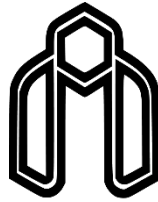


خدا



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته‌ی مهندسی عمران، گرایش مهندسی سازه

بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال نیمه گیردار "SST" برای نیمرخ‌های فولادی پُر کاربرد در ایران

نگارنده

محمد ایروانی

استاد راهنما

دکتر وحیدرضا کلات جاری

استاد مشاور

دکتر پویان برومند

شهریورماه ۱۳۹۸

شماره: ۹۸۲۹۰
تاریخ: ۹۸/۶/۱۲

باسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محمد ایروانی با شماره دانشجویی ۹۴۰۳۰۸۴ رشته عمران، گرایش سازه تحت عنوان بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال نیمه‌گیردار "SST" برای نیم‌رخ‌های فولادی پُرکاربرد در ایران که در تاریخ ۱۳۹۸/۶/۱۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه:): ☐ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر وحیدرضا کلات جاری	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ایمان آقایان	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سیدمهدی توکلی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر جلیل شقائی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء مدیر دانشکده:



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تعهد نامه

اینجانب **محمد ابروانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی عمران** دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان **بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال نیمه‌گیردار SST** برای **نیمرخ‌های فولادی پُر کاربرد در ایران** تحت راهنمایی **دکتر وحیدرضا کلات جاری** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

محمد ابروانی

شهریور ۱۳۹۸

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

اتصال "SST" نخستین اتصال نیمه گیردار پیش پذیرفته می باشد. در این پژوهش به ارزیابی عددی رفتار این اتصال با نیم رخ های پُر کاربرد در ایران به همراه چند مقایسه، در نرم افزار آباکوس پرداخته شده است. در این پژوهش برای بررسی پیش پذیرفتگی اتصال SST با نیم رخ های پُر کاربرد در ایران ۵ نمونه برابر با آئین نامه ی اتصالات های پیش پذیرفته ی آمریکا ساخته شد. نتایج پژوهش پیش رو نشان می دهد که همه ی نمونه های ۵ گانه توانسته است نیازهای عمومی پیش پذیرفتگی را برآورده نماید. همچنین نمونه های ۵ گانه توانسته اند رفتار لرزه ای مناسبی از خود نشان دهند به گونه ی که تا چرخش ۰/۰۶ رادیان هیچ کدام از نمونه ها دچار کاهش مقاومت نشده اند و نمودار لنگر-چرخش در آنها همواره روند افزایشی داشته است. پیش تنیدگی بیشینه در پیچ های بال پیوند تسلیمی نمونه های ۵ گانه سبب افزایش ۱۱ تا ۱۲ درصد سختی اتصال شده است، اما بر بهبود رفتار مقاومت خمشی اتصال کمتر از ۱٪ مؤثر بوده است. همچنین، پیش تنیدگی بیشینه ی پیچ های بال پیوند تسلیمی و تقویت چشمه ی اتصال با ورق مضاعف برای نمونه های ۵ گانه، افزایش ۱۱ تا ۱۴ درصدی سختی نسبت به نمونه های بدون ورق مضاعف را در پی داشته، در صورتی که اثر آن بر بهبود رفتار مقاومت خمشی اتصال کمتر از ۱٪ است. هر ۱۵ نمونه ی اتصال SST این پژوهش در رده ی اتصالات های نیمه گیردار و تمام مقاوم به شمار می آید. مقایسه ای که میان ۳ نمونه با اتصال SST، SST_R و RBS انجام گرفته است نشان می دهد که اتصال RBS در چرخش ۰/۰۶ رادیان دچار کاهش مقاومت شده است. در صورتی که ۲ اتصال دیگر هیچ گونه کاهش مقاومتی را تجربه نکرده اند. همچنین سختی اتصال RBS بیشتر از ۲ اتصال دیگر است. چشمه ی اتصال در اتصال RBS وارد بازه ی خمیری شده در حالی که ۲ نمونه ی دیگر رفتار همواره کشسانی از خود نشان داده اند. سختی چشمه ی اتصال در اتصال SST_R و RBS برابر می باشد، سختی چشمه ی اتصال SST اندکی بیشتر از این ۲ نمونه می باشد. در مقایسه ای دیگر میان ۲ اتصال SST و RBS_R نتایج نشان داد که سختی اتصال RBS_R نسبت به اتصال SST بیشتر بوده همچنین مقاومت آن هم اندکی بالاتر است؛ رفتار چشمه اتصال در هر ۲ نمونه کشسان بوده و سختی چشمه ی اتصال SST اندکی بیشتر است. نتایج نشان می دهد که تسلیم در اتصال SST تنها در بخش کاهش یافته رخ می دهد. اتصالات های SST_R، RBS و RBS_R در رده ی اتصالات های نیمه گیردار و تمام مقاوم به شمار می روند.

کلیدواژه ها: اتصال نیمه گیردار SST؛ رفتار لرزه ای؛ چشمه ی اتصال؛ بارگذاری چرخه ای؛ روش اجزا محدود.

فهرست نوشتار

۱	۱. سرآغاز
۱-۱	پیش گفتار..... ۱
۲-۱	هدف‌های پژوهش..... ۷
۳-۱	روش پژوهش..... ۸
۴-۱	ساختار پایان‌نامه..... ۹
۱-۴-۱	فصل نخست؛ سرآغاز..... ۹
۲-۴-۱	فصل دوم؛ نگاهی به پیش‌پذیرفتگی و پیشینه‌ی پژوهش..... ۹
۳-۴-۱	فصل سوم؛ مفاهیم طراحی لرزه‌ای و مبانی مدل‌سازی..... ۹
۴-۴-۱	فصل چهارم؛ مدل‌سازی و راستی‌آزمایی..... ۱۰
۵-۴-۱	فصل چهارم؛ بررسی رفتار اتصال SST با نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در ایران..... ۱۰
۶-۴-۱	فصل ششم؛ نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۱۰
۱۳	۲. نگاهی به پیشینه‌ی پژوهش
۱۷	۳. مفاهیم طراحی لرزه‌ای و مبانی مدل‌سازی
۱-۳	پیش گفتار..... ۱۷
۲-۳	ماهیت زمین‌لرزه و لزوم انجام طراحی لرزه‌ای..... ۱۷
۳-۳	طراحی براساس ظرفیت..... ۲۰
۴-۳	گونه‌های قاب‌های سازه‌ای..... ۲۱
۵-۳	مفاهیم گیرداری اتصال..... ۲۲

۶-۳	خط تیر	۲۴
۷-۳	سختی اتصال	۲۷
۸-۳	مقاومت اتصال	۲۸
۹-۳	شکل پذیری	۲۸
۱۰-۳	نگرش جدید در طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی	۳۱
۱۱-۳	دلیل نیاز به مفاصل پلاستیک در تیرها	۳۲
۱۲-۳	ارزیابی اتصال‌های گیردار و نمودار لنگر-چرخش اتصال ($M - \theta$)	۳۳
۱۳-۳	چشمه‌ی اتصال	۳۴
۱۴-۳	روش به‌دست آوردن شکل پذیری چشمه‌ی اتصال	۳۶
۱۵-۳	آشنائی با شناسه‌ی گسیختگی	۳۷
۱۶-۳	خستگی کم چرخه (LCF)	۳۷
۱۷-۳	آشنائی با ویژگی‌ها و توانائی‌های نرم‌افزار آباکوس	۳۸
۱۸-۳	مبانی سخت‌شدگی کرنش	۴۰
۱۹-۳	المان‌های مورد استفاده	۴۴

۴	مدل‌سازی و راستی‌آزمایی	۴۵
۱-۴	توضیح نمونه‌های ساخته‌شده	۴۵
۲-۴	نرم‌افزار آباکوس	۴۶
۱-۲-۴	هندس‌ه اجزا نمونه	۴۷
۲-۲-۴	تعریف ویژگی‌های مصالح	۴۸
۳-۲-۴	سرهم‌بندی نمونه	۵۱
۴-۲-۴	روش پردازش نمونه	۵۲
۵-۲-۴	برهم‌کنش و قید بین بخش‌های گوناگون نمونه	۵۲
۶-۲-۴	ویژگی‌های تکیه‌گاهی و بارگذاری‌های نمونه	۵۳
۷-۲-۴	مش‌بندی نمونه	۵۴
۸-۲-۴	خروجی‌های پردازش نمونه	۶۷

۶۸.....	۳-۴. راستی آزمائی
۶۸.....	۳-۴-۱. راستی آزمائی نخست
۷۲.....	۳-۴-۲. راستی آزمائی دوم

۵. بررسی رفتار اتصال SST با نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در ایران ۸۷

۸۷.....	۵-۱. پیش‌گفتار
۸۸.....	۵-۲. بررسی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۸۸.....	۵-۲-۱. ارزیابی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست از دیدگاه بایستگی‌های پیش‌پذیرفتگی
۹۲.....	۵-۲-۲. رفتار لرزه‌ای اتصال SST در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۹۴.....	۵-۲-۳. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۹۶.....	۵-۲-۴. نمودار پوششی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۹۸.....	۵-۲-۵. نمودار دوخطی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۰.....	۵-۲-۶. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۲.....	۵-۲-۷. ارزیابی مقاومتی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۳.....	۵-۲-۸. ارزیابی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۵.....	۵-۲-۹. ارزیابی اتلاف انرژی در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۵.....	۵-۳. بررسی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم
۱۰۶.....	۵-۳-۱. ارزیابی نمودار پوشش لنگر-چرخش اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم
۱۰۸.....	۵-۳-۲. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم
۱۱۰.....	۵-۳-۳. ارزیابی مقاومت اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم
۱۱۰.....	۵-۴. بررسی نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم
۱۱۱.....	۵-۴-۱. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم
۱۱۳.....	۵-۴-۲. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم
۱۱۴.....	۵-۴-۳. ارزیابی مقاومت اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم
۱۱۴.....	۵-۵. مقایسه‌ی ۳ نمونه با اتصال‌های SST، SST اصلاح‌شده و RBS

رفتار لرزه‌ای نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS.....	۱۱۷	۵-۱
رفتار لرزه‌ای اتصال نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۱۹	۵-۲
رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۰	۵-۳
نمودار پوشش نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۱	۵-۴
نمودار دوخطی نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۲	۵-۵
ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۳	۵-۶
ارزیابی مقاومتی اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۵	۵-۷
ارزیابی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۵	۵-۸
ارزیابی اتلاف انرژی در نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS.....	۱۲۶	۵-۹
ارزیابی شناسه‌ی گسیختگی در نمونه‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۲۷	۵-۱۰
مقایسه‌ی ۲ نمونه با اتصال SST، و اتصال RBS_R.....	۱۳۱	۵-۶
رفتار لرزه‌ای نمونه‌های با اتصال SST و RBS_R.....	۱۳۲	۵-۱-۶
رفتار لرزه‌ای اتصال نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۳	۵-۲-۶
رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۴	۵-۳-۶
نمودار پوشش نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۵	۵-۴-۶
نمودار دوخطی نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۶	۵-۵-۶
ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۶	۵-۶-۶
ارزیابی مقاومتی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۷	۵-۷-۶
ارزیابی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۷	۵-۸-۶
ارزیابی اتلاف انرژی در نمونه‌های با اتصال SST و RBS_R.....	۱۳۸	۵-۹-۶
ارزیابی شناسه‌ی گسیختگی در نمونه‌های SST و RBS_R.....	۱۳۸	۵-۱۰-۶

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها		
پیش‌گفتار.....	۱۴۵	۶-۱
نتایج رفتار لرزه‌ای نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست.....	۱۴۵	۶-۲
نتایج رفتار لرزه‌ای نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم.....	۱۴۶	۶-۳

۴-۶.	نتایج رفتار لرزه‌ای نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم.....	۱۴۶
۵-۶.	نتایج مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ای اتصال‌های SST، SST_R و RBS.....	۱۴۷
۶-۶.	نتایج مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ای اتصال‌های SST و RBS.....	۱۴۸
۷-۶.	پیشنهادها.....	۱۴۹

مرجع‌ها

۱۵۱

پیوست

۱۵۴

- پ-۱. روش‌های طراحی اتصال‌های گیردار..... ۱۵۴
- پ-۱-۱. پیش‌پذیرفتگی اتصال‌های تیر به ستون (ضوابط لرزه‌ای AISC بخش K1)..... ۱۵۵
- پ-۲. آزمایش چرخه‌ای برای پذیرش اتصال‌های تیر به ستون (ضوابط لرزه‌ای AISC بخش K2). ۱۶۱.

Abstract

۱۶۷

فهرست جدول‌ها

۳۹	جدول ۱-۳. برآورد اثر تجمیعی خستگی کم چرخه
۴۲	جدول ۲-۳. تفاوت‌های میان سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک
۴۷	جدول ۱-۴. ویژگی‌های مصالح و ویژگی‌های هندسی اجزا نمونه‌های ساخته‌شده (یکای میلی‌متر)
۵۸	جدول ۲-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت لایه‌های مش در ضخامت
۶۱	جدول ۳-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت به کارگیری مش با ساختار بندی Tet و سُبک‌سازی مش
۶۲	جدول ۴-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها
۶۵	جدول ۵-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت مش چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی
۶۸	جدول ۶-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیوند تسلیمی
۷۱	جدول ۷-۴. ویژگی‌های هندسی بخش‌های به کار رفته در ساخت نمونه‌ی راستی آزمائی نخست
۷۲	جدول ۸-۴. مقایسه‌ی درصد نابرابری ۳ چرخه‌ی آخر راستی آزمائی نخست
۷۵	جدول ۹-۴. ویژگی‌های هندسی بخش‌های به کار رفته در ساخت نمونه‌ی راستی آزمائی دوم
۷۶	جدول ۱۰-۴. ویژگی‌های مصالح بخش‌های به کار رفته در ساخت نمونه‌ی راستی آزمائی دوم
۸۲	جدول ۱۱-۴. درصد نابرابری ۳ چرخه‌ی پایانی نمودار چرخه‌ای راستی آزمائی دوم
۸۳	جدول ۱۲-۴. درصد نابرابری نمودارهای بار افزون راستی آزمائی دوم
۸۹	جدول ۱-۵. لنگر تسلیم مورد انتظار جفت پیوندهای تسلیمی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۲	جدول ۲-۵. دسته‌بندی سختی اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست با به کارگیری لنگر ماند جفت پیوند تسلیمی
۱۰۳	جدول ۳-۵. دسته‌بندی مقاومتی اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۴	جدول ۴-۵. شکل‌پذیری نمودار دوخطی اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۰۹	جدول ۵-۵. درصد نابرابری سختی اتصال و مقدار m نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست
۱۱۰	جدول ۶-۵. درصد نابرابری مقاومت اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

- جدول ۵-۷. درصد نابرابری سختی اتصال و مقدار m نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم ۱۱۳
- جدول ۵-۸. درصد نابرابری مقاومت اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم ۱۱۴
- جدول ۵-۹. لنگر تسلیم مورد انتظار جفت پیوندهای تسلیمی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست ۱۱۷
- جدول ۵-۱۰. دسته‌بندی سختی در اتصال‌های SST، SST_R و RBS ۱۲۴
- جدول ۵-۱۱. دسته‌بندی مقاومتی اتصال‌های SST، SST_R و RBS ۱۲۵
- جدول ۵-۱۲. شکل‌پذیری نمودار دوخطی اتصال‌های SST، SST_R و RBS ۱۲۵
- جدول ۵-۱۳. دسته‌بندی سختی در اتصال‌های SST و RBS_R ۱۳۶
- جدول ۵-۱۴. دسته‌بندی مقاومتی اتصال‌های SST و RBS_R ۱۳۷
- جدول ۵-۱۵. شکل‌پذیری نمودار دوخطی اتصال‌های SST و RBS_R ۱۳۷

فهرست شکل‌ها

۶	شکل ۱-۱. اتصال "SST" [1]
۲۱	شکل ۱-۳. اصل طراحی براساس ظرفیت [2]
۲۵	شکل ۲-۳. نمودار لنگر-چرخش [3]
۲۶	شکل ۳-۳. اثر تغییر EI و L بر جابجائی خط تیر
۳۰	شکل ۴-۳. بررسی نمودار لنگر-چرخش برای اتصال‌های گوناگون
۳۴	شکل ۵-۳. چهار نقطه‌ی پایش‌شده برای به‌دست‌آوردن چرخش اتصال
۳۵	شکل ۶-۳. چشمه‌ی اتصال؛ الف: چشمه‌ی اتصال در نمونه‌ای از اتصال SST؛ ب: چشمه‌ی اتصال در یک اتصال معمولی
۳۶	شکل ۷-۳. لبه‌های چشمه‌ی اتصال قبل از تغییر شکل [۲۴]
۳۷	شکل ۸-۳. تغییر شکل چشمه‌ی اتصال [۲۴]
۴۱	شکل ۹-۳. تفاوت جابجائی و تغییر اندازه سطح تسلیم در ۳ نوع سخت‌شوندگی و اثر آن بر نمودار هیستریزیس [4]
۴۲	شکل ۱۰-۳. اثر باوشینگر
۴۳	شکل ۱۱-۳. اثر کاهش پلاستیک‌شدن
۴۳	شکل ۱۲-۳. خزش سیکلی
۴۴	شکل ۱۳-۳. وادادگی تنش متوسط
۴۴	شکل ۱۴-۳. خانواده المان‌های متداول در آباکوس
۴۸	شکل ۱-۴. همه‌ی بخش‌های ساخته‌شده برای یک نمونه‌ی پژوهش پیش‌رو
۴۹	شکل ۲-۴. نمودار سه‌خطی تنش-کرنش حقیقی فولاد ST52
۵۰	شکل ۳-۴. نمودار سه‌خطی تنش-کرنش حقیقی فولاد ST37
۵۰	شکل ۴-۴. نمودار تنش-کرنش حقیقی پیچ A490

