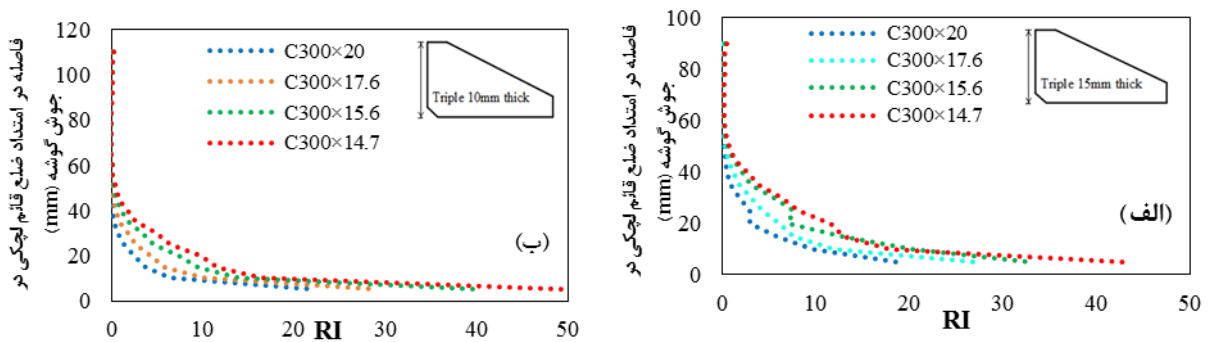


شکل ۱۷: توزیع شاخص شکست در طول ضلع قائم در جوش گوشه در مدل های (الف) Double- 20mm thick (ب) Double 15 mm-Thick

با مقایسه کلی بین مدل های دوتایی و سه تایی (شکل ۱۶ و شکل ۱۸) می توان دریافت که به دلیل میزان کمتر کرنش پلاستیک مورد تقاضا در مدل های سه تایی، عملکرد بهتری از مدل های سه تایی حاصل می شود. با دقت در شکل ۱۹ به دست می آید که ستون هایی که در دسته ی شکل پذیری زیاد و دارای لچکی سه تایی با ضخامت ۱۵ میلی متر هستند (شکل ۱۹- الف)، میزان شاخص شکست کمتری دارند. در نتیجه، مدل های سه تایی با ضخامت ۱۵ میلی متر از دیدگاه طراحی لرزه ای در مقایسه با مدل های مشابه با ضخامت ۱۰ میلی متر (شکل ۱۹- ب) عملکرد مناسب در جهت جلوگیری از شکست ترد در جوش لچکی با ستون دارند. علاوه بر این، همانند مدل های دوتایی، لچکی ضخیم تر و کوچک تر شرایط مناسب تری دارد.

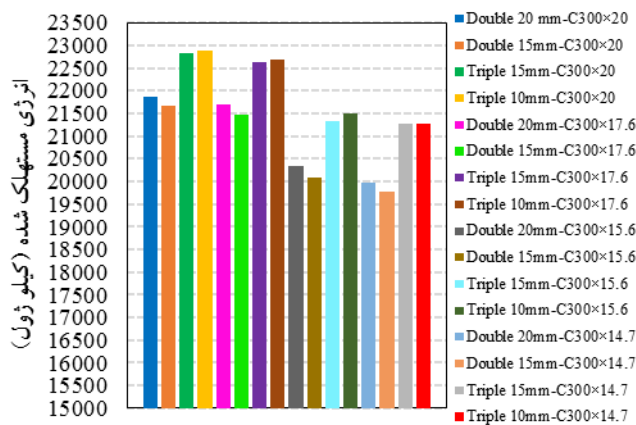


شکل ۱۸: شاخص PEEQ در عرض وجه ستون در باین لچکی در مدل‌های (الف) Triple Rib-15 mm thick (ب) Triple Rib-10 mm thick