- شکل ۵-۴. نمودار تنش- کرنش حقیقی پیچ A325 ۵۱
- شکل ۶-۴. نمائی از نمونه‌ی ساخته‌شده پس از سرهم‌بندی ۵۱
- شکل ۷-۴. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت لایه‌های مش در ضخامت ۵۷
- شکل ۸-۴. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت لایه‌های مش در ضخامت ۵۸
- شکل ۹-۴. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت به‌کارگیری مش با ساختاربندی Tet و سُبک‌سازی مش ۶۰
- شکل ۱۰-۴. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت به‌کارگیری مش با ساختاربندی Tet و سُبک‌سازی مش ۶۱
- شکل ۱۱-۴. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها ۶۲
- شکل ۱۲-۴. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها ۶۲
- شکل ۱۳-۴. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت مش چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی ۶۴
- شکل ۱۴-۴. مقایسه‌ی نتایج آنالیز چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی ۶۴
- شکل ۱۳-۴. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیوند تسلیمی ۶۶
- شکل ۱۴-۴. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت مش پیوند تسلیمی ۶۷
- شکل ۱۵-۴. روش ساخت نمونه‌ی نرم‌افزاری برگرفته از ساختار چیدمان آزمایش ۷۰
- شکل ۱۶-۴. نمودار راستی‌آزمائی نخست؛ مقایسه‌ی نمودار چرخه‌ای عددی با نمودار چرخه‌ای آزمایشگاهی دانش ۷۲
- شکل ۱۷-۴. نمونه‌ی آزمایشگاهی در کنار نمونه‌ی عددی ساخته‌شده ۷۳
- شکل ۱۸-۴. تصویری از اتصال SST در قاب مورد آزمایش در کنار نمونه‌ی عددی ساخته‌شده ۷۴
- شکل ۱۹-۴. نمودار تنش- کرنش حقیقی پیچ رده‌ی A490 ۷۷
- شکل ۲۰-۴. نمودار تنش- کرنش حقیقی پیچ رده‌ی A325 ۷۸
- شکل ۲۱-۴. نمودار تنش- کرنش حقیقی فولاد A572 ۷۸
- شکل ۲۲-۴. نمودار تنش- کرنش حقیقی فولاد A992 ۷۹
- شکل ۲۳-۴. مش‌بندی بخشی از نمونه‌ی ساخته‌شده برای راستی‌آزمائی دوم ۸۰
- شکل ۲۴-۴. نمودار چرخه‌ای راستی‌آزمائی دوم؛ مقایسه‌ی نمودار چرخه‌ای عددی با نمودار چرخه‌ای آزمایشگاهی پریور ۸۱
- شکل ۲۵-۴. نمودار بارافزون راستی‌آزمائی دوم؛ مقایسه‌ی نمودار بارافزون عددی با نمودار بارافزون آزمایشگاهی پریور ۸۱
- شکل ۲۶-۴. دوخطی‌سازی نمودار بارافزون نمونه‌ی آزمایشگاهی آقای پریور ۸۳
- شکل ۲۷-۴. دوخطی‌سازی نمودار بارافزون نمونه‌ی عددی راستی‌آزمائی دوم ۸۳
- شکل ۲۸-۴. بخش‌های تسلیم‌شده‌ی پیوند تسلیمی نمونه راستی‌آزمائی دوم در کنار پیوندهای تسلیمی پس از آزمایش ۸۴

- شکل ۵-۱. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کُلی نمونه‌ی نخست ۹۰
- شکل ۵-۲. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کُلی نمونه‌ی دوم ۹۰
- شکل ۵-۳. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کُلی نمونه‌ی سوم ۹۰
- شکل ۵-۴. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کُلی نمونه‌ی چهارم ۹۱
- شکل ۵-۵. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کُلی نمونه‌ی پنجم ۹۱
- شکل ۵-۶. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی نخست ۹۲
- شکل ۵-۷. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی دوم ۹۳
- شکل ۵-۸. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی سوم ۹۳
- شکل ۵-۹. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی چهارم ۹۳
- شکل ۵-۱۰. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی پنجم ۹۴
- شکل ۵-۱۱. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نخست ۹۵
- شکل ۵-۱۲. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی دوم ۹۵
- شکل ۵-۱۳. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی سوم ۹۵
- شکل ۵-۱۴. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی چهارم ۹۶
- شکل ۵-۱۵. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی پنجم ۹۶
- شکل ۵-۱۶. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نخست ۹۷
- شکل ۵-۱۷. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست ۹۸
- شکل ۵-۱۸. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی نخست ۹۹
- شکل ۵-۱۹. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی دوم ۹۹
- شکل ۵-۲۰. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی سوم ۹۹
- شکل ۵-۲۱. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی چهارم ۱۰۰
- شکل ۵-۲۲. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی پنجم ۱۰۰
- شکل ۵-۲۳. ائتلاف انرژی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست ۱۰۵
- شکل ۵-۲۴. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های نخست و ششم ۱۰۷
- شکل ۵-۲۵. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های دوم و هفتم ۱۰۷
- شکل ۵-۲۶. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های سوم و هشتم ۱۰۷

- شکل ۵-۲۷. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های چهارم و نهم ۱۰۸
- شکل ۵-۲۸. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های پنجم و دهم ۱۰۹
- شکل ۵-۲۹. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی ششم و نمونه‌ی یازدهم ۱۱۱
- شکل ۵-۳۰. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی هفتم و نمونه‌ی دوازدهم ۱۱۲
- شکل ۵-۳۱. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی هشتم و نمونه‌ی سیزدهم ۱۱۲
- شکل ۵-۳۲. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نهم و نمونه‌ی چهاردهم ۱۱۲
- شکل ۵-۳۳. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی دهم و نمونه‌ی پانزدهم ۱۱۳
- شکل ۵-۳۴. سنجش پیکربندی اتصال SST (نمونه‌ی پانزده) با اتصال SST_R ۱۱۶
- شکل ۵-۳۵. نمایش همسان‌سازی پیکربندی اتصال RBS با پیوند تسلیمی اتصال SST (نمونه‌ی پانزده) ۱۱۶
- شکل ۵-۳۶. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS ۱۱۸
- شکل ۵-۳۷. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نرمال‌سازی‌شده‌ی نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS ۱۱۸
- شکل ۵-۳۸. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال‌های SST، SST_R و RBS ۱۱۹
- شکل ۵-۳۹. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال‌های SST، SST_R و RBS ۱۲۰
- شکل ۵-۴۰. نمودارهای پوشش اتصال SST، SST_R و RBS ۱۲۱
- شکل ۵-۴۱. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال SST ۱۲۲
- شکل ۵-۴۲. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال SST_R ۱۲۳
- شکل ۵-۴۳. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال RBS ۱۲۳
- شکل ۵-۳۵. ائتلاف انرژی نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS ۱۲۶
- شکل ۵-۳۶. خط‌های به‌کارگرفته‌شده در ترسیم نمودارهای شناسه‌ی گسیختگی ۱۲۷
- شکل ۵-۳۷. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط A ۱۲۸
- شکل ۵-۳۸. نمودار شناسه‌ی سه‌محوری برای خط A ۱۲۸
- شکل ۵-۳۹. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط A ۱۲۹
- شکل ۵-۴۰. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B ۱۲۹
- شکل ۵-۴۱. نمودار شناسه‌ی سه‌محوری برای خط B ۱۳۰
- شکل ۵-۴۲. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط B ۱۳۰
- شکل ۵-۴۳. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS ۱۳۲

- ۱۳۳ شکل ۴۴-۵. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال‌های SST، SST_R و RBS
- ۱۳۴ شکل ۴۵-۵. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال‌های SST، SST_R و RBS
- ۱۳۵ شکل ۴۶-۵. سازوکار تغییر شکل چشمه‌ی اتصال‌های SST و RBS_R
- ۱۳۵ شکل ۴۷-۵. نمودارهای پوشش اتصال SST و RBS_R
- ۱۳۶ شکل ۴۸-۵. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال RBS_R
- ۱۳۸ شکل ۴۹-۵. اتلاف انرژی نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS
- ۱۳۹ شکل ۵۰-۵. نمودار کرنش پلاستیک معادل برای خط A
- ۱۳۹ شکل ۵۱-۵. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط A
- ۱۴۰ شکل ۵۲-۵. نمودار شناسه‌ی سهمحوری برای خط A
- ۱۴۰ شکل ۵۳-۵. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط A
- ۱۴۱ شکل ۵۴-۵. نمودار کرنش پلاستیک معادل برای خط B
- ۱۴۱ شکل ۵۵-۵. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B
- ۱۴۲ شکل ۵۶-۵. نمودار شناسه‌ی سهمحوری برای خط B
- ۱۴۲ شکل ۵۷-۵. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط B
- ۱۶۴ شکل پ-۱. تاریخچه‌ی بارگذاری
- ۱۶۷ شکل پ-۲. نمونه‌ی قاب آزمایشگاهی، با اتصال یک‌طرفه، به‌منظور بررسی پیش‌پذیرفتگی اتصال تیربه‌ستون [5]
- ۱۶۷ شکل پ-۳. نمونه‌ی قاب آزمایشگاهی، با اتصال دوطرفه، به‌منظور بررسی پیش‌پذیرفتگی اتصال تیربه‌ستون [5]

فهرست رابطه‌ها

۲۴	۱-۳
۲۴	۲-۳
۲۷	۳-۳
۲۸	۴-۳
۲۸	۵-۳
۳۶	۶-۳
۳۷	۷-۳
۳۷	۸-۳
۳۷	۹-۳
۳۸	۱۰-۳
۳۸	۱۱-۳
۴۹	۱-۴
۴۹	۲-۴
۸۹	۳-۴
۸۹	۴-۴

۱. سرآغاز

در آغازین فصل پایان‌نامه نخست پیش‌گفتاری از موضوع پایان‌نامه گفته خواهد شد؛ که اتصال‌های فولادی پیش‌پذیرفته‌است، و سپس به بازگوئی هدف‌های پژوهش، روش پژوهش و ساختار پایان‌نامه پرداخته خواهد شد.

۱-۱. پیش‌گفتار

صنعت ساختمان از دیرباز یکی از مهمترین صنعت‌های همراه با زندگی روزمره‌ی انسان بوده‌است. شاید بتوان گفت صنعت ساختمان یکی از کهن‌ترین صنعت‌های بشری است. این اهمیت به‌خاطر عوامل بسیاری شکل گرفته که اهمیت هریک از آنها در طول زمان تغییر کرده‌است، گاه بر اهمیت برخی افزوده و گاه از اهمیت برخی دیگر کاسته شده‌است. از جمله عامل‌هایی که همواره بر اهمیت آنها افزوده شده‌است، می‌توان به حفظ امنیت جانی، حفظ امنیت روانی و صرفه اقتصادی اشاره کرد. در مهندسی سازه بیشتر با ۲ عامل امنیت جانی و صرفه اقتصادی سروکار داریم. امروزه در مهندسی سازه تلاش بر آن است که با استفاده از افزایش روز افزون علوم و تکنولوژی‌های گوناگون، بتوان همراه با افزایش ایمنی جانی سازه، قیمت تمام شده‌ی سازه را هم کاهش داد.

سازه‌های فولادی یکی از رایج‌ترین نوع سازه‌های ساختمانی است. اصلی‌ترین عامل این کاربرد فراوان، ویژگی‌های بی‌همتای فولاد است. از جمله‌ی این ویژگی‌ها که فولاد را به فلز و مصالحی بی‌نظیر در صنعت ساختمان تبدیل نموده، می‌توان به مقاومت بالا، شکل‌پذیری^۱ و مقاومت یکسان کششی و فشاری، اشاره کرد. عامل دیگری که به رواج سازه‌های فولادی کمک کرده، امکان تولید کارخانه‌ای

^۱ شکل‌پذیری یعنی، توانائی استهلاک انرژی توسط رفتار غیر الاستیک.

بیشتر نیم‌رخ‌های به کار رفته در سازه‌های فولادی است. همه‌ی این عوامل منجر به برترهائی چون شکل‌پذیری بالای سازه‌های فولادی، سرعت اجرای بالا در سازه‌های فولادی و غیره شده‌است. شاید بتوان گفت در مقایسه با سازه‌های همچون سازه‌های بتن مسلح کنترل کیفیت ساده‌تر و دقیق‌تر هم از محاسن سازه‌های فولادی است، اما به علت استفاده از عملیات جوشکاری کارگاهی (در محل) که امروزه رواج زیادی در اجرای سازه‌های فولادی دارد، کنترل کیفیت این دسته از سازه‌های فولادی (که با نام سازه‌های فولادی جوشی از آنها یاد می‌شود)، کمی دشوار و همراه با افزایش هزینه است.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های سازه‌های فولادی، اتصال‌های آنها است. در مورد سازه‌های قاب خمشی فولادی که به‌خاطر شکل‌پذیری بالا، جزء بهترین سیستم باربر جانبی محسوب می‌شوند، به جرأت می‌توان گفت پر مخاطره‌ترین و مهم‌ترین بخش این سازه‌ها، اتصال‌های آنها است.

در اواسط قرن بیستم میلادی مهندسان سازه بر این باور بودند که اتصال‌های خمشی (اتصال‌های گیردار) معمول به کار برده شده در سازه‌های قاب خمشی فولادی آن زمان می‌توانند چرخش‌های پلاستیک بزرگ تا میزان 0.02 رادیان و یا حتی بیشتر را تحمل کنند، بدون آنکه کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت آنها حاصل شود. حتی بسیاری از این مهندسان سازه بر این عقیده بودند که ساختمان‌های قاب خمشی فولادی هرگز در برابر زمین‌لرزه تخریب نخواهند شد و حتی در صورت وجود خرابی و آسیب، این آسیب‌ها تنها محدود به تسلیم و جاری شدن اعضا و اتصال‌ها خواهد بود و تخریب کلی و اساسی در سازه رخ نخواهد داد. با این باورها، پس از سال ۱۹۶۰ میلادی، در تعداد زیادی از سازه‌ها از سیستم قاب خمشی فولادی استفاده می‌شد، به خصوص در ایالات متحده (بیشتر در مناطق غربی ایالات متحده) که با استفاده از سیستم قاب خمشی فولادی با اتصال‌های گیردار خمشی معمول در آن زمان، تعداد زیادی سازه‌های ساختمانی، صنعتی و ... طراحی و ساخته شدند.

سرانجام در سال ۱۹۹۴ میلادی در ایالت کالیفرنیا آمریکا، زمین‌لرزه‌ای با نام نرت‌ریچ رخ داد که نقش مهمی در روند پیشرفت اتصال‌های خمشی فولادی داشت؛ و باورهای قبلی مهندسان در مورد رفتار سازه‌های قاب خمشی فولادی و اتصال‌های گیردار آنها را به کلی زیر سوال برد. زمین‌لرزه‌ی نرت‌ریچ مهم‌ترین زمین‌لرزه، در روند روبه‌رشد اتصال‌های خمشی فولادی است. به‌طوری که طراحی

اتصال‌های فولادی را به ۲ دسته‌ی، اتصال‌های پیش‌نرت‌ریچ^۱ و اتصال‌های پس‌نرت‌ریچ^۲، تقسیم کرده‌است.

در زمین‌لرزه‌ی نرت‌ریچ بیش از ۱۵۰ ساختمان قاب خمشی، به صورت جدی آسیب دید [6] [7]. عملکرد این ساختمان‌ها، آئین‌نامه‌های ساختمانی رایج قبل از زمین‌لرزه‌ی نرت‌ریچ را که برای طراحی لرزه‌ای و ارزیابی سازه‌های قاب خمشی فولادی، استفاده می‌شد را به صورت اساسی زیر سوال برد [6] [7]؛ به‌ویژه در عضوهای عمیق (عضوهای بالنگر مانند بالا) و یا عضوهای با اندازه‌های معمول در ساخت ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته است. همکاری مشترک "SAC"^۳، آزمایش‌های زیادی را به منظور غلبه بر عدم قطعیت پیچیده، در طراحی قاب‌های خمشی فولادی، به عمل آورد تا عملکرد چرخه‌ای (رفت و برگشتی) اتصال را با اصلاح جزئیات هندسی جوش، و یا اصلاح هندسه اتصال بهبود بخشد [6].

در قرن بیست و یکم تلاش مهندسان بر آن بوده تا اتصال‌های فولادی جدیدی ارائه دهند که به صورت هم‌زمان، چند هدف در مورد اتصال‌های فولادی را برآورده کند. از مهم‌ترین این هدف‌ها می‌توان به شکل‌پذیری بالا، حذف جوش کارگاهی، سرعت اجرای بالا، کاهش قیمت تمام شده و... اشاره کرد. البته گاهی هزینه‌ی اولیه‌ی این اتصال‌ها اندکی بالا می‌رود که با کم کردن هزینه‌های کنترل کیفیت جوش (در کارگاه) و کاهش زمان اجرا، این افزایش هزینه‌ها پوشش داده می‌شود.

¹ Pre-Northridge

² Post-Northridge

^۳ مخفف ابتدای نام سه گروه که پس از زمین‌لرزه‌ی نرت‌ریچ، با حمایت مالی OES (اداره‌ی خدمات اضطراری - Office of Emergency Services) و FEMA (سازمان فدرال مدیریت بحران - Federal Emergency Management Agency) برای ارائه‌ی شیوه‌های بازسازی و روش‌های طراحی جدید برای آسیب حداقلی به ساختمان‌های قاب خمشی فولادی، در زمین‌لرزه‌های آینده؛ با هم به هم کاری پرداختند. نام این سه گروه از این قرار بود: SEA (انجمن مهندسان سازه کالیفرنیا - Structural Engineers Association of California)، ATC، (انجمن فناوری کاربردی - Applied Technology Council) و CUREE (کنسرسیوم دانشگاهی برای پژوهش در مهندسی زلزله - Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering).

در بین آئین‌نامه‌های ساختمانی رایج امروزی، پیش‌گام‌ترین آئین‌نامه در بحث اتصال‌های خمشی فولادی، آئین‌نامه‌ی "AISC"^۱ است. به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۵ (میلادی) آئین‌نامه‌ای مخصوص، برای اتصال‌های خمشی فولادی با نام "اتصال‌های پیش‌پذیرفته برای قاب‌های خمشی فولادی ویژه و متوسط در کاربردهای لرزه‌ای"^۲ توسط AISC تهیه شد و با شماره ۳۵۸، موسسه‌ی استانداردهای ملی آمریکا^۳ ارائه گردید.^۴ در سال ۲۰۱۶ (میلادی) آخرین ویرایش آئین‌نامه اتصال‌های پیش‌پذیرفته^۵ منتشر شد که همه‌ی ویرایش‌های قبلی خود را پوشش می‌دهد. در این آئین‌نامه ۹ دسته، اتصال خمشی تأیید شده وجود دارد که محدودیت‌ها و ضوابط طراحی هر کدام در یک فصل جداگانه توضیح داده شده است؛ و مهندسان در سازه‌های قاب خمشی متوسط^۶ و قاب خمشی ویژه^۷، یا باید از این اتصال‌ها استفاده کنند و یا با آزمایش عملکرد اتصال مورد استفاده‌ی خود را به‌اثبات برسانند.

نام‌های این اتصال‌های پیش‌پذیرفته به ترتیب عبارت‌انداز [1]:

۱. اتصال خمشی تیر با مقطع کاهش‌یافته (RBS)^۸؛
۲. اتصال‌های خمشی با ورق انتهائی گسترش‌یافته‌ی سخت‌شده و سخت‌نشده‌ی پیچی (BUEEP & BSEEP)^۹؛
۳. اتصال خمشی ورق با بال پیچ‌شده (BFP)^{۱۰}؛
۴. اتصال خمشی جان جوش‌شده و بال جوش‌شده‌ی تقویت‌نشده (WUF-W)^{۱۱}؛

^۱ انجمن (ساخت) فولاد آمریکا (American Institute of Steel Construction)

^۲ Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications.

^۳ American National Standards Institute (ANSI)

^۴ ANSI/AISC 358, "Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications", Chicago.

^۵ ANSI/AISC 358-16

^۶ Intermediate Moment Frame (IMF)

^۷ Special Moment Frame (SMF)

^۸ Reduced beam section (RBS) moment connection

^۹ Bolted unstiffened and stiffened extended end-plate (BUEEP & BSEEP) moment connections

^{۱۰} Bolted fange plate (BFP) moment connection

^{۱۱} Welded unreinforced flange-welded web (WUF-W) moment connection

۵. اتصال خمشی براکت پیچ‌شده‌ی "کایزر" (KBB)؛^۱
۶. اتصال خمشی "کان ایکس‌ال" (ConXL)؛^۲
۷. اتصال خمشی ورق کناری (بر- ورق) (SidePlate)؛^۳
۸. اتصال خمشی قاب مقاوم "سیمپسون استرانگ‌تای" (SST)؛^۴ و
۹. اتصال خمشی جفت تی.^۵

سه اتصال آخر در ویرایش سال ۲۰۱۶ (میلادی) به این آئین‌نامه اضافه شده است.

در این پایان‌نامه از اتصال خمشی سیمپسون استرانگ‌تای (Simpson Strong-Tie) با سرنام "SST" یاد می‌شود (از این نام اختصاری در متن آئین‌نامه AISC 385 هم یک‌بار استفاده شده است). نام این اتصال هم نام شرکت صاحب امتیاز تجاری آن است.^۶ شرکت سیمپسون استرانگ‌تای از اتصال "SST" برای اتصال‌های به کار رفته در "قاب مقاوم"^۷ ثبت امتیاز شده‌ی خود استفاده می‌کند. قاب مقاوم برای مقاوم‌سازی طبقه‌ی نرم ساختمان‌های موجود، استفاده می‌شود. از آن‌جاکه بسیاری از ساختمان‌هایی که در آمریکا نیاز به مقاوم‌سازی دارند، ساختمان‌های چوبی هستند و همچنین این ساختمان‌ها در حال استفاده هستند، نداشتن عملیات جوش کاری در محل، نه تنها از لحاظ پائین آوردن هزینه‌های کنترل کیفیت جوش، بلکه از لحاظ حذف خطر آتش‌سوزی بسیار مهم است. این اتصال به صورت کامل پیچی است. در شکل ۱-۱ اتصال "SST" نشان داده شده است.

¹ Kaiser bolted bracket (KBB) moment connection

² ConXtech ConXL (ConXL) moment connection

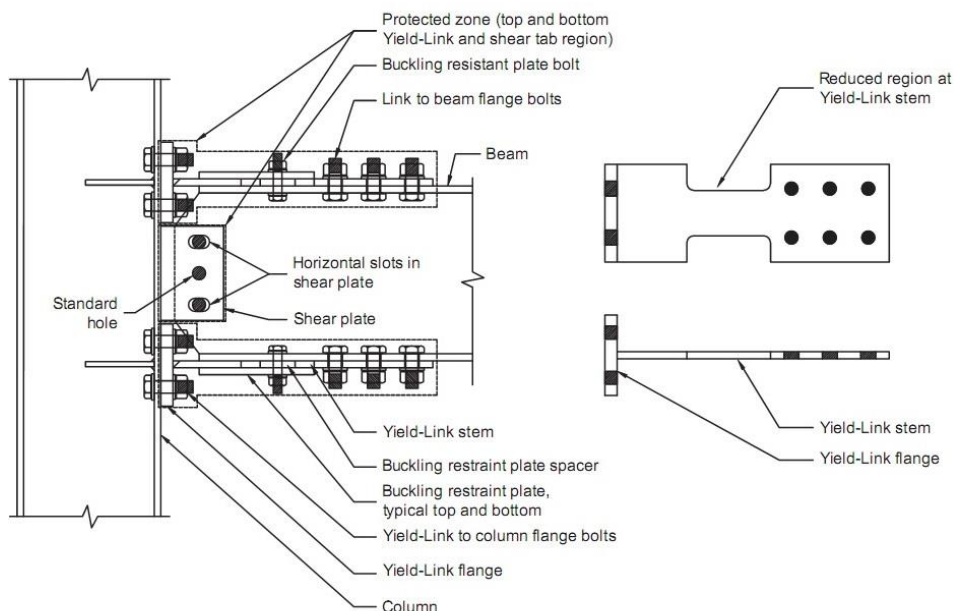
³ SidePlate moment connection

⁴ Simpson Strong-Tie Strong Frame (SST) moment connection

⁵ Double-tee moment connection

⁶ Simpson Strong-Tie Company

⁷ Strang Frame



شکل ۱-۱. اتصال "SST" [۱]

برای دور کردن محل تشکیل مفصل پلاستیک از بر ستون، ۲ راه کار وجود دارد:

۱. تقویت اتصال (در بر ستون)

۲. تضعیف موضعی تیر (با فاصله‌ی مشخص از بر ستون)

در اتصال SST به نوعی از راه کار دوم برای دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون استفاده شده‌است. با این تفاوت که به جای تضعیف موضعی تیر، "پیوند تسلیم‌شونده"^۱ به صورت موضعی تضعیف شده‌است، به عبارتی تیر هیچ‌گونه آسیبی ندیده و همچنین مفصل پلاستیک هم به شکل مستقیم در تیر تشکیل نمی‌شود. این ۲ ویژگی برتر باعث می‌شود، به هیچ‌گونه تمهیدات اضافه برای مهار جانبی محل تشکیل مفصل پلاستیک، نیاز نباشد. به عبارتی برای مهار جانبی تیر و محل اتصال به تمهیدات فراتر از الزامات عمومی AISC برای مهار جانبی تیر، نیاز نیست [۱].

^۱ Yield-Link

۲-۱. هدف‌های پژوهش

ایران کشوری لرزه‌خیز است که به واسطه‌ی زمین‌لرزه‌هائی که طی ادوار گوناگون در آن رخ داده‌است، متحمل تلفات و خسارات جانی و مالی زیادی شده‌است. در قرن اخیر که ساخت‌وساز ساختمان‌ها در کشورمان به سمت نظام‌مند شدن و مقاوم شدن در برابر زمین‌لرزه پیش‌رفته‌است، استفاده‌ی گسترده از سازه‌های فولادی در اکثر نقاط کشور رایج شده‌است. سازه‌های فولادی در کشورمان عموماً به شکل جوشی اجرا می‌شود. در اجرای بسیاری از این سازه‌ها، انجام جوش کاری کارگاهی (در محل) هم به فراوانی انجام می‌شود. با در نظر گرفتن مسائل اجرائی سازه‌های فولادی در کشور، به‌ویژه کیفیت پائین جوشکاری در ایران، ایجاب می‌کند که مطالعاتی در راستای کاهش اثرات ناشی از ضعف‌های مطرح شده انجام شود. با توجه به‌اینکه در سازه‌های فولادی اکثر جوش کاری‌ها (به‌ویژه جوش کاری‌های در محل که از کیفیت کم‌تری هم برخوردارند)، در بخش اتصال‌های این سازه‌ها انجام می‌شود، یکی از راه کارهای موجود برای برطرف کردن مشکل کیفیت پائین جوش‌ها در سازه‌های فولادی ایران، استفاده از اتصال‌های پیچی است.

دستورالعمل طراحی سازه‌های فولادی ایران (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) در ویرایش سال ۹۲، ادبیات استفاده از اتصال‌های پیش‌پذیرفته را در بند ۱۰-۳-۱۳ جاری نمود. مقررات مندرج در این بند به‌طور عمده از ویرایش دوم ضوابط پیش‌پذیرفتگی اتصال‌های "AISC" پیروی نموده که البته در مواردی نیز اختلاف‌هائی وجود دارد [5].

در این پایان‌نامه قصد داریم به بومی‌سازی اتصال SST پردازیم. از آن‌جا که محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای مقاطع (نورد شده) تیر و ستون این اتصال در آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته، براساس مقاطع نورد شده با استاندارد ایالات متحده‌ی آمریکا است، نمی‌توان از آن برای نیم‌رخ‌های (نورد شده) رایج در ایران که با استاندارد متفاوت ساخته می‌شوند، استفاده کرد. همچنین محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده برای مقاومت فولاد مورد استفاده در این اتصال هم مطابق با استاندارد متفاوت با استاندارد رایج در ایران است، به همین دلیل استفاده از اتصال SST، بدون انجام پژوهش‌هائی

¹ ANSI/AISC 358-16

که محدودیت‌های آن‌را برای مصالح و نیم‌رخ‌های رایج در ایران مشخص نکرده باشد، کاری اشتباه و از لحاظ علمی مردود است.

برای رسیدن به محدودیت‌های استفاده از اتصال SST، مطابق با مقاطع و مصالح (فولادی) رایج در ایران، باید رفتار لرزه‌ای اتصال SST را با مقاطع رایج در ایران، بررسی کنیم.

همچنین یکی از هدف‌های مهم دیگر پایان‌نامه درک رفتار اتصال SST با نیم‌رخ‌های پُرکاربرد در ایران است که با بررسی‌های گوناگون روی نمونه‌های ساخته‌شده از این اتصال و گاه با سنجش این اتصال با اتصال‌های مشابه این مهم به‌دست می‌آید.

۳-۱. روش پژوهش

همان‌طور که بیان شد؛ برای تأیید یک اتصال در آئین‌نامه‌ی AISC، اتصال باید آزمایش‌های انجام شده طبق آئین‌نامه‌ی ضوابط لرزه‌ای AISC را با موفقیت بگذراند تا مورد تأیید قرار گیرد. در بخش K2 ضوابط لرزه‌ای AISC کلیه‌ی موارد و شرایط لازم و مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های لرزه‌ای اتصال‌های بیان شده است. از جمله‌ی مهم‌ترین مواردی که در این بند به آن اشاره شده می‌توان به معیارهای پذیرش اتصال، تاریخچه‌ی بارگذاری چرخه‌ای اتصال و... اشاره کرد.

در این پژوهش نیز برای بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال SST با مقاطع رایج ایران، از ضوابط لرزه‌ای AISC پیروی شده‌است، بار چرخه‌ای اعمالی به‌صورت کنترل تغییر مکان در انتهای تیر اعمال گردیده. البته در اینجا آزمایش به‌صورت شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار اجزا محدودی پیاده و نتایج استخراج شده‌است. برای اطمینان بیشتر به نتایج، آنالیز حساسیت نیز صورت پذیرفته است.

برای بررسی عملکرد لرزه‌ای اتصال SST با مقاطع ایرانی، از روش عددی "اجزا محدود غیر خطی" استفاده شده‌است. همچنین برای تحلیل اجزا محدود غیر خطی از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس^۱ استفاده شده‌است.

^۱ ABAQUS version 6.14.2

۴-۱. ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۶ فصل نگارش شده است، که در ادامه چکیده‌ای از موضوع‌های نگارش شده و هدف‌های هر فصل، گزارش خواهد شد.

۱-۴-۱. فصل نخست؛ سرآغاز

این فصل دید کلی پایان نامه را روشن می‌سازد و در آن مطلب‌های مهمی بیان می‌شود که چراغ راه پژوهش بوده و با دقت در نگارش آن از هدررفت زمان در انجام پژوهش به مقدار چشم‌گیری کاسته می‌شود.

این فصل شامل پیش‌گفتار، هدف پژوهش، روش پژوهش و ساختار پایان نامه می‌باشد.

۲-۴-۱. فصل دوم؛ نگاهی به پیش‌پذیرفتگی و پیشینه پژوهش

در آغاز فصل دوم به پیش‌پذیرفتگی اتصال‌ها از دیدگاه‌های گوناگون پرداخته شده است؛ از چرایی نیاز به پیش‌پذیرفتگی اتصال‌ها و روند رسیدن به اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی کنونی تا بایستگی‌های آئین‌نامه‌ای برای روند پیش‌پذیرفتگی یک اتصال. پس از آن پیشینه پژوهش مرتبط با زمینه‌ی پایان نامه که مراد اصلی آن آشنایی کامل پژوهشگر با تمام کارهای انجام گرفته در گذشته، برای دوری از دوباره‌کاری می‌باشد، بیان می‌شود. البته پژوهش‌های پیشین افزون بر هدف‌های بالا در موارد مهمی راه و روش کار را روشن می‌سازد.

۳-۴-۱. فصل سوم؛ مفاهیم طراحی لرزه‌ای و مبانی مدل‌سازی

در این فصل پس از بحث کامل در مورد دیدگاه‌های نوین طراحی لرزه‌ای و بررسی‌هایی که نیاز است بر روی اتصال از این منظر صورت گیرد به مبانی نظری پژوهش حاضر پرداخته می‌شود. در پژوهش‌های عددی نیاز به آشنایی با مبانی نظری و همچنین شیوه‌ی بکارگیری آن در نرم‌افزار بسیار مهم است و تسلط بر آن می‌تواند استفاده درست از نرم‌افزار و همچنین خروجی‌ها و تفسیر-های مورد نیاز را تضمین کند. از سوی دیگر در مورد مدل‌سازی هر اندازه شیوه‌ی مدل‌سازی و

استفاده از توانایی‌های نرم‌افزاری به صورت ریز و به گستردگی توضیح داده شود، راه برای استفاده از این پایان‌نامه برای پژوهشگران آینده هموارتر خواهد بود. همچنین امکان سنجش درستی مسیر پیموده شده توسط پژوهشگر برای دیگران فراهم‌تر خواهد کرد و به همان میزان می‌توان به نتیجه‌های ارائه شده در راستی آزمائی بیشتر اطمینان کرد.

۴-۴-۱. فصل چهارم؛ مدل‌سازی و راستی آزمائی

در فصل چهارم پایان‌نامه پس از ارائه مبانی مورد نیاز پژوهش در فصل چهارم، به بیان کامل شیوه مدل‌سازی نرم‌افزاری نمونه‌های به کار گرفته شده در این پژوهش پرداخته شده است. گزارش شیوه مدل‌سازی نمونه، دربرگیرنده همه‌ی نکته‌های ساخت هندسه و فرض‌های مدل‌سازی می‌باشد. همچنین ۲ راستی آزمائی انجام گرفته در پایان این فصل ارائه شده است.

۵-۴-۱. فصل چهارم؛ بررسی رفتار اتصال SST با نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در ایران

فصل چهارم پایان‌نامه به ارائه نتیجه‌های بدست آمده از نرم‌افزار در قالب نمودارها و کمی‌سازی آنها اختصاص می‌یابد. واضح است که ارائه نتیجه‌های نرم‌افزاری با قالب‌های درست و به‌طور کامل روشن و گویا با کمترین پیچیدگی در عین نمایش بیشترین اطلاعات می‌تواند هم به خواننده پایان‌نامه کمک کند و همچنین کار را برای تفسیر نتیجه‌های بدست آمده آسان می‌نماید.

در این فصل به ارائه نتیجه‌هایی از نرم‌افزار پرداخته خواهد شد که بتوان با بررسی آنها در فصل پنجم به پرسش‌های اصلی پژوهش پاسخ داده و به اهداف ذکر شده در فصل نخست دست یافت.

۶-۴-۱. فصل ششم؛ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

فصل پنجم به بررسی نتیجه‌های پژوهش که در فصل چهار ارائه شده می‌پردازد و مهم‌ترین فصل پایان‌نامه بوده زیرا در صورت تسلط کامل پژوهشگر بر زمینه مورد پژوهش می‌تواند با استفاده از نتیجه‌های خام بدست آمده با تفسیری کامل و دقیق به نتیجه‌های ارزشمندی دست یابد و پژوهش را به هدف‌های اصلی آن برساند. همچنین در این فصل بخش پیشنهادها آورده می‌شود

که در آن با توجه به اشراف پژوهشگر به کاستی‌های احتمالی پژوهش انجام‌شده و همچنین عواملی که می‌تواند ما را به هدف‌های نو در این زمینه برساند، پژوهشگر پیشنهادهای برای انجام پژوهش‌های بعدی در این زمینه ارائه می‌کند، که اگر این بخش با دقت نوشته شود می‌تواند کمک بزرگی برای پژوهشگران آینده باشد.

در فصل پایانی این پایان‌نامه به تفسیر نتیجه‌های بدست‌آمده پرداخته شده و به هدف‌های اصلی این پژوهش دست‌یافته شود. همچنین با توجه به تجربه‌های بدست‌آمده از این پژوهش به ارائه پیشنهادهای برای انجام پژوهش‌های آینده در زمینه‌های مشابه پرداخته می‌شود.