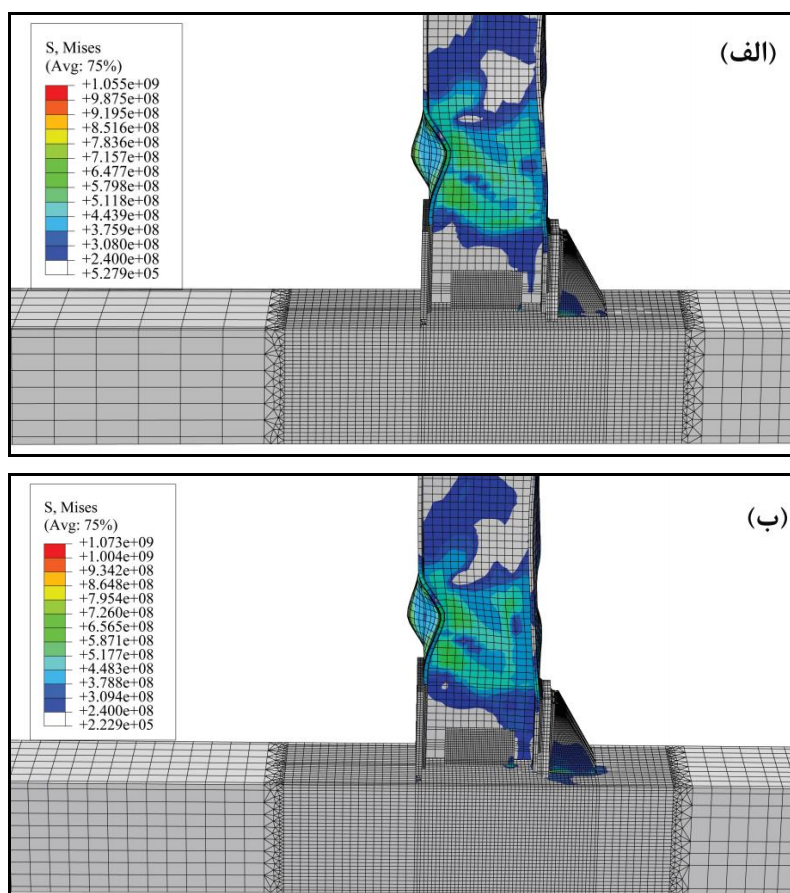
شکل ۱۹: توزیع شاخص شکست در طول ضلع قائم در جوش گوشه در مدل‌های (الف) Triple Rib - 15 mm thick (ب) Triple Rib 10 mm thick

از نتایج دیگر قابل استخراج از نمودارهای هیستریزیس، میزان انرژی مستهلک شده در مجموعه اتصال می‌باشد. همان‌طور که شکل ۲۰ نشان می‌دهد اتصالات با ستون به ضخامت ۲۰ میلی‌متر بیشترین مقدار انرژی مستهلک شده را به خود اختصاص داده‌اند و در میان آنها، مدل‌های با لچکی به تعداد سه عدد نسبت به مدل‌های با لچکی به تعداد دو عدد انرژی بیشتری را جذب می‌کنند. این الگو در مورد سایر ستون‌ها هم اتفاق می‌افتد با این تفاوت که میزان انرژی مستهلک شده با کاهش ضخامت کمتر می‌شود.



شکل ۲۰: مقایسه‌ی میزان انرژی مستهلک شده

به علاوه، در مدل‌های با نسبت عرض به ضخامت زیاد یا مدل‌های با ضخامت کم، نیروهای بیشتری به ورق لچکی و همین‌طور ستون منتقل می‌شود (شکل ۲۱) زیرا تیر که از دیدگاه طراحی لرزه‌ای به‌عنوان عضو شکل‌پذیر یا با بیانی دیگر از منظر آئین‌نامه بهسازی لرزه‌ای [۲۶] به‌عنوان عضو کنترل‌شونده توسط تغییر مکان شناخته می‌شود، وظیفه‌ی جذب انرژی را بر عهده دارد؛ حال اگر ستون و اتصال نسبت به تیر به اندازه کافی قوی نباشند (ضخامت کم) ستون هم تحت اثر نیروی قابل‌توجهی قرار می‌گیرد و به این صورت با از بین رفتن تمرکز اصلی برای جذب انرژی یعنی مفصل پلاستیک، سایر اعضا نیروی بیشتری نسبت به حالت ایده آل (ابعاد در دسته‌ی شکل‌پذیری زیاد) تحمل می‌کنند [۲۷]. از طرفی، عملکرد لرزه‌ای مدل‌های با ستون در دسته‌ی شکل‌پذیری متوسط به سبب میزان شاخص شکست تضمین‌شده نیست؛ بنابراین، ستون با ابعاد مناسب جهت تأمین شکل‌پذیری و یا نسبت عرض به ضخامت مناسب، نقش بسیار مهمی در مقاوم کردن این نوع از اتصالات با استفاده از لچکی ایفا می‌کند.



شکل ۲۱: توزیع تنش فون میسز (واحد: Pa) در مدل‌های Triple Rib- 10 mm thick (الف) C300×20 (ب) C300×14.7

۵- نتیجه گیری

همان‌طور که اشاره شد به دلیل عدم وجود مطالعه‌ی جامع در رابطه با تقویت اتصال خمشی از نوع ورق روسری- زیرسری با وجود ستون جعبه‌ای، در این پژوهش سعی شد با مطرح کردن روش مقاوم‌سازی این نوع از اتصالات به کمک سخت‌کننده مثلثی (لچکی)، عملکرد لرزه‌ای آن را بهبود بخشید. ارائه‌ی روش پیشنهادی جهت طراحی قطعه مثلثی، آزمایش نمونه‌ی تمام‌مقیاس و مطالعات عددی برای دستیابی به جزئیات روش مقاوم‌سازی انجام پذیرفت. بر اساس پژوهش انجام‌شده نتایج پیش رو به دست آمد:

۱. نمونه‌ی آزمایش‌شده و مدل عددی آن نشان دادند که رفتار لرزه‌ای روش مقاوم‌سازی شده بر اساس ضوابط طراحی لرزه‌ای آئین‌نامه آمریکا و همچنین مبحث دهم مقررات ملی مورد قبول می‌باشد و الزامات را رعایت می‌کند. به علاوه، اتصال مقاوم‌سازی

شده از نوع اتصالات پر مقاومت بود، به این معنا که تقریباً تا ۱,۵ برابر لنگر پلاستیک تیر مقاومت نشان داد و کاهش مقاومت خیلی محسوس نیست. این در حالیست که اتصال معیوب رفتار تردشکن داشت و در دوران ۲ درصد دچار شکست شد. در نتیجه، عملکرد شکل پذیر اتصال به این گونه تأمین می شود.

۲. برای بررسی صحت روش پیشنهادی جهت طراحی قطعه، آنالیز حساسیت بر روی قطعه انجام شد. با بررسی کرنش های به وجود آمده از بر ستون تا مفصل پلاستیک و هم چنین کرنش در عرض بال ستون، مشاهده شد که میزان کرنش معادل پلاستیک در بال ستون در مدل های مختلف عددی حداقل ۱,۲۶ و حداکثر ۳,۶۶ برابر کرنش مدل عددی نمونه ی آزمایش شده است. از طرفی، میزان کرنش در طول تیر از بر ستون تا ناحیه ی مفصل پلاستیک در مدل آزمایشگاهی (مدل طراحی شده براساس روش پیشنهادی) از بقیه ی مدل های عددی کمتر است. بنابراین، عملکرد قابل قبول نمونه ی آزمایشگاهی با استفاده از این روش طراحی شده از طریق آنالیز حساسیت اثبات شد.

۳. ستون با شکل پذیری مختلف به عنوان یک معیار مهم در جهت کنترل عملکرد روش مقاوم سازی مطرح است. نتایج مدل های عددی نشان می دهد که اتصالات مقاوم سازی شده با لچکی به همراه ستون های جعبه ای با شکل پذیری زیاد یا نسبت عرض به ضخامت کمتر تطابق قابل قبولی با ضوابط آئین نامه ای طراحی قاب های خمشی فولادی دارد؛ به عبارت دیگر، افزایش میزان نسبت عرض به ضخامت ضعف در عملکرد هر یک از اعضای اتصال یعنی تیر به عنوان عضو کنترل شونده توسط تغییر مکان و ستون به عنوان عضو کنترل شونده توسط نیرو را به دنبال خواهد داشت.

۴. تعداد لچکی ها پارامتر دیگری در جهت بررسی عملکرد لرزه ای می باشد. در همین راستا، بر اساس ملاحظات طراحی و اجرایی نمونه های دوتایی و سه تایی با ضخامت های مختلف بررسی شد. نتایج، عملکرد لرزه ای مناسب روش مقاوم سازی را در صورت استفاده از لچکی با تعداد بیشتر و هم چنین ضخامت بیشتر نشان می دهد.

۵. بررسی تعداد لچکی و ستون جعبه ای همزمان نشان داد که استفاده از این روش به شدت تحت تأثیر شکل پذیری ستون است. به علاوه، نکته ی دیگر که در هنگام طراحی باید به آن توجه کرد خالی بودن ستون است؛ به این معنا که عملاً پشت ورق لچکی خالی بوده و نتایج کرنش معادل پلاستیک نشان می دهد که تمایل به طبله کردن ورق بال ستون وجود دارد. بنابراین، توجه به ابعاد ستون و اطمینان از قرار گرفتن در محدوده ی شکل پذیری زیاد متضمن عملکرد مناسب لرزه ای این نوع از اتصالات مقاوم سازی شده خواهد بود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مرکز تحقیقات مسکن، راه و شهرسازی که با قرار دادن امکانات آزمایشگاهی و هم چنین پشتیبانی مالی امکان انجام این تحقیق را فراهم کردند قدردانی می گردد.