۲. نگاهی به پیشینه پژوهش

در زمین لرزه‌ی نرت ریچ بیش از ۱۵۰ ساختمان قاب خمشی، به صورت جدی آسیب دید [6] [7]. عملکرد این ساختمان‌ها، آئین‌نامه‌های ساختمانی رایج قبل از زمین لرزه‌ی نرت ریچ را که برای طراحی لرزه‌ای و ارزیابی سازه‌های قاب خمشی فولادی، استفاده می‌شد را به صورت اساسی زیر سوال برد [6] [7]. بخصوص در عضوهای عمیق (عضوهای بالنگر ماند بالا) و یا عضوهای با اندازه‌های معمول استفاده شده، در ساخت ساختمان‌ها. همکاری مشترک "SAC"، آزمایشات زیادی را به منظور غلبه بر عدم قطعیت پیچیده، در طراحی قاب‌های خمشی فولادی، به عمل آورد تا عملکرد چرخه‌ای (رفت و برگشتی) اتصال را با اصلاح جزئیات هندسی جوش، و یا اصلاح هندسه اتصال بهبود ببخشد [۴]. بیشتر آسیب‌های به وجود آمده در محل اتصال تیر به ستون رخ داده بود، چون در آنها ظرفیت چرخش غیر کشسان اتصال کمتر از ظرفیت غیر کشسان اعضای قاب بود [8] [9] [10]. این گسیختگی‌ها شامل، گسیختگی‌های غیر شکل پذیر در ریشه جوش شیاری با نفوذ کامل^۱ در محل اتصال بال تیر به ستون، بال تیر و مقطع میانی ستون بوده است [9] [10]. در راستای بهبود عمل کرد لرزه‌ای اتصال‌های خمشی فولادی پس از زمین لرزه‌ی نرت ریچ می‌توان به مطالعات "سآی"^۲ و "پوپوف"^۳ [11] که بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال "ورق انتهائی"^۴ سخت کننده‌دار را با استفاده از پیچ‌های بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند طراحی این اتصال را به گونه‌ای توسعه دهند که از تمام ظرفیت پلاستیک تیر استفاده شود. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از اتصال "ورق انتهائی" سخت کننده‌دار

¹ CJP

² Tsai

³ Popove

⁴ End-Plate

نیروی اهرمی را کاهش می‌دهد. "سراج"^۱ [12] با انجام آزمایشی بر روی اتصال "ورق انتهائی" هشت پیچی دارای سخت‌کننده تحت بار چرخه‌ای، نشان داد که سختی این اتصال به ضخامت ورق انتهائی و قطر پیچ‌های متصل‌کننده به ستون وابسته است. همچنین نشان داد که نازک‌تر کردن ورق انتهائی و افزایش قطر پیچ سبب ایجاد رفتار نیمه‌گیردار در اتصال "ورق انتهائی" می‌گردد. "ادی"^۲ و همکاران [13] دریافتند که در اتصال "ورق انتهائی"، استفاده از سخت‌کننده اضافی، مقاومت خمشی و چرخش جاری‌شدگی و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی اتصال را افزایش می‌دهد. "شی"^۳ و همکاران [14] اتصال تیر به ستون با "ورق انتهائی" پیچی و ستون‌ها و تیرهای جوش‌شده با ورق را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند، نتایج نشان داد که هر ۲ سخت‌کننده‌های ورق انتهائی و سخت‌کننده‌های بال ستون، سهم اساسی در رفتار اتصال خمشی "ورق انتهائی" دارند. سخت‌کننده‌های ورق انتهائی با اطمینان از پیوستگی جان تیر، مدل گسیختگی اتصال را عوض کرده و سبب تغییر در سهم نیروئی پیچ‌ها می‌شوند و در نهایت مؤلفه‌های مُد تغییرشکلی اتصال را تغییر می‌دهند [15]. نتایج تمام بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود سخت‌کننده‌ها در وجه‌های بیرونی اتصال "ورق انتهائی" تاثیر زیادی بر رفتار لرزه‌ای این اتصال دارد؛ بنابراین در طراحی کل اتصال "ورق انتهائی" باید مشارکت سخت‌کننده‌ها به علت تغییر در خواص مکانیکی اتصال، حتماً مورد توجه قرار گیرد. "آستانه‌ی اصل"^۴ و "شم"^۵ مطالعات آزمایشگاهی زیادی در خصوص الگوی تغییر شکل و مُد گسیختگی اتصال نبشی پیچ شده انجام دادند. "کشی"^۶ و همکاران [16] این اتصال‌ها را با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کردند، آنها در ارزیابی کاربردی خود روابط پارامتری سه‌گانه‌ای برای پیش‌بینی رفتار اتصال نیمه‌گیردار ارائه کردند. مدل اجزا محدود آنها دارای مصالح غیرخطی برای تمامی مؤلفه‌ها بود و ضریب اصطکاک ۰/۱ فرض شده بود که این مقدار یک‌سوم مقدار در نظر گرفته شده برای سطوح (فولادی) دسته‌ی "A" از نظر زبری است.

¹ Seradj² Adey³ Shi⁴ Astaneh-Asl⁵ Shem⁶ Kishi

"گرامی"^۱ و همکاران [17] در بررسی عددی خود دریافتند که در اتصال سپری پیچی، با تغییر در اندازه افقی پیچ‌ها، مُد گسیختگی اتصال سپری تغییر می‌کند، به گونه‌ای که حتی ممکن است، تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه سپری روی دهد. "کاسای"^۲ و همکاران [18] در پژوهش‌ها آزمایشگاهی اتصالی همانند اتصال نبشی زیر و بالاسری همراه با سخت‌کننده و نوار برشگیر جان، تحت بار چرخه‌ای را مورد آزمایش قرار دادند. این آزمایش برای تیرهایی با ارتفاع ۴۰۶ میلی‌متر تا ۹۱۴ میلی‌متر انجام شده بود. آنها دریافتند که این نوع اتصال دارای عملکرد خمشی مناسبی بوده و سختی کافی برای رفتار چرخه‌ای را فراهم می‌آورد و ظرفیت چرخش‌های پلاستیک این اتصال بیش از اتصال‌های جوشی است.

در سال ۲۰۱۳ پریور^۳ و موری^۴ [19] در آزمایشات خود نشان دادند که اتصال SST می‌تواند الزامات لرزه‌ای آئین‌نامه AISC 358 برای اتصال‌های پیش‌پذیرفته را برآورده کند. و همچنین این اتصال می‌تواند چالش پیش‌روی مقاوم‌سازی سازه‌های چوبی در مورد مهار جانبی تیر فولادی برطرف کند. همچنین آنها نشان دادند که این اتصال به صورت کامل مفصل پلاستیک را از تیر به اجزای اتصال (سپری کاهش‌یافته) منتقل کرده‌است.

در سال ۱۳۹۴ دو پژوهش با هدف‌هائی همانند پژوهش پیش‌رو در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام پذیرفت. در این پژوهش‌ها گریوانی [20] و مقیمی [21] به ترتیب بر روی پژوهش‌هائی با موضوع‌های «بررسی و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال صلب خمشی کایزر، برای مقاطع فولادی رایج در ایران» و «بررسی و بهبود عملکرد لرزه‌ای اتصال صلب خمشی کان‌ایکسال، برای مقاطع رایج در ایران» پرداختند. هدف بنیادین این پژوهش‌ها نیز ارزیابی رفتار لرزه‌ای اتصال‌های پیش‌پذیرفته بوده‌است. دست‌آوردهای این پژوهش‌ها نشان داد که تنها برخی از نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در این را می‌توان در این اتصال‌ها به کار بُرد.

¹ Gerami² Kasai³ Pryor⁴ Murray

۳. مفاهیم طراحی لرزه‌ای و مبانی مدل سازی

۳-۱. پیش گفتار

گزاره‌ی «طراحی سازه» در واژه به معنای مجموعه‌ای از بایستگی‌ها و قوانینی است که هدف آن به وجود آوردن سازه‌ای است که از نظر شکل و ابعاد، خواست‌های مربوط به کارائی، پایدائی و زیبایی را به طور همزمان برآورده سازد. هدف بنیادین طراحی سازه، ساخت سازه‌ای است که در آن، علاوه بر ایمنی و تأمین هدف اصلی ایجاد سازه، هزینه‌های اولیه، هزینه‌های مربوط به نگهداری، تخریب‌ها و زوال‌های احتمالی نیز لحاظ گردند.

هدف‌های بیان شده برای طراحی سازه‌ها در برابر عواملی مانند بارهای زنده، مرده و برف بادشواری کمتری به دست می‌آید، در حالی که برای طراحی سازه در برابر عوامل دیگری مانند گردباد، سیل و زمین لرزه بادشواری حاصل می‌گردد. منشأ این دشواری، ماهیت به شدت احتمالاتی این پدیده‌ها و نیز وابسته بودن رفتار سازه به شدت و نوع این بارها می‌باشد. در این میان می‌توان زمین لرزه را با بیشترین میزان خسارت‌های مالی و جانی، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عامل در طراحی سازه‌ها بیان نمود.

۳-۲. ماهیت زمین لرزه و لزوم انجام طراحی لرزه‌ای

آشنائی با فلسفه طراحی لرزه‌ای، از دیدگاه‌های مختلف، دارای اهمیت بسیاری است؛ نخست از این رو که به مهندس طراح کمک می‌کند، نسبت به آنچه در مراحل مختلف طراحی انجام می‌دهد، تسلط کافی داشته باشد و اگر شرایط جدیدی در مراحل طراحی به وجود آمد که در آئین نامه‌های طراحی رایج به آنها پرداخته نشده است؛ خود طراح بتواند با قضاوت مهندسی مشکل‌های به وجود آمده را حل کند. شناخت طراح نسبت به آنچه انجام می‌دهد به او این امکان را می‌دهد تا در گزینش پارامترها و روش‌ها دقیق‌تر عمل کند و احتمال اشتباه کاهش یابد.

طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها، یعنی تعیین ویژگی‌های اعضای ساختمان، شامل نوع مصالح، شکل نیم‌رخ‌ها، ابعاد نیم‌رخ‌ها و جزئیات اتصال‌ها، براساس رفتاری که در برابر زمین‌لرزه‌های مشخص از آنها انتظار می‌رود. در بیشتر آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، ابتدا هدف‌ها و رفتارهای مورد انتظار از ساختمان‌ها بیان می‌شود و در ادامه، ضوابطی ارائه می‌گردد که در صورت رعایت آنها، ادعا می‌شود، این ساختمان‌ها می‌توانند هدف‌های بیان‌شده را برآورده نمایند. هرچه هدف‌های طراحی لرزه‌ای دقیق‌تر و شفاف‌تر بیان‌شود و همچنین بایستگی‌های پیشنهادی برای تأمین آنها مناسب‌تر تعریف شود؛ به‌طور قطع با اطمینان بیشتری می‌توان گفت که ساختمان‌های طراحی شده، هدف‌های موردنظر و عملکردهای مورد انتظار را برآورده می‌کنند. بایستگی‌های پیشنهادی، باید براساس رفتار واقعی ساختمان در هنگام زمین‌لرزه ارائه شود و تمامی نیازهای اساسی ساختمان‌ها را در برگیرد. تنها با کنترل بعضی از نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها، نمی‌تواند رفتن به سمت هدف‌های واقعی را تضمین نماید.

در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، مشخص نمودن هدف‌های طراحی، ضروری است. بایستگی‌های آئین‌نامه‌ها، متناسب با هدف‌های ازپیش تعیین شده گردآوری می‌شوند. با توجه به مشکل‌های ناشی از پیش‌بینی دقیق مقدار نیروی زمین‌لرزه‌ی وارد بر ساختمان و همچنین مسائل مربوط به طراحی اقتصادی، هدف‌های طراحی لرزه‌ای با هدف‌های طراحی غیر لرزه‌ای ساختمان‌ها، متفاوت خواهد بود. در طراحی ساختمان‌ها در برابر بارهای غیر لرزه‌ای یا معمول (بار مرده، بار زنده، بار باد، بار برف و بارهای ناشی از شرایط محیطی)، جلوگیری از آسیب سازه‌ای و غیرسازه‌ای از هدف‌های اصلی طراحی به‌شمار می‌آید. در صورتی که در طراحی لرزه‌ای، این هدف‌های برای زمین‌لرزه‌های قوی، غیراقتصادی به‌حساب می‌آید؛ زیرا برای برآورده نمودن این هدف، هزینه‌ی اجرای سازه‌ها به‌طوری‌است که این انگیزه را کمرنگ خواهد کرد. بیان هدف‌های طراحی لرزه‌ای، به‌طورکامل به مشخصات بارگذاری لرزه‌ای بستگی دارد. با توجه به کاستی‌های موجود در پیش‌بینی دقیق بار لرزه‌ای، به‌طورمعمول در تعریف آنها از دانش احتمالات استفاده می‌شود و مقدار نیروی زمین‌لرزه متناسب با شرایط لرزه‌خیزی و سابقه‌ی وقوع زمین‌لرزه در منطقه، تعریف می‌گردد. به‌منظور بیان هدف‌های طراحی لرزه‌ای، بایستی نخست به

ویژگی‌های زمین‌لرزه و سطح‌های گوناگون آن پرداخت تا با توجه به آنها، هدف‌های طراحی لرزه‌ای، بهتر تعریف شود.

باتوجه به این‌که رویکرد مهندسی به طراحی جنبه‌ی کمی داشته و گزینش و جزئیات اجرایی اعضای سازه‌ای باید به گونه‌ای باشد که در برابر تلاش‌های حاصل از همه‌ی عامل‌ها از جمله زمین‌لرزه، پاسخگو باشند. همچنین طراحی سازه برای بیشینه نیروهای قابل تصور که از بیشینه زمین‌لرزه پیش‌بینی شده برای یک ساختگاه حاصل می‌گردد، غیرمنطقی و از نظر اقتصادی نیز قابل قبول می‌باشد. بنابراین طراحی برای سطح پائین‌تری از نیروها صورت می‌گیرد. دنبال کردن این روش طراحی، به طراحی لرزه‌ای سازه‌ها^۱ می‌انجامد. در این روش، سازه به گونه‌ای تحلیل و طراحی می‌گردد که نقاط پیش‌بینی شده برای تحمل آسیب‌های موضعی، بخش اعظم انرژی لرزه‌ای وارد شده به سازه را جذب نموده، به‌طوری‌که قادر باشند تغییر شکل‌های خمیری را بدون کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت تحمل نمایند. همزمان دیگر اعضای سازه نیز در محدوده‌ی کمابیش کشسان باقی بمانند.

توانایی تحمل تغییر شکل‌های خمیری بدون افت محسوس مقاومت، نشان‌دهنده شکل‌پذیری اعضای سازه و معیاری برای تعیین رفتار مناسب سازه طی زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌باشد. بنابراین روشن است که با توجه به نوع و شدت زمین‌لرزه، مقادیر مختلفی نیز برای شکل‌پذیری مورد نیاز می‌باشد و طراحی بهینه یک سازه با تأمین کردن شکل‌پذیری مورد نیاز آن در ارتباط مستقیم خواهد بود؛ اما این نکته را نیز باید در نظر گرفت که آسیب‌های وارد به عضوهای سازه به دلیل وارد شدن به محدوده خمیری، می‌بایست پس از زمین‌لرزه علاوه بر قابل تعمیر و بازسازی بودن، از نظر اقتصادی نیز قابل توجیه باشد. این هدف بزرگ‌ترین دغدغه و مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. هزینه‌های زیادی در این رابطه صرف شده است تا هزینه‌های مالی سنگین حاصل از زمین‌لرزه به حداقل برسد. در نتیجه، هدف بنیادین طراحی لرزه‌ای مدرن، کمینه‌سازی خسارت‌های مالی و اقتصادی به همراه حفظ جان افراد می‌باشد. ارزیابی و تأمین شکل‌پذیری مورد نیاز، عامل بسیار مهمی در حل این مشکل می‌باشد. به بیانی

^۱ Seismic Design of Structures

تأمین شکل‌پذیری مناسب یکی از اصلی‌ترین اصول طراحی سازه‌ها در برابر نیروهای شدید زمین‌لرزه است.

۳-۳. طراحی بر اساس ظرفیت^۱

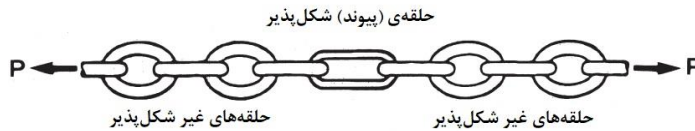
پیش‌بینی رفتار سازه در مقابل رخ‌دادهای طبیعی همواره دغدغه‌ی پژوهش‌گران و طراحان بوده تا بتوانند با توجه به آن سازه‌هایی کارآمد، پایا، قابل پیش‌بینی از نظر رفتاری و قابل توجه از نظر اقتصادی طراحی کنند. شکل‌پذیری را می‌توان کلید اصلی برای رسیدن به این هدف دانست. برای درک مناسب‌تر اهمیت شکل‌پذیری و کاربرد رفتار غیرخطی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، به تشریح نظریه‌ی حلقه زنجیر پاولی پرداخته می‌شود.

پروفسور پاولی^۲ یکی از بزرگان طراحی لرزه‌ای است که پدیدآورنده‌ی روش طراحی براساس ظرفیت در طرح سازه‌ها را می‌توان او دانست. در این تئوری، به سازه همچون چند حلقه زنجیر به هم متصل مانند شکل ۳-۱ نگریسته می‌شود [2] و بنیان این نگرش برآن استوار است که در طراحی لرزه‌ای باید حلقه‌ای به صورت خودخواسته ضعیف‌تر طرح کرد تا در زمین لرزه‌ها این حلقه نخستین نقطه برای ورود به گستره‌ی غیرخطی باشد و باعث اتلاف انرژی زمین‌لرزه گردد تا بتوان پیش‌بینی و درک مناسب‌تری از رفتار سازه در رخ‌دادهای غیرمنتظره داشت؛ در این نگرش باید ۲ مورد بنیادین همواره برآورده گردد:

۱. در ناحیه تضعیف‌شده می‌بایست پیکربندی به گونه‌ای طراحی شود که در تغییر شکل‌های بزرگ دچار ناپایداری و گسیختگی نشود.
۲. دیگر حلقه‌های زنجیر به گونه‌ای طراحی شود که دارای مقاومتی باشند که با رسیدن حلقه شکل‌پذیر به آستانه مقاومتش هم چنان در ناحیه کشسان باقی بمانند.

¹ Capacity Design

² pauly chain



شکل ۳-۱. اصل طراحی براساس ظرفیت [۲]

پذیرش این اصل که برخی از اجزای سازه به صورت شکل‌پذیر عمل نمایند (حلقه شکل‌پذیر)، به این معناست که در ابتدا مقادیری خرابی را در سازه پذیرفته‌ایم، اما این خرابی‌ها نباید منجر به فرو ریزش سازه شود. یعنی هرچقدر حلقه‌ی شکل‌پذیر بتواند تغییر شکل بیشتری را بدون کاهش قابل توجه در مقاومت خود تحمل کند و دچار گسیختگی نشود، سازه شکل‌پذیرتر و سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی یا لنگر-چرخش که بیانگر انرژی جذب شده است (یا سطح داخل نمودار چرخه‌ای نیرو-جابجایی یا لنگر-چرخش که نشان‌دهنده‌ی استهلاک انرژی می‌باشد)، بیش‌تر خواهد بود. این ایده پس از مطرح شدن به شدت از سوی دانشمندان، پژوهش‌گران و مهندسان دنیا مورد استقبال قرار گرفت و به‌طور مستقیم وارد آئین‌نامه‌ها شد، به‌ویژه آئین‌نامه‌های بهسازی لرزه‌ای که برپایه‌ی روش طراحی بر اساس عملکرد^۱ می‌باشند. در آئین‌نامه‌ها به حلقه شکل‌پذیر زنجیر، عضو کنترل شونده توسط تغییر مکان^۲ و به حلقه‌های دیگر اعضا کنترل شونده توسط نیرو^۳ گفته می‌شود.

۳-۴. گونه‌های قاب‌های سازه‌ای

در سازه‌ها و به‌خصوص سازه‌های فولادی، اتصال‌ها نقش بسزایی در حفظ یک‌پارچگی سازه ایفا می‌کنند و در حقیقت وظیفه‌ی اصلی اتصال‌ها انتقال صحیح نیروها بین اعضاء و اجزای سازه‌ای وارد به آن براساس ظرفیت مورد نظر می‌باشد. در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، بایستگی‌های عمومی AISC و نیز نشریه ۲۶۴ سه گونه قاب ساختمانی به‌همراه فرضیه‌های محاسباتی مربوط به آنها بنیان طرح و محاسبه سازه‌های فولادی قرار گرفته‌است:

۱. قاب گیردار - اتصال نوع ۱ با گیرداری بیش از ۹۰٪ ($R > ۰.۹۰$)

^۱ Performance Base Design

^۲ Displacement Control

^۳ Force Control

۲. قاب ساده - اتصال نوع ۲ با گیرداری کمتر از $20\% (R > 20\%)$

۳. قاب نیمه‌گیردار - اتصال نوع ۳ با گیرداری بین 20% تا $90\% (R > 20\% \text{ و } R < 90\%)$

درجه گیرداری R ، نسبت لنگر انتهائی قابل تأمین توسط اتصال به لنگر گیرداری انتهائی در حالت تمام گیردار است.

۳-۵. مفاهیم گیرداری اتصال

گیرداری به عوامل گوناگونی بستگی دارد که مهمترین آنها عبارت‌اند از:

۱. سختی خمشی تیر؛
۲. سختی اجزای تشکیل دهنده‌ی ستون؛
۳. سختی اجزای اتصال، مانند ضخامت نبشی، ضخامت سپری، ضخامت تقویت کننده و میزان تغییر شکل آنها؛
۴. سختی تیر فرعی؛ و
۵. اثر سخت کننده بر اجزای تشکیل دهنده‌ی اتصال.

باتوجه به موارد بالا و همچنین نگاه به این موضوع که در سازه‌های فولادی، اتصال‌ها به صورت بسیار متنوع و با رفتارهای گوناگون اجرا می‌گردند، برای تعیین میزان گیرداری یک اتصال باید از روشی استفاده نمود که تمامی عوامل بیان شده را دربرگیرد و بتواند بیانگر رفتار واقعی اتصال باشد. میزان گیرداری همان طور که پیش از این گفته شد از بررسی و رسم نمودار لنگر-چرخش و خط تیر به دست می‌آید که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود. البته این روش یکی از روش‌های برآورد سختی اتصال است و روش‌های دیگری هم برای محاسبه‌ی سختی اتصال وجود دارد.

الف. اتصال‌های گیردار

اتصال به صورت گیردار فرض می‌شود که میزان گیرداری آن بیش از 90% باشد؛ به عبارت دیگر در این اتصال‌ها توانائی انتقال لنگر بین تیر و ستون وجود داشته و زاویه بین تیر و ستون ثابت و تغییر

ناپذیر است. این گونه از اتصال‌ها جهت انتقال برش و لنگر طراحی می‌گردند. گیردار بودن یک اتصال، تحت تأثیر مستقیم سختی تیر و ستون و همچنین اجزای الحاقی و تقویت‌کننده‌های آنها قرار دارد. اتصال تیر به ستون با بال نازک یا لاغر سبب کاهش گیرداری اتصال خواهد شد، که در این مورد می‌توان در بال‌های ستون و در محل اتصال بال تیر از سخت‌کننده‌ها برای افزایش گیرداری استفاده نمود.

ب. اتصال‌های ساده

اتصال ساده فرض می‌شود که میزان گیرداری آن حداکثر ۲۰٪ باشد؛ به عبارت دیگر در این اتصال‌ها توانایی انتقال لنگر خمشی بین تیر و ستون وجود ندارد و در نتیجه زاویه بین تیر و ستون به راحتی قابل تغییر می‌باشد. در مورد بار قائم، اتصال انتهای تیرها و شاه تیرها فقط برای برش می‌باشند و می‌توانند تحت اثر بار قائم، آزادانه بچرخند. برای سازه‌های دارای اتصال‌های ساده باید سیستم مقاوم دیگری در مقابل بارهای جانبی در نظر گرفته شود. این اتصال می‌بایستی ظرفیت کافی در چرخش غیرکشسان داشته باشد تا تنش‌های موجود در اجزای اتصال مانند جوش تحت حالت‌های گوناگون بارگذاری در آستانه‌ی مجاز باقی بماند.

ج. اتصال‌های نیمه گیردار

تمام اتصال‌هایی که دارای میزان گیرداری بین ۲۰٪ و ۹۰٪ هستند را می‌توان به عنوان نیمه گیردار در نظر گرفت. اگر به واقعیت اجرای اتصال‌های متداول دقت شود، به تعبیری می‌توان بیشتر اتصال‌ها را جزء این گونه در نظر گرفت. این اتصال‌ها رفتاری بین اتصال‌های ساده و گیردار دارند. نکته مهم، تحلیل قابهائی است که این نوع از اتصال‌ها در آن وجود دارند. چون می‌بایست برای تحلیل این قاب‌ها از میزان گیرداری اتصال آگاهی کافی داشت.

یکی از مواردی که در بررسی اتصال‌ها (به ویژه نیمه گیردار) و همچنین تحلیل قاب‌های فولادی دارای اهمیت بسیاری است تعیین میزان گیرداری (یا انعطاف پذیری) یک اتصال است. زاویه بین تیر و ستون در اتصال گیردار بعد از بارگذاری برابر با زاویه آغازین قبل از بارگذاری می‌باشد و در اتصال مفصلی هیچ گونه مهاری برای چرخش تیر نسبت به ستون وجود ندارد. در اتصال نیمه گیردار نیز چرخش

میان حالت مفصلی و گیردار می‌باشد. مقدار چرخش اتصال برابر با نابرابری میان زاویه تیر و ستون قبل و بعد از بارگذاری تعریف می‌شود.

پس از بیان مفاهیم در دسته‌بندی اتصال در ادامه به روش‌های عملی دسته‌بندی اتصال پرداخته می‌شود؛ که به صورت معمول در مقاله‌ها و آئین‌نامه‌های بنام به کار گرفته می‌شوند.

۳-۶. خط تیر

در اینجا ۳ گونه‌ی اتصال گیردار، نیمه‌گیردار و ساده را از دیدگاه ایده‌ی خط تیر مورد ارزیابی قرار می‌دهیم، در آغاز به شرح ایده‌ی خط تیر پرداخته و سپس در مورد رده‌بندی اتصال‌ها توضیح‌هایی بیان می‌شود. ایده‌ی خط تیر که به وسیله بتو^۱ و راون^۲ ابداع گردیده و به وسیله سورانیکاف^۳ به کار گرفته شده، وسیله‌ای ترسیمی برای تعیین وضعیت اتصال می‌باشد. رابطه‌ای که لنگر انتهایی و چرخش انتهایی را برای یک تیر تحت بار گسترده یکنواخت از گیرداری کامل تا انتهای ساده به یکدیگر مرتبط می‌کند.

با ترسیم منحنی لنگر-چرخش برای اتصال‌های گوناگون، می‌توان دید که هیچ اتصالی، رفتار ایده‌آل یک اتصال تمام گیردار و یا به طور کامل مفصلی را نشان نمی‌دهد. برای محاسبه‌ی میزان چرخش هر یک از این نوع اتصال‌ها، کافی است که از نقطه‌ی تلاقی خط تیر با منحنی مربوط به هر اتصال، خط‌هائی موازی محور M و θ رسم نمود تا لنگر و چرخش برابر هر اتصال مشخص گردد. رابطه‌ی ۳-۱ با نام رابطه‌ی خط تیر شناخته می‌شود.

$$M = M_F + \frac{2EI}{L} \theta \quad (3-1)$$

در رابطه‌ی ۳-۱، کمیت M_F لنگری است که باعث گیرداری کامل اتصال می‌شود و می‌توان میزان گیرداری را از رابطه‌ی ۳-۲ به دست آورد.

¹ Batho

² Rowan

³ Surochnikoff

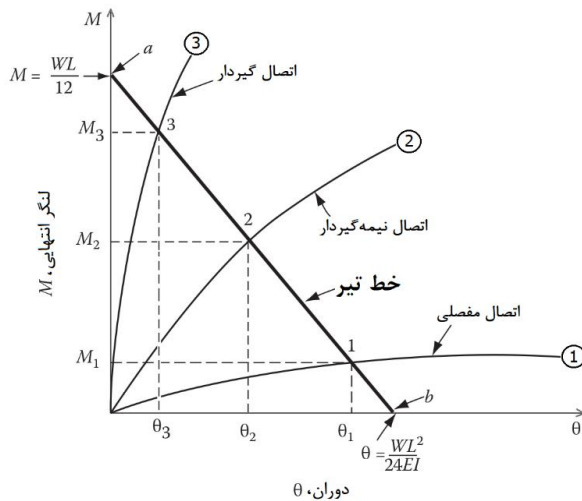
$$R = \frac{M}{M_F} \quad (۳-۲)$$

در شکل ۲-۳ خط تیر به همراه نمودار لنگر-چرخش ۳ گونه اتصال ترسیم شده است.

نمودار ۱ نشان دهنده‌ی یک اتصال مفصلی است که در یک لنگر بسیار کم، بدون آنکه خرابی در آن رخ دهد، جاری شده (M_1) و اجازه می‌دهد که اتصال بچرخد (θ_1).

نمودار ۲ نشان دهنده‌ی یک اتصال نیمه‌گیردار است. این اتصال می‌تواند به گونه‌ای طراحی شده باشد که تحت اثر بارهای بهره‌برداری تسلیم شده و چرخش لازم در اتصال به‌وجود آید، اما هنوز گیرداری کافی برای انتقال لنگر انتهایی مربوطه را داشته باشد.

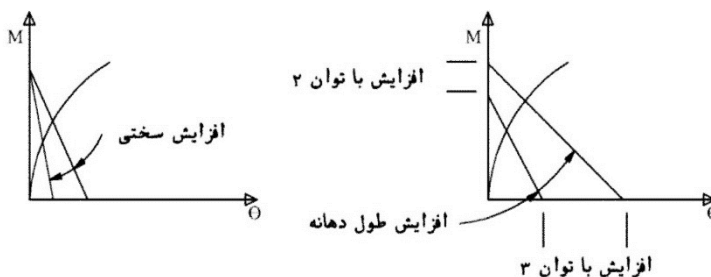
نمودار ۳ نشان دهنده‌ی رفتار یک اتصال گیردار می‌باشد که به گونه‌ای طراحی شده تا در اثر بارهای بهره‌برداری بتواند بیشتر لنگر گیرداری انتهایی را منتقل کند. رابطه‌ی ۱-۳ نشان دهنده‌ی یک خط مستقیم می‌باشد که ۲ نقطه a و b را روی نمودار نشان می‌دهد. نمودار شکل ۲-۳ نشان دهنده‌ی این نقاط بر روی نمودار است.



شکل ۲-۳. نمودار لنگر-چرخش [۳]

نقطه a نشان دهنده‌ی گیرداری کامل است. در این حالت لنگر انتهائی همان لنگر گیرداری انتهائی خواهد بود. خطی که ۲ نقطه a و b را به یکدیگر متصل می‌کند خط تیر نام دارد. اگر بار روی تیر افزایش یابد خط تیر به صورت موازی با خط اولیه به سمت خارج حرکت می‌کند. بدیهی است که حرکت این خط با افزایش مقدار لنگر انتهائی و چرخش همراه خواهد بود. در نتیجه مشاهده می‌شود رفتار تیر با رفتار اتصال رابطه مستقیم دارد و چگونگی رفتار تیر متأثر از رفتار اتصال می‌باشد.

نمودار اتصال گیردار ایده‌آلی که در تحلیل سازه فرض می‌شود، خطی روی محور M و نمودار اتصال مفصلی ایده‌آل در تحلیل سازه خطی روی محور θ در نمودار لنگر-چرخش شکل ۳-۲ می‌باشند. اما همان گونه که بیان شد برابر با آزمایش‌های انجام شده هیچ اتصال مفصلی یا گیردار ایده‌آل وجود ندارد. به بیان دیگر خط تیر عبارت است از مجموعه‌ی نقاطی که هر کدام بسته به مقدار بار گسترده، دهانه تیر، جنس مصالح تیر و ممان اینرسی بیانگر وضعیت ممکن چرخش و لنگر در یک تیر هستند. در واقع این ۴ پارامتر هستند که وضعیت تیر را مشخص می‌کنند و با توجه به نوع اتصال، وضعیت کلی ریزسازه از لحاظ گیرداری مشخص می‌گردد. مثلاً با افزایش EI تیر، درصد گیرداری اتصال کاهش می‌یابد و برعکس با افزایش بار گسترده و دهانه تیر، گیرداری اتصال افزایش می‌یابد؛ که این امر به این معناست که یک اتصال ممکن است برای یک تیر ۹۰٪ گیرداری فراهم کند، اما به طور قطع برای یک تیر سخت‌تر گیرداری کمتری فراهم می‌کند (مثلاً ۷۰٪)، که این امر بیانگر نسبی بودن سختی‌ها در مقایسه باهم است. با افزایش طول دهانه L ، تیر نرم‌تر و در نتیجه اتصال سخت‌تر می‌شود و با افزایش EI تیر سخت‌تر شده و در نتیجه اتصال رفتار نرم‌تری دارد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳. اثر تغییر EI و L بر جایجائی خط تیر

اما آیا با این تقسیم‌بندی می‌توان به رفتار اتصال اشراف کامل پیدا کرد؟ جواب این است که، هرگز؛ پژوهشگران دیگری از روی نمودار لنگر-چرخش ۳ شاخصه را برای یک اتصال تعیین می‌کنند که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۷-۳. سختی اتصال

شیب نمودار لنگر-چرخش در هر وضعیت بارگذاری سختی سازه می‌باشد که با توجه به محدوده‌ی مورد نظر در نمودار لنگر-چرخش به ۳ دسته‌ی گیردار، نیمه‌گیردار و ساده تقسیم‌بندی می‌شود. مقدار سختی از لنگر بخش بر چرخش به دست می‌آید؛ البته در نمودار لنگر با توجه به نقطه‌ی گزینش شده می‌توان سختی‌های گوناگونی را برآورد نمود. پژوهشگران مختلف نقطه‌های گوناگونی بر روی نمودار لنگر-چرخش را برای برآورد سختی اتصال پیشنهاد داده‌اند که بر پایه‌ی آن سختی‌های متفاوتی برای اتصال به دست می‌آید. در آئین‌نامه‌ی بایستگی‌های عمومی AISC نقطه‌ی گزینش شده برای برآورد سختی اتصال را نقطه‌ای همسان با لنگر ناشی از بارهای بهره‌برداری پیشنهاد می‌کند.

برای دسته‌بندی سختی اتصال، برگرفته از آئین‌نامه‌ی بایستگی‌های عمومی AISC اگر مقدار m (که در رابطه‌ی ۳-۳ شیوه‌ی برآورد آن آورده شده است) از ۲۰ بیشتر باشد اتصال گیردار و اگر از ۲ کمتر باشد اتصال ساده دسته‌بندی خواهد شد؛ همچنین اگر m بین ۲۰ و ۲ باشد اتصال نیمه‌گیردار قلمداد خواهد شد.

$$m = \frac{K_s L}{EI} \quad (3-3)$$

در رابطه‌ی بالا K_s سختی همسان با بارهای بهره‌برداری در نمودار لنگر-چرخش اتصال است، I, E, L به ترتیب طول ضریب برجهندگی و لنگر ماند تیر می‌باشد. البته در اتصالاتی چون RBS و SST مربوط به بخش کاهش یافته می‌باشد.

در بخش ۳-۱۲ توضیح داده خواهد شد که بهتر است برای برآورد سختی اتصال از نمودار لنگر-چرخش خود اتصال (که روش به دست آوردن آن هم در بخش ۳-۱۲ گفته شده است) استفاده شود.

۸-۳. مقاومت اتصال

مقاومت اتصال، بیشینه لنگر قابل تحمل اتصال است که با M_u نشان داده می‌شود. برگرفته از بخش B3.4 آئین‌نامه‌ی بایستگی‌های عمومی AISC اگر M_n از لنگر پلاستیک تیر (متصل به اتصال) بیشتر باشد، اتصال از گونه‌ی اتصال‌های تمام مقاوم و اگر M_n کمتر از لنگر پلاستیک تیر باشد اتصال از گونه‌ی نیمه‌مقاوم به‌شمار می‌آید. همچنین این آئین‌نامه پیشنهاد می‌کند که آستانه‌ی پائین مقاومت هم برای اتصال بررسی شود به‌این صورت که اگر M_u کمتر از ۲۰ درصد لنگر پلاستیک تیر بود اتصال در دسته‌ی اتصال‌های بدون مقاومت خمشی به‌شمار آید. لنگر پلاستیک تیر در اتصال‌هایی چون RBS و SST لنگر پلاستیک در بخش کاهش یافته می‌باشد.

در بخش B3.4 آئین‌نامه‌ی بایستگی‌های عمومی AISC برای مشخص نمودن M_n در صورت نداشتن قله در نمودار لنگر-چرخش نمودار با شیب همواره مثبت، مقدار لنگر همسان با چرخش ۰/۰۲ رادیان را پیشنهاد می‌دهد و چرائی این پیشنهاد هم این‌گونه بیان شده‌است که استفاده از داده‌های عملکردی اتصال در دوران‌های بالا برای ارزیابی و طراحی، کارچندان مطمئنی نیست.

۹-۳. شکل‌پذیری^۱

توانائی اتلاف انرژی حاصل از رفتار غیرکشسان کل سازه، تحت اثر تغییر شکل‌های رفت و برگشتی و بدون کاهش قابل توجه در مقاومت را شکل‌پذیری گویند. شکل‌پذیری را می‌توان به ۲ دسته تقسیم کرد؛ یکی شکل‌پذیری مواد (فولاد) و دیگری شکل‌پذیری سازه؛ شکل‌پذیری مواد، خاصیتی از ماده است که توانائی تغییر شکل‌هایی فراتر از آستانه‌ی کشسان را دارا باشد که می‌توان آن را به ۲ گونه‌ی زیر تعریف کرد:

$$\mu = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_y} \quad (۴-۳)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_y}{\varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_{total}}{\varepsilon_y} \quad (۵-۳)$$

^۱ Ductility

ϵ_p : کرنش پلاستیک؛ ϵ_y : کرنش کشسانی؛ μ : شکل‌پذیری.