مراجع

- [1] Lee, C. H., Jung, J. H., Oh, M. H., & Koo, E. S. (2005). Experimental study of cyclic seismic behavior of steel moment connections reinforced with ribs. *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 108–118.
- [2] Chen, C. C., Lee, J. M., & Lin, M. C. (2003). Behaviour of steel moment connections with a single flange rib. *Engineering Structures*, 25(11), 1419–1428.
- [3] Chen, C. C., Lu, C. A., & Lin, C. C. (2005). Parametric study and design of rib-reinforced steel moment connections. *Engineering Structures*, 27(5), 699–708.
- [4] Chen, C. C., Chen, S. W., Chung, M. D., & Lin, M. C. (2005). Cyclic behaviour of unreinforced and rib-reinforced moment connections. *Journal of Constructional of Steel Research*, 61(1), 1–21.
- [5] Chen, C. C., Lin, C. C., & Tsai, C. L. (2004). Evaluation of reinforced connections between steel beams and box columns. *Engineering Structures*, 26(13), 1889–1904.
- [6] Lee, C. H. (2002). Seismic Design of Rib-Reinforced Steel Moment Connections based on Equivalent Strut Model. *Journal of Structural Engineering*, 128-September 2002, 1121–1129.
- [7] Kim, T., Stojadinovi, B., & Whittaker, A. S. (2008). Seismic performance of pre-Northridge welded steel moment connections to built-up box columns. *Journal of Structural Engineering*, 134(2), 289–299.

- [8] Chou, C.C., & Jao, C.K. (2010). Seismic rehabilitation of welded steel beam-to-box column connections utilizing internal flange stiffeners. *Earthquake spectra*, 26(4), 927–950.
- [9] Chou, C. C., Tsai, K. C., Wang, Y. Y., & Jao, C. K. (2010). Seismic rehabilitation performance of steel side plate moment connections. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(1), 23–44.
- [10] Erfani, S., Asnafi, A. A., & Goudarzi, A. (2016). Connection of I-beam to box-column by a short stub beam. *Journal of Constructional of Steel Research*, 127, 136–150.
- [11] Jahanbakhti, E., Fanaie, N., & Rezaeian, A. (2017). Experimental investigation of panel zone in rigid beam to box column connection. *Journal of Constructional of Steel Research*, 137, 180–191.
- [12] Jiang, J., Chiew, S. P., Lee, C. K., & Tiong, P. L. Y. (2017). An experimental study on residual stresses of high strength steel box columns. *Journal of Constructional of Steel Research*, 130, 12–21.
- [13] Ghobadi, M. S., Mazroi, A., & Ghassemieh, M. (2009). Cyclic response characteristics of retrofitted moment resisting connections. *Journal of Constructional of Steel Research*, 65(3), 586–598.
- [14] Mazroi, A., Ghobadi, M. S., & Ghassemieh, M. (2011). *Cyclic behavior and retrofitting guideline of plate reinforced beam to column moment connection*. Tehran, Road, Housing and Urban Development Research Center.
- [15] ANSI/AISC 341-10. (2010). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago, American Institute of Steel Construction.
- [16] *Iran's building national code, the tenth section, Design and Construction of Steel Structures*, (2013), Tehran, Collecting and Promoting Office of Building National Codes.
- [17] Mirghaderi, S. R., Torabian, S., & Keshavarzi, F. (2010). I-beam to box-column connection by a vertical plate passing through the column. *Engineering Structures*, 32(8), 2034–2048.
- [18] ANSI/AISC 360-10, (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, American Institute of Steel Construction.
- [19] AWS D1.1/D1.1M, (2015). *Structural Welding Code-Steel*. Miami, American Welding Society.
- [20] Saneei Nia, Z., Mazroi, A. & Ghassemieh, M. (2014). Cyclic performance of flange-plate connection to box column with finger shaped plate. *Journal of Constructional of Steel Research*, 101, 207–223.
- [21] Ghobadi, M. S., Ghassemieh, M., Mazroi, A., & Abolmaali, A. (2009). Seismic performance of ductile welded connections using T-stiffener. *Journal of Constructional of Steel Research*, 65(4), 766–775.
- [22] ABAQUS: *User's Manual, Version 6.3*. Hibbit, Karlsson, & Sorensen, Incorporated, 2003.
- [23] Hancock, J. W., & Mackenzie, A. C. (1976). On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 24(2), 147–169.
- [24] El-Tawil, S., Mikesell, T., Vidarsson, E., & Kunnath, S. K. (1998). *Strength and Ductility of FR Welded-Bolted Connections*. Sacramento, SAC Joint Venture. Report No. SAC/BD-98/01.
- [25] Ricles, J. M., Fisher, J. W., Lu, L. W., & Kaufmann, E. J. (2002). Development of improved welded moment connections for earthquake-resistant design. *Journal of Constructional of Steel Research*, 58(5), 565–604.
- [26] ASCE/SEI41-13, (2013). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Building*. Virginia, American Society of Civil Engineers.
- [27] Farooghi Mehr, S. M. R. and Ghobadi, M. S. (2017). Seismic performance of retrofitted WFP connections joined to box column using ribs. *Journal of Constructional of Steel Research*, 137- October 2017, 297–310.