شکل‌پذیری سازه نیز حاصل شکل‌پذیری اعضای آن سازه است به گونه‌ای که عضو شکل‌پذیر قادر باشد، تغییرشکل‌هایی بیشتر از آستانه‌ی کشسانی را بدون کاهش مقاومت تجربه نماید. به اعتقاد بیشتر طراحان، شکل‌پذیری و چگونگی تأمین آن در یک طرح لرزه‌ای، کلید اصلی دست‌یابی به یک طرح لرزه‌ای ایمن، مناسب و اقتصادی است. به عبارتی قابلیت سازه در جذب انرژی در گستره‌ی تغییر شکل‌های غیرکشسان یا فراکشسان، مطلوب هر طرح لرزه‌ای سازه می‌باشد. شکل‌پذیری اتصال با توجه به گستره‌ی مورد نظر در نمودار لنگر-چرخش به ۲ دسته شکل‌پذیر و ترد تقسیم بندی می‌شود. شکل‌پذیری عضو تأثیرپذیر از شکل‌پذیری مقطع است و یکی از عوامل تأثیرگذار در شکل‌پذیری مقطع کرنش نهائی در مصالح تشکیل دهنده است.

سازه‌های باربر لرزه‌ای بسته به آن‌که چه میزان بتوانند در مقاطع خاصی از خود تغییر شکل‌های فراکشسان را پذیرا باشند و این ویژگی را در بارگذاری‌های رفت و برگشتی نگه‌داشته و کاهش مقاومت و سختی چشم‌گیری در آن ایجاد نشود، شکل‌پذیر تلقی می‌گردند. سازه‌های با شکل‌پذیری بیشتر می‌توانند با مقاومت نسبی کمتری نیروی جانبی زمین‌لرزه را تحمل نمایند. در نتیجه اگر بتوانیم از مقاومت سازه تا حدودی معین و مشخص کاسته ولی در مقابل شکل‌پذیری را افزایش دهیم، آنگاه توانسته‌ایم نیروهای زمین‌لرزه را با نیم‌رخ‌هایی کمتر مستهلک کنیم. میزان شکل‌پذیری سازه به‌طور معمول با ظرفیت چرخشی که در گره‌های خود می‌تواند تحمل کند سنجیده می‌شود. چرخش یک گره با نسبت تغییر مکان نسبی طبقه فوقانی آن گره به ارتفاع طبقه تعریف می‌شود؛ بنابراین با توجه به تعریف چرخش و نیروی زمین‌لرزه وارده می‌توان نمودار لنگر-چرخش را ترسیم کرد و سطح زیر نمودار، نمایانگر انرژی جذب شده در رفتار چرخه‌ای است که معرف شکل‌پذیری سازه است، به بیانی هر چه سطح زیر نمودار بیشتر باشد، سازه شکل‌پذیرتر است.

بایستگی‌های آئین‌نامه‌های طراحی به‌ویژه شیوه‌نامه‌های ارائه‌شده در سال‌های نزدیک، تلاش بایسته‌ای در راستای تأمین و کنترل مناسب و هم‌زمان معیارهای مقاومت، سختی و شکل‌پذیری است.

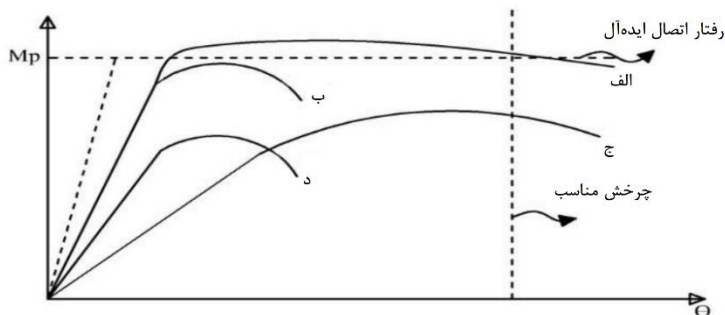
بیان این نکته ضروری است که در ایده‌ی خط تیر تنها معیار بررسی وضعیت اتصال، معیار سختی بوده است که به نظر می‌رسد معیاری فراگیر و کافی نباشد. حال نیاز به معیاری کلی است که تمامی کمیت‌ها را مورد توجه قرار داده باشد؛ بنابراین در ادامه جهت بررسی رفتار اتصال از نمودار لنگر-چرخش استفاده می‌کنیم. اگر منحنی لنگر-چرخش ۴ اتصال الف، ب، ج، د همانند شکل ۳-۴ باشد، آن‌گاه:

✎ اتصال الف: این اتصال رفتار گیردار دارد که علاوه برداشتن مقاومت و سختی مناسب، دارای ظرفیت چرخش کافی نیز می‌باشد و بنابراین از دیدگاه لرزه‌ای یک اتصال مناسب می‌باشد.

✎ اتصال ب: این اتصال رفتار گیردار دارد ولی از دیدگاه لرزه‌ای مناسب نمی‌باشد زیرا با وجود داشتن مقاومت و سختی بالا، ظرفیت چرخش کافی ندارد و در چرخش بالا دچار ترد شکنی می‌شود که مطلوب نیست و باید از به کار بردن چنین اتصال‌های پرهیز کرد.

✎ اتصال ج: این اتصال نیمه‌گیردار بوده و دارای ظرفیت چرخش هم می‌باشد با این حال مقاومت و سختی بالایی ندارد.

✎ اتصال د: این اتصال دارای سختی مناسب، ولی مقاومت و ظرفیت چرخش کمی دارد.



شکل ۳-۴. بررسی نمودار لنگر-چرخش برای اتصال‌های گوناگون

پس آنچه از نمودار لنگر-چرخش یک سازه به دست می‌آید به صورت کلی عبارت‌انداز:

۱. سطح زیر منحنی که بیانگر میزان جذب انرژی ناشی از بارگذاری است؛

۲. شیب منحنی بیانگر سختی سازه؛
۳. مقدار مقاومت سازه که با توجه به میزان لنگر به دست می‌آید؛
۴. زوال‌ها؛ و
۵. شکل‌پذیری سازه در مدت عملکرد زمین‌لرزه.

۳-۱۰. نگرش جدید در طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی

پس از پژوهش‌های فراوان مشخص شد که در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها علاوه بر مقاومت و سختی، پارامتر دیگری به نام شکل‌پذیری دارای اهمیت بسیاری است. این نگرش نو در طراحی لرزه‌ای به طراح سازه اجازه می‌دهد که بخش‌هایی از سازه را به عمد ضعیف‌تر از بخش‌های دیگر سازه طراحی نماید تا در هنگام زمین‌لرزه این بخش‌های ضعیف قبل از بقیه‌ی اعضا وارد ناحیه غیرکشسان شوند و باعث جذب و اتلاف انرژی زمین‌لرزه گردند؛ اما برای اطمینان از شکل‌پذیری سازه و پایداری کُلی آن بایست به ۲ نکته اساسی توجه نمود:

۱. پیکربندی و تناسب‌بندی اعضا و اجزای سازه در نواحی ضعیف‌تر که در هنگام زمین‌لرزه در گستره‌ی غیرکشسان قرار دارند و انرژی زمین‌لرزه را مستهلک می‌کنند به گونه‌ای باشند که این اجزا در تغییر شکل‌های غیرکشسان بزرگ دچار ناپایداری و زوال نشوند.
 ۲. دیگر اجزا و اعضای سازه که وظیفه حفظ پایداری کُلی سازه را بر عهده دارند بایستی دارای چنان مقاومتی باشند که در هنگام زمین‌لرزه و وارد شدن به ناحیه‌ی غیرکشسان اعضای شکل‌پذیر در سازه، همچنان در ناحیه کشسان باقی بمانند تا سازه دچار فروریزش کلی نگردد.
- به عبارت دیگر با پذیرفتن اینکه بعضی از اعضای سازه به صورت شکل‌پذیر عمل کنند، مقادیر محدودی خرابی در سازه مجاز است، که البته این خرابی‌ها نباید منجر به فروریزش سازه شود. در این نگرش نو، به عضو شکل‌پذیر در سازه «عضو کنترل‌شونده‌ی تغییر مکان» و به دیگر اعضا «عضو کنترل‌شونده توسط نیرو» گفته می‌شود.

۱۱-۳. دلیل نیاز به مفصل پلاستیک در تیرها

نظربه بحث‌های ارائه شده تاکنون، می‌بایست اعضائی از یک سازه قاب خمشی انتخاب شود و به صورت ویژه‌ای جزئیات‌بندی شود تا در هنگام زمین‌لرزه‌های با شدت بالا به‌صورت رفتار غیرکشسان اتلاف انرژی نماید. اعضائی که به‌عنوان عضو کنترل‌شونده توسط تغییر شکل (فیوز سازه‌ای) انتخاب می‌شود باید بایستگی‌های زیر برآورده سازد:

۱. با ورود این اعضا در ناحیه غیرخطی خلی در باربری ثقلی سازه ایجاد نشود؛

۲. میزان اتلاف انرژی توسط این اعضا از دیگر قسمت‌های قاب بیشتر باشد؛ و

۳. رفتار در ناحیه غیر کشسان این عضو به‌طور کامل شناخته شده و قابل پیش‌بینی باشد.

در سازه‌ها، تیرها به‌طور معمول دارای نیروی محوری نیستند در حالی که ستون‌ها دارای نیروی محوری قابل توجهی، ناشی از ثقل می‌باشند. همین عامل باعث می‌شود که تشکیل مفصل پلاستیک در تیرها با جذب انرژی بیشتری نسبت به ستون‌ها همراه باشد. در واقع نمودار لنگر-چرخش وقتی که بار محوری وجود دارد، دارای سختی و مقاومت کمتری می‌باشد و همین موضوع شکل‌پذیری نیم‌رخ را در صورت وجود بار محوری پائین می‌آورد.

حال که مشخص شد مفصل‌های پلاستیک بایستی در تیرها تشکیل شوند، نیاز داریم، این مفصل‌ها در فاصله‌ای دورتر از برستون تشکیل شوند. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، پس از زمین‌لرزه نورتریج ۲ استراتژی در طرح لرزه‌ای اتصال‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

۱. تقویت اتصال‌ها در برستون به گونه‌ای که مفصل‌های پلاستیک از برستون دور شوند و به درون تیر منتقل شوند؛ و

۲. تضعیف مقطع تیر در برستون به گونه‌ای که محل تشکیل مفصل‌های پلاستیک مشخص و با فاصله از برستون باشد.

نکته‌ی دیگر که اهمیت دارد محل ایجاد مفصل پلاستیک در تیر است و اینکه بهتر است در کجای تیر مفصل پلاستیک تشکیل شود؟ آنچه که روشن است این است که رفتار مفصل پلاستیک در تیر بایستی

مستقل از نوع مصالح جوش و کیفیت عمل جوشکاری باشد که مهم‌ترین عامل آن را مهارت جوشکار تعیین می‌کند. همچنین این مسأله‌ی قابل توجه است که جوش یک مصالح ناشناخته می‌باشد. پس نتیجه می‌گیریم که مفصل‌های پلاستیک بایستی در فاصل‌های دورتر از بر ستون تشکیل شوند.

دور کردن محل مفصل از بر ستون باعث می‌شود تغییر شکل‌های غیر کشسان در ناحیه‌ای دورتر از بر ستون شکل گیرد که در آن عملکرد مفصل، تحت تأثیر جوش و عوامل مؤثر بر جوشکاری قرار نمی‌گیرد. در واقع با این کار تضمینی بود که شکست‌های ترد در اتصال به وجود نمی‌آید زیرا در ناحیه جوش و اتصال بی شک تنش‌ها در حدی پائین‌تر از تنش‌های آستانه‌ی جاری شدن قرار دارند. در واقع اتصال‌های پس از نورت ریچ در بر اتصال تنش‌ها را کاهش داده و به این ترتیب مشکل‌های ترد شکنی و تمرکز تنش به شدت کاهش می‌یابد.

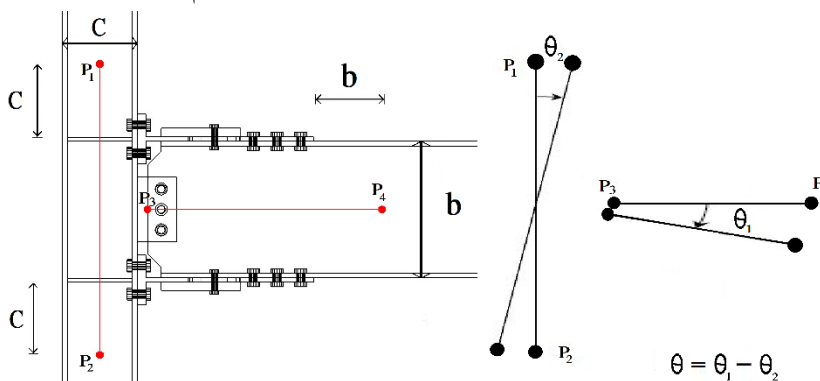
۱۲-۳. ارزیابی اتصال‌های گیردار و نمودار لنگر-چرخش اتصال ($M - \theta$)

یکی از روش‌های بررسی رفتار اتصال‌های خمشی از نظر عملکردهای ثقلی و لرزه‌ای، استفاده از نمودار لنگر-چرخش است. این نمودار که می‌تواند از نتایج آزمایشگاهی (نمونه‌ی آزمایشی) و نرم‌افزاری (نمونه‌ی نرم‌افزاری) برای هر گونه اتصالی به دست آید، رفتار اتصال، یعنی چرخش نسبی تیر و ستون را نسبت به تغییرات لنگر نشان می‌دهد. برای رسم نمودار لنگر-چرخش یک اتصال در مراحل مختلف لنگرهای خمشی متفاوتی به اتصال اعمال شده و میزان چرخش تیر نسبت به ستون به ازای لنگر مورد نظر در هر مرحله، محاسبه می‌گردد.

نمودار لنگر-چرخش کُلی جزء سازه‌ی دارای اتصال نمی‌تواند به عنوان نمودار لنگر-چرخش حاصل از اجزای اتصال مورد استفاده قرار گیرد زیرا در شکل این نمودار ابعاد دهانه و ارتفاع ستون و ویژگی‌های نیم‌رخ تیر و ستون دخالت داشته‌اند و نمی‌توان آنها را به‌طور فراگیر برای بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال مورد استفاده قرار داد. از این رو برای بررسی دقیق رفتار لرزه‌ای اتصال لازم است تا نمودار لنگر-چرخش خود اتصال به دست آمده و بررسی‌های عملکردی به‌ویژه بررسی سختی اتصال بر روی آن صورت گیرد. برای به دست آوردن نمودار لنگر-چرخش اتصال در این پژوهش، برگرفته از پژوهش‌های گذشته همچون پژوهش آقای کیانی [22] از اختلاف چرخش ۲ خط در محدوده‌ی

اتصال، در تیر و ستون، استفاده شده است. نقطه‌های آغاز و پایان این خط‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که همه‌ی چرخش‌های ناشی از عملکرد اجزای اتصال را گرفته و از سوی دیگر چرخش‌های ناشی از تیر و ستون در خارج از محدوده‌ی اتصال، را حذف کند. این ۲ خط را در شکل ۳-۵ می‌توان دید.

نمودار لنگر-چرخش به دست آمده از روش بالا را می‌توان برای بررسی سختی اتصال استفاده نمود؛ سختی به دست آمده از این نمودار نسبت به سختی حاصل از نمودار لنگر-چرخش کلی اتصال سختی بالاتری خواهد بود. در مواردی که شکل پذیری بالای برخی نمونه‌ها، حاصل از انعطاف بالای تیر و ستون نمونه‌ی مورد نظر است، می‌توان با به کارگیری این روش نمودار لنگر-چرخش حقیقی اتصال را به دست آورده و از این نمودار شکل پذیری واقعی اتصال را محاسبه نمود؛ البته برای محاسبه‌ی شکل پذیری در پژوهش‌های پیشین از نمودار لنگر-چرخش کلی اتصال هم استفاده شده است.



شکل ۳-۵. ۴ نقطه‌ی پایش شده برای به دست آوردن چرخش اتصال

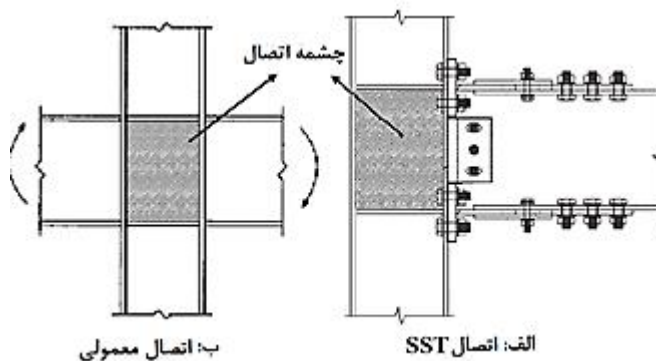
۳-۱۳. چشمه‌ی اتصال^۱

همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد، زمین لرزه نورتریچ یک نیاز فوری را برای افزایش شکل پذیری اتصال‌های که به‌طور معمول در عمل استفاده می‌شوند، ایجاد کرد. در نتیجه پس از زمین لرزه نورتریچ پژوهش‌ها به سمت افزایش شکل پذیری در ساختمان‌ها پیش رفت. همان‌طور که روشن است اتصال در قاب‌های مقاوم خمشی از ۳ بخش تیر، ستون و چشمه‌ی اتصال تشکیل شده است.

^۱ Panel Zone

یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی لرزه‌ای اتصالات در قاب‌های مقاوم خمشی، چشمه‌ی اتصال می‌باشد. منظور از چشمه‌ی اتصال، ناحیه محصور شده جان ستون در مقابل بال‌های تیر (در بعضی اتصالات در امتداد ورق اتصال یا در اتصال SST در امتداد ساق پیوند تسلیمی) می‌باشد که فصل مشترک اتصال تیر به ستون می‌باشد. این ناحیه در شکل ۳-۶ نشان داده شده‌است.

چشمه‌ی اتصال در اثر برش‌های ایجاد شده تمایل به تغییر شکل برشی دارد و این تغییر شکل‌های برشی در صورت وقوع، تغییر شکل‌های جانبی بسیار بزرگی را در کل سازه ایجاد می‌کند. در واقع تغییر شکل برشی چشمه‌ی اتصال یکی از عوامل ایجاد کننده‌ی تغییر شکل جانبی قاب‌های خمشی فولادی است. به همین دلیل بهتر است که با هر چه قوی‌تر کردن این ناحیه، تغییر شکل‌های این ناحیه و پیروی آن تغییر شکل جانبی سازه را محدود کنیم. به بیان دیگر برای اینکه اتصالات‌های خمشی گیردار به درستی عمل کنند، بایستی چشمه‌ی اتصال از سختی و مقاومت کافی برخوردار باشد و شکل‌پذیری لازم را نیز تأمین کند.

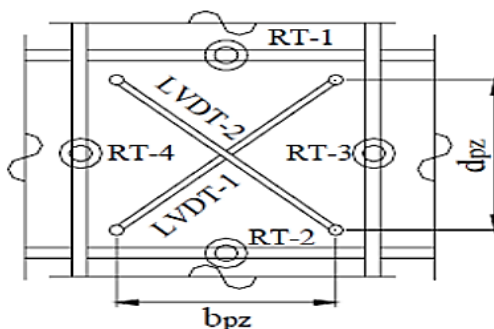


شکل ۳-۶. چشمه‌ی اتصال؛ الف: چشمه‌ی اتصال در نمونه‌ای از اتصال SST؛ ب: چشمه‌ی اتصال در یک اتصال معمولی

بر اساس پژوهش‌های انجام شده که در FEMA گزارش شده‌است، مشخص شد که چشمه‌ی اتصال دارای نمودار چرخه‌ای بسیار خوبی می‌باشد. به گونه‌ای که در هر چرخه حد تسلیم به میزان قابل توجهی رشد دارد. شناخت فرآیند چشمه‌ی اتصال هنوز هم به طور دقیق صورت نگرفته‌است، اما فرض‌های برای مدل‌سازی آن در نظر گرفته شده‌است که می‌توان آنها را کمابیش قابل قبول دانست.

۱۴-۳. روش به‌دست آوردن شکل‌پذیری چشمه‌ی اتصال

میانگین کرنش برشی^۱ (زاویه چرخش) چشمه‌ی اتصال از میانگین تغییر شکل برشی^۲ لبه‌های چشمه‌ی اتصال به‌دست می‌آید. مقدار میانگین کرنش برشی یا چرخش چشمه‌ی اتصال را می‌توان از رابطه (۶-۳) به‌دست آورد [23].



شکل ۷-۳. لبه‌های چشمه‌ی اتصال قبل از تغییر شکل [۲۴]

$$\gamma_{pz} = \frac{\theta_{RT-3} + \theta_{RT-4}}{2} + \frac{\theta_{RT-1} + \theta_{RT-2}}{2} \quad (6-3)$$

که در این رابطه γ_{pz} بیانگر چرخش چشمه‌ی اتصال و θ_{RT-i} همان‌طور که در شکل (۷-۳) مشاهده می‌شود، بیانگر چرخش لبه‌های چشمه‌ی اتصال می‌باشد. از تغییر شکل چشمه‌ی اتصال در راستای عمود بر صفحه به دلیل ناچیز بودن چشم‌پوشی می‌شود.

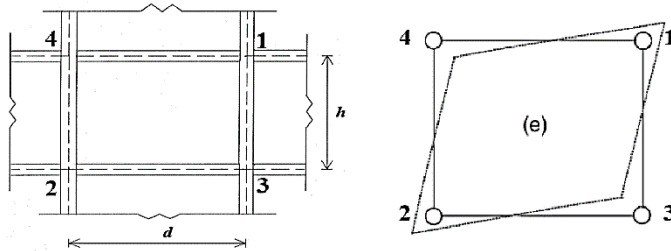
تغییر شکل چشمه‌ی اتصال در صفحه در شکل ۸-۳ نشان داده شده‌است. رابطه (۷-۳) را می‌توان با توجه به شکل ۸-۳ به شکل زیر نوشت [۴۸]:

$$\gamma_{pz} = \frac{1}{2} \left(\frac{U_1 - U_2 - U_3 - U_4}{h} \right) + \left(\frac{V_1 - V_2 - V_3 - V_4}{b} \right) \quad (7-3)$$

که در رابطه (۷-۳)، U_i و V_i به ترتیب جابه‌جایی در راستای X و Y برای گوشه‌های چشمه‌ی اتصال هستند.

¹ Shearing Strain

² Shearing Deformations



شکل ۸-۳ تغییر شکل چشمه‌ی اتصال [۲۴]

جهت سادگی خروجی گرفتن از نرم‌افزار آباکوس برای به‌دست آوردن چرخش چشمه‌ی اتصال، از رابطه (۷-۳) استفاده خواهد شد.

۱۵-۳. آشنائی با شناسه‌ی گسیختگی

شناسه‌ی گسیختگی نسبتی است میان شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل و شناسه‌ی سه‌محوری؛ که می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بررسی پتانسیل شروع گسیختگی شکل‌پذیر در فولاد به‌کار گرفته‌شود. رابطه‌ی ۸-۳ این نسبت را نشان می‌دهد.

$$RI = \frac{PEEQI}{e^{-1.5TI}} \quad (۸-۳)$$

در رابطه‌ی ۸-۳ $PEEQI$ و TI شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل و شناسه‌ی سه‌محوری است که می‌تواند به‌ترتیب از رابطه‌ی ۹-۳ و ۱۰-۳ برآورد شود.

$$PEEQI = \frac{PEEQ}{\epsilon_y} \quad (۹-۳)$$

$$TI = \frac{\sigma_{hyd}}{\sigma_{mis}} \quad (۱۰-۳)$$

شناسه‌ی گسیختگی، شاخص مناسبی برای مقایسه میان نمونه‌های گوناگون برای شناسائی نمونه‌های با احتمال گسیختگی زودرس‌تر می‌باشد.

۳-۱۶. خستگی کم چرخه (LCF)^۱

خستگی کم سیکلی پدیده‌ای است که باعث گسیختگی زود هنگام در عضو تحت بار چرخه، می‌گردد. برای پیشگیری از این پدیده باید طول بخش کاهش یافته‌ی اتصال SST به گونه‌ای گزینش شود که کرنش‌ها در آن از حد مشخصی فراتر نرود؛ در رابطه‌ی (۴-۱۲.۹) از آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا طول بخش کاهش یافته به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کرنش‌ها در چرخش ۰/۰۵ رادیان بیش‌تر از ۰/۰۸۵ نشود. در ادامه با توجه به رابطه‌ی (۳-۱۱) [36] که میزان چرخه‌های لازم برای گسیختگی در یک دامنه‌ی کرنشی را نشان می‌دهد و رابطه‌ی (۳-۱۲) [37] که اثر تجمیعی چرخه‌ها با دامنه‌های گوناگون را بیان می‌کند، به بررسی عدد ذکر شده در آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا پرداخته خواهد شد.

$$\Delta \varepsilon = 0.2048 N_f^{-0.490} \quad (۳-۱۱)$$

$$FDI = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (۳-۱۲)$$

در جدول ۳-۱ در ستون نخست دامنه‌ی چرخش در تاریخچه‌ی بارگذاری آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا ارائه شده و در ستون دوم تعداد چرخه‌ها برای هر کدام از دامنه‌ها ذکر شده‌است. در ستون سوم کرنش ایجاد شده در قسمت کاهش یافته بر مبنای کرنش ۰/۰۸۵ در چرخش ۰/۰۵ رادیان آورده شده‌است. در ستون چهارم بر پایه‌ی رابطه‌ی (۳-۱۱) مقدار N_f بدست می‌آید و در ستون آخر FDI حاصل جمع هر سطر با سطرهای بالاتر محاسبه می‌گردد.

همان گونه که در نتایج ستون آخر جدول (۳-۱) مشخص است، مقدار کرنشی که آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا برای بخش کاهش یافته‌ی اتصال SST در نظر گرفته‌است به مقداری است که بتوان اطمینان داشت، بخش کاهش یافته در اثر تاریخچه‌ی بارگذاری تا چرخش ۰/۰۵ رادیان دچار گسیختگی نمی‌شود.

¹ low cycle fatigue

جدول ۳-۱. برآورد اثر تجمیعی خستگی کم چرخه

دامنه	تعداد چرخه	$\Delta\epsilon$	N_f	n_i / N_f	FDI
۰/۰۰۳۷۵	۶	۰/۰۰۶۳۷۵	۱۱۸۹/۰۶	۰/۰۰۰۵	-
۰/۰۰۰۵	۶	۰/۰۰۰۸۵	۶۶۱/۰۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۴
۰/۰۰۰۷۵	۶	۰/۰۱۲۷۵	۲۸۸/۹۷	۰/۰۰۲۱	۰/۰۳۵
۰/۰۰۱	۴	۰/۰۰۱۷	۱۶۰/۶۵	۰/۰۰۲۵	۰/۰۶۰
۰/۰۰۱۵	۲	۰/۰۰۲۵۵	۷۰/۲۳	۰/۰۰۲۸	۰/۰۸۸
۰/۰۰۲	۲	۰/۰۰۳۴	۳۹/۰۴	۰/۰۰۵۱	۰/۱۳۹
۰/۰۰۳	۲	۰/۰۰۵۱	۱۷/۰۷	۰/۰۱۱۷	۰/۲۵۷
۰/۰۰۴	۲	۰/۰۰۶۸	۹/۴۹	۰/۰۲۱۱	۰/۴۶۷
۰/۰۰۵	۲	۰/۰۰۸۵	۶/۰۲	۰/۰۳۳۲	۰/۸۰۰
۰/۰۰۶	۲	۰/۰۱۰۲	۴/۱۵	۰/۰۴۸۲	۱/۲۸۲

۳-۱۷. آشنائی با ویژگی‌ها و توانائی‌های نرم‌افزار آباکوس

وجود رابطه غیرخطی تنش و کرنش موجب می‌گردد که سختی سازه در طی فرایند بارگذاری تغییر کند و موجب بروز رفتار غیرخطی در سازه گردد. وقتی مصالح وارد ناحیه خمیری می‌گردند احتمال قابل توجه بودن ردپای پدیده غیرخطی هندسی زیاد می‌شود. در تحلیل غیرخطی مادی، اثرهای مربوط به تغییرات سختی سازه در اثر ویژگی‌ها و رفتار مصالح در تحلیل در نظر گرفته می‌شود. نرم‌افزار آباکوس می‌تواند انواع گوناگونی از ویژگی‌های غیرخطی ماده را در نظر بگیرد. با توجه به اینکه مصالحی مانند فولاد از نوع مواد دارای رفتار خمیری مستقل از زمان هستند، بنابراین در ادامه قوانین حاکم بر رفتار این دسته از مواد را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۱۸. مبانی سخت‌شدگی کرنش

این قانون نحوه تغییر سطح تسلیم را بعد از تسلیم نخستین توصیف و سطح تسلیم دوم را مشخص می‌نماید و در حقیقت معرف تحول سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک می‌باشد. در تئوری خمیری، در حالت کُلی سخت‌شدگی کرنش با ۳ نوع رفتار مدل می‌شود که عبارتند از:

۱ سخت‌شدگی ایزوتروپیک^۱؛

۲ سخت‌شدگی سینماتیک^۲؛ و

۳ سخت‌شدگی ترکیبی^۳.

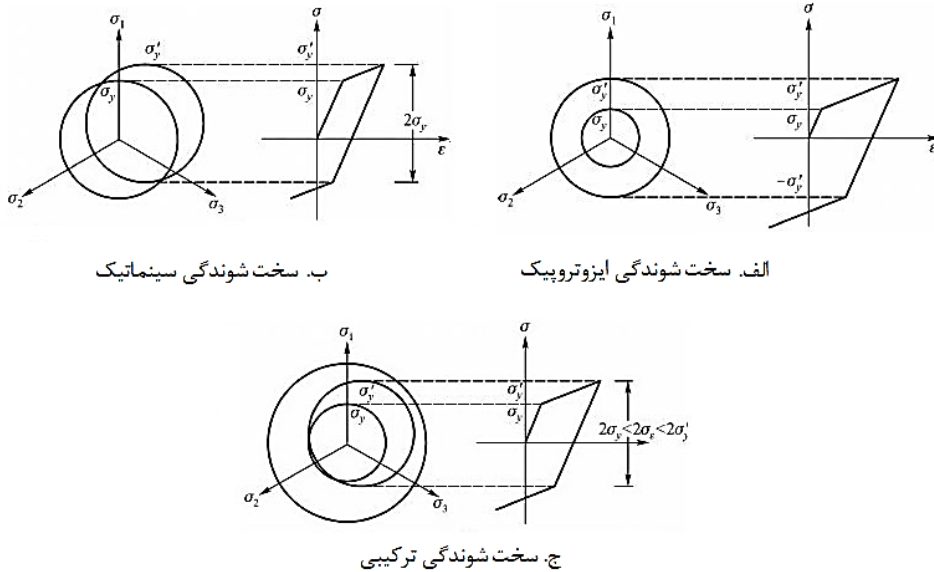
در این مدل‌ها روش ارتباط سطح تسلیم کشش و فشار پس از تسلیم نخستین با یکدیگر متفاوت است. در سخت‌شدگی ایزوتروپیک بعد از رسیدن به تسلیم اولیه، اندازه سطح تسلیم در تمام جهات به طور یکسان بزرگ می‌شود و سطح تسلیم بدون جابجائی تغییر حجم می‌دهد. این در حالی است که در سخت‌شدگی سینماتیک اندازه سطح تسلیم همیشه ثابت بوده و فقط بعد از رسیدن به تسلیم نخستین، انتقال می‌یابد. به عبارت دیگر سطح تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک بدون تغییر حجم در فضای تنش‌های اصلی جابجا می‌شود. شکل ۳-۹ نیز روش تغییرهای سطح تسلیم را در مبانی سخت‌شدگی گوناگون به صورت نمادین نشان می‌دهد. سخت‌شدگی ترکیبی، آمیخته‌ای از هر ۲ نوع سخت‌شدگی ایزوتروپیک و سینماتیک است.

همچنین در جدول ۳-۲ به شکل دسته‌بندی‌شده تفاوت‌های سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک بیان شده است.

¹ Isotropic

² Cinematic

³ Combined



شکل ۳-۹. تفاوت جابجائی و تغییر اندازه سطح تسلیم در ۳ نوع سخت‌شوندگی و اثر آن بر نمودار هیستریزس می‌شود [۱۴] هنگامی که بارگذاری چرخه‌ای یا تغییرات دمائی منظم داریم، سخت‌شوندگی ترکیبی پاسخ مناسب‌تری می‌دهد، هرچند در هر ۳ نوع سخت‌شوندگی اثر باوشینگر^۱ و سخت‌شدگی چرخه‌ای با کاهش پلاستیک^۲ می‌تواند مدل شود ولی سخت‌شدگی غیرخطی ترکیبی پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهد [24].

پدیده‌های زیر که برای بارگذاری چرخه‌ای مطرح است با در نظر گرفتن سخت‌شدگی کرنشی ترکیبی بهترین پاسخ‌ها را می‌دهند، این پدیده‌ها در زیر آورده شده‌اند.

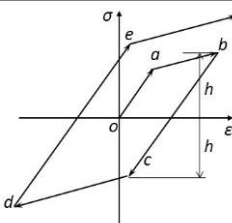
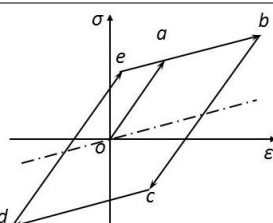
– اثر باوشینگر؛

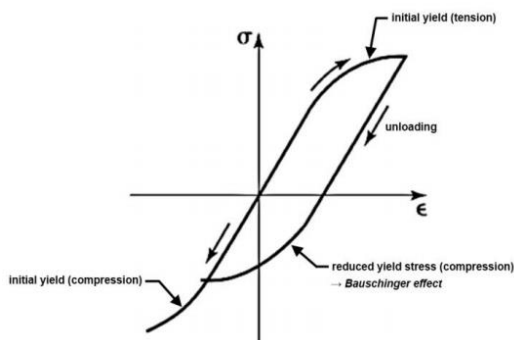
این پدیده اثر کاهش یافتن تنش جاری‌شدن قسمت کششی بعد از تغییر شکل پلاستیک در بارگذاری برگشتی است. این پدیده با ادامه‌ی چرخه‌ها کاهش می‌یابد. در شکل ۳-۱۰ این اثر نشان داده شده‌است.

^۱ Bauschinger

^۲ effect cyclic hardening with plastic shakedown

جدول ۳-۲. تفاوت‌های میان سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک

سخت‌شدگی ایزوتروپیک	
	- محدوده الاستیک (تنش تسلیم) متناسب با کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد؛
	- تنش تسلیم بارگذاری وارون برابر با تنش تسلیم قبلی است؛
	- استفاده از کرنش پلاستیک به عنوان یک متغیر پیش‌رونده.
سخت‌شدگی سینماتیک	
	- محدوده‌ی الاستیک ثابت باقی می‌ماند؛
	- مرکز ناحیه‌ی الاستیک به موازات خط سخت‌شدگی حرکت می‌کند (روی خط چین)؛
	- استفاده از مرکز دامنه‌ی الاستیک به عنوان یک متغیر پیش‌رونده؛
	- $bc = de = 2\sigma_a$
- در بارگذاری یک‌طرفه تفاوتی در پاسخ ۲ حالت ایزوتروپیک و سینماتیک وجود ندارد (خط oab)	

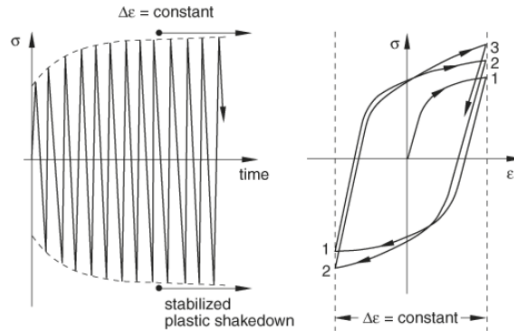


شکل ۳-۱۰. اثر باوشینگر

- سخت‌شدگی چرخه‌ای با کاهش پلاستیک؛

این پدیده در آزمایش‌های کنترل شده تنش کرنش متقارن رخ می‌دهد. همان‌طور که می‌توان در شکل ۳-۱۱ دید که رفتار فلزها را در اثر چرخه‌های بارگذاری قابل پیش‌بینی می‌باشد. سخت‌شدگی

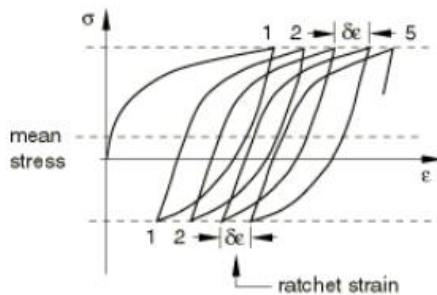
سینماتیک بعد از یک سیکل کاهش پلاستیک شدن را پیش‌بینی می‌کند، در حالی که ترکیب سخت‌شدگی ایزوتروپیک و سینماتیک بعد از چندین سیکل این مؤلفه را پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۳-۱۱. اثر کاهش پلاستیک شدن

- خزش چرخه‌ای؛

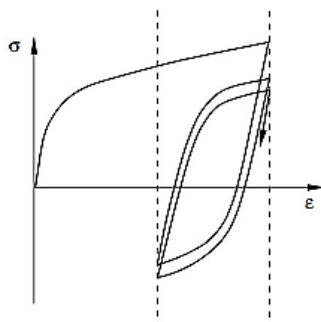
جمع‌شدگی تغییر شکل‌ها در بارهای چرخه‌ای و رفتن به‌سوی گسیختگی با زیاد شدن تغییر شکل را خزش چرخه‌ای می‌نامند که در جهت تنش متوسط خواهد بود. در شکل ۳-۱۲ این پدیده مشخص شده است [۴].



شکل ۳-۱۲. خزش سیکلی

- وادادگی تنش متوسط؛

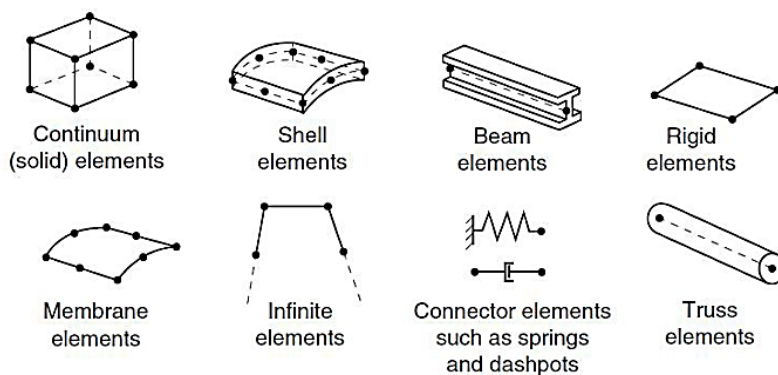
این پدیده در آزمایش‌های کرنش نامتقارن رخ می‌دهد همان‌طور که در شکل ۳-۱۳ دیده می‌شود. بعد از افزایش چرخه‌ها، بارگذاری و باربرداری تنش متوسط به صفر نزدیک می‌شود.



شکل ۳-۱۳. وادادگی تنش متوسط

۳-۱۹. المان‌های مورد استفاده

برنامه آباکوس دارای خانواده‌ی المان‌های متعددی می‌باشد که دارای قابلیت‌های مختلفی هستند. رایج‌ترین گروه المان‌هایی که در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شوند در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده‌است. در مدل‌سازی اجزا محدود صورت گرفته در این پژوهش از المان جامد^۱ استفاده شده‌است.



شکل ۳-۱۴. خانواده المان‌های متداول در آباکوس

^۱ Solid

۴. مدل سازی و راستی آزمائی

۴-۱. توضیح نمونه های ساخته شده

شکل کُلّی نمونه های عددی ساخته شده در این پژوهش از نوع نمونه های با اتصال یک طرفه می باشد؛ ابعاد و ویژگی های هندسی همگی از طراحی های انجام شده برای ۵ نمونه ی اصلی این پژوهش به دست آمده است. ارتفاع ستون های همه ی نمونه ها ۳/۵ متر و فاصله ی انتهای تیر تا محور میانی ستون در همه ی نمونه ها ۴ متر می باشد. برای پیوند تسلیمی از ۳ گونه ی استاندارد پیوند تسلیمی سُبک^۱، متوسط^۲ و سنگین^۳ ارائه شده توسط شرکت «سیمپسون استرانگ-تای» استفاده شده و بر مبنای آن به انتخاب تیر و ستون مطابق با شرایط استاندارد اتصال های پیش پذیرفته ی آمریکا پرداخته شده است. همچنین مطابق الگوهای ارائه شده توسط این شرکت برای پیچ های ساق و بال پیوند تسلیمی و ورق برش گیر از پیچ M22 و برای پیچ های ورق کمانش گیر^۴ از پیچ M16 استفاده شده است. برای پیچ های ساق پیوند تسلیمی در این الگوها از پیچ نوع A490 و برای پیچ های بال پیوند تسلیمی، پیچ های ورق برش گیر و پیچ های ورق کمانش گیر از پیچ نوع A325 استفاده شده است. در این پژوهش برای ابعاد و جنس مصالح پیچ ها از همین الگوها پیروی شده است.

برابر با هدف اصلی این پژوهش، برای نیم رخ های تیر و ستون از نیم رخ های پُر کاربرد در ایران استفاده شده است. برای تیر از نیم رخ IPE و برای ستون از نیم رخ IPB استفاده شده است. شرایط استاندارد اتصال های پیش پذیرفته ی آمریکا برای اتصال SST اجازه ی استفاده از ۵ نیم رخ IPE با شماره ی ۲۷۰، ۳۰۰، ۳۳۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ را می دهد که بر مبنای این ۵ تیر به انتخاب پیوند تسلیمی از

¹ Light

² medium

³ heavy

⁴ Buckling Restraint Plate Bolts

میان ۳ پیوند تسلیمی سُبک، متوسط و سنگین پرداخته و سپس با توجه به شرایط آئین‌نامه‌ی الزامات عمومی AISC به انتخاب ستون موردنظر پرداخته شده‌است. در همه‌ی نمونه‌ها از ورق پیوستگی سرتاسری به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و همچنین ضخامت ورق برش‌گیر در تمام نمونه‌ها ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. ضخامت ورق کمانش‌گیر برای همه‌ی نمونه‌ها ۱۶ میلی‌متر می‌باشد. این اندازه‌ها از برگردان یکا از اینچ به میلی‌متر و گردسازی از روی الگوهای شرکت «سیمپسون استرانگ‌تای»، به‌دست آمده‌است.

باتوجه به عرض بال تیر IPE 270 و بندی از استاندارد اتصال‌های پیش‌پذیرفته مبنی بر بزرگتر نبودن عرض ساق پیوند تسلیمی نسبت به عرض بال تیر، نیاز به اصلاح عرض ساق پیوند تسلیمی سُبک بود که این اصلاح به شکلی انجام شد تا دیگر شرایط این آئین‌نامه و همچنین شرایط آئین‌نامه‌ی الزامات عمومی AISC در رابطه با فاصله‌ی سوراخ‌ها از هم و از لبه‌ی ورق درنظر گرفته‌شود. به این ترتیب برای ۳ تیر IPE شماره‌ی ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۳۰ از پیوند تسلیمی اصلاح شده و ستون IPB شماره‌ی ۱۸۰ استفاده شده‌است. برای نمونه‌ی چهارم از تیر IPE شماره‌ی ۳۶۰ و ستون IPE شماره‌ی ۲۰۰ و برای نمونه‌ی پنجم از تیر IPE شماره‌ی ۴۰۰ و برای ستون از IPB شماره‌ی ۲۲۰ استفاده شده‌است. در جدول ۴-۱ می‌توان ویژگی‌های مصالح و ویژگی‌های هندسی اجزای نمونه‌های اصلی پنج‌گانه ساخته‌شده در این پژوهش را مشاهده کرد.

۲-۴. نرم‌افزار آباکوس

برای مدل‌سازی عددی این پژوهش از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده‌است. نرم‌افزار آباکوس یک نرم‌افزار شبیه‌سازی قدرتمند برای پردازش مسائل مهندسی است. اساس کار در این نرم‌افزار، روش اجزا محدود بوده و توانایی پردازش دامنه‌ی گسترده‌ای از مسائل مهندسی را دارد، در آباکوس مجموعه‌ی کاملی از المان‌های گوناگون وجود دارد. این المان‌ها، شبیه‌سازی بیشتر سازه‌ها و مواد مهندسی را در این نرم‌افزار امکان‌پذیر می‌سازند. از جمله دیگر ویژگی‌های برتر این نرم‌افزار که آن را در جایگاه بالاتری نسبت به دیگر نرم‌افزارهای اجزا محدودی قرار می‌دهد توانایی این نرم‌افزار در

جدول ۴-۱. ویژگی های مصالح و ویژگی های هندسی اجزا نمونه های ساخته شده (یکای میلی متر)

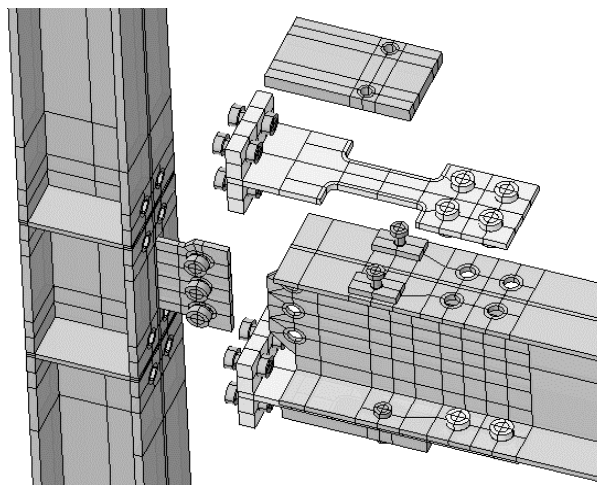
مشخصات هندسی					مصالح	
نمونه ۵	نمونه ۴	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱		
IPE 400	IPE 360	IPE 330	IPE 300	IPE 270	ST37	تیر
IPB 220	IPB 200	IPB 180	IPB 180	IPB 180	ST52	ستون
heavy	medium	Light	Light	Light	ST52	پیوند تسلیمی
M22	M22	M22	M22	M22	A490	پیچ ساق پیوند تسلیمی
M22	M22	M22	M22	M22	A325	پیچ بال پیوند تسلیمی
M22	M22	M22	M22	M22	A325	پیچ ورق برش گیر
M16	M16	M16	M16	M16	A325	پیچ ورق کماتش گیر
188×125.25×10	170×95.5×10	152×85.75×10	152×85.75×10	152×85.75×10	ST52	ورق پیوستگی
190×115×10	190×115×10	190×115×10	190×115×10	190×115×10	ST52	ورق برش گیر
232×178×25	232×165×25	232×135×25	232×135×25	232×135×25	ST52	ورق کماتش گیر
76×42.5×13	76×36×13	76×36×13	76×36×13	76×36×13	ST52	ورق جداگر ^۱

شبیه سازی مدل های گوناگون مواد می باشد. در آباکوس می توان انواع فلزها، لاستیک ها، کامپوزیت ها، بتن های مسلح و مواد ژئوتکنیک و غیره را شبیه سازی کرد [25].

۴-۲-۱. هندسه اجزا نمونه

نخستین گام در ساخت نمونه ی عددی، ایجاد هندسه نمونه می باشد. بخش های گوناگون یک نمونه نمونه در مازول Part ساخته می شود. بخش های گوناگون اتصال مورد نظر در این پژوهش شامل تیر، ستون، پیوند تسلیمی، پیچ ها، ورق های کماتش گیر، ورق برش گیر و ورق های پیوستگی می باشد که همه ی آنها بر پایه ی اندازه واقعی ساخته شده اند. در این مازول جدا از توانائی ساخت نمونه، توانائی بخش بندی هر جزء هم وجود دارد که برای مش بندی مناسب می توان از آن استفاده کرد. در شکل ۴-۱ تصویری از اجزا ساخته شده در مازول Part را می توان مشاهده نمود.

¹ Spacer



شکل ۴-۱. همه‌ی بخش‌های ساخته‌شده برای یک نمونه‌ی پژوهش حاضر

۴-۲-۲. تعریف ویژگی‌های مصالح

ویژگی‌های مصالح بر اساس نمودارهای تنش-کرنش مواد در آباکوس تعریف شده‌است. در مازول Property ویژگی رفتاری مواد از جمله ضریب برجهندگی، ضریب پواسون و رفتار خمیری و همچنین چگالی^۱، تعریف شده‌است. در نمونه‌های مدل‌سازی شده که در فصل پیش‌رو توضیحات کامل آن بیان خواهد شد، برابر با هدف اصلی پژوهش از فولادهای پر کاربرد در ایران استفاده شده‌است. در این نمونه‌ها از ۴ نوع مصالح، ST37، ST52، A325 و A490 استفاده شده‌است.

همان‌گونه که در جدول ۴-۱ اشاره شده‌است؛ برای پیوندهای تسلیمی، ستون، ورق‌های پیوستگی، ورق‌های کمانش‌گیر و ورق برش‌گیر از فولاد ST52، برای تیر از ST37، برای پیچ‌های اتصال‌دهنده‌ی ساق پیوند تسلیمی به بال تیر از پیچ پرمقاومت رده‌ی A490 و برای پیچ‌های اتصال‌دهنده‌ی بال پیوند تسلیمی به بال ستون از پیچ پرمقاومت رده‌ی A325 استفاده شده‌است. هر ۲ رده‌ی پیچ‌های مورد استفاده از نوع پرمقاومت بوده و توانائی پیش‌تنیدگی را دارند. درمورد شیوه‌ی گزینش نوع مصالح برای اجزا اتصال در فصل بعد توضیحات لازم بیان خواهد شد. برای تمام مصالح از ضریب برجهندگی ۲۰۰ گیگاپاسگال (۲۰۳۹۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع) و ضریب پواسون ۰/۳ استفاده شده‌است.

¹ Density

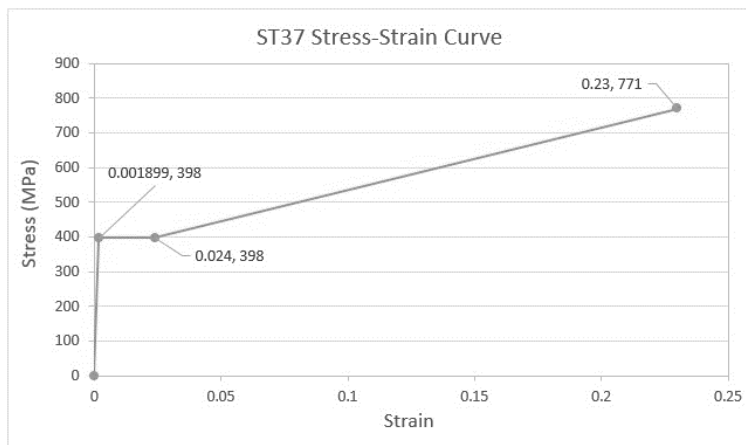
از مقاله‌ی خلیفه [26] که بر روی فولادهای ST37 و ST37 رایج در ایران کار کرده‌است، برای برداشت نمودار تنش-کرنش فولاد ST37 و ST52 استفاده شده‌است. البته نمودار تنش-کرنش معرفی شده به نرم افزار برای این ۲ نوع فولاد به شکل سه خطی و با استفاده از رابطه‌های موجود در راهنمای آباکوس [25] از حالت تنش مهندسی^۱ به حالت تنش حقیقی^۲ و همچنین کرنش مهندسی^۳ به حالت کرنش حقیقی^۴ تبدیل شده‌است. در ادامه ۲ رابطه‌ی مربوط به واقعی کردن تنش و کرنش ارائه خواهد شد.

$$\sigma_t = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) \quad (۱-۴)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (۲-۴)$$

σ_t : تنش حقیقی؛ σ_e : تنش مهندسی؛ ε_t : کرنش حقیقی؛ و ε_e : کرنش مهندسی.

در شکل‌های ۲-۴ و ۳-۴ به ترتیب نمودارهای تنش-کرنش حقیقی فولاد ST37 و ST52، مورد استفاده در این پژوهش آورده شده‌است.



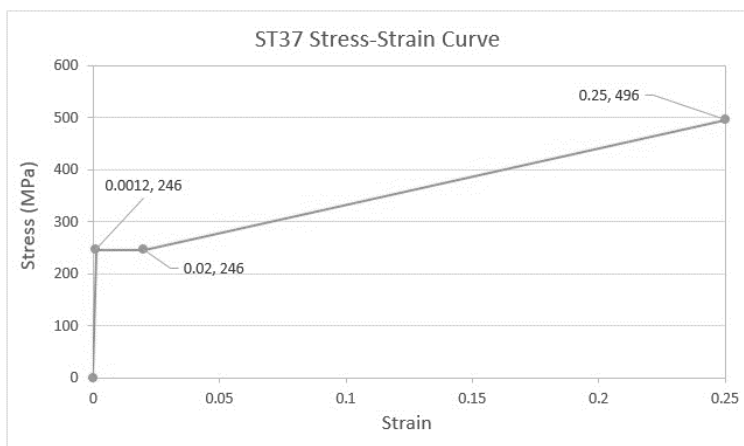
شکل ۲-۴. نمودار سه خطی تنش-کرنش حقیقی فولاد ST52

¹ Engineering Stress

² True Stress

³ Engineering Strain

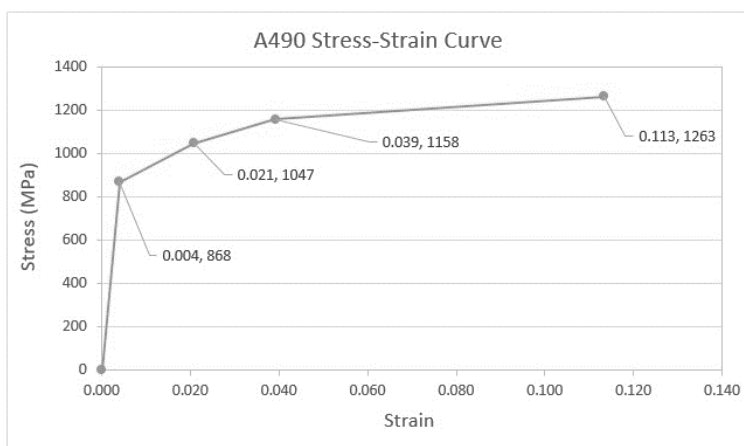
⁴ True Strain



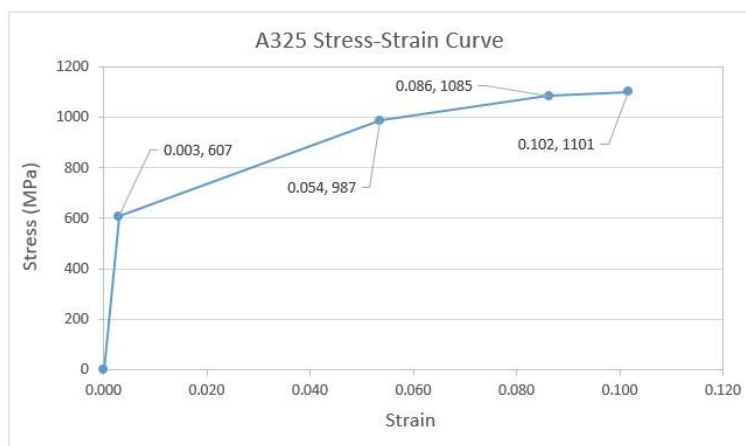
شکل ۴-۳. نمودار سه‌خطی تنش-کرنش حقیقی فولاد ST37

برای معرفی نمودار تنش-کرنش پیچ‌های رده‌ی A325 و A490 از پژوهش هدایت [27] استفاده شده‌است. همان‌گونه که در مقاله‌ی مورد نظر گفته‌شده نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی داشته و قابل اتکا است.

نمودار تنش-کرنش حقیقی پیچ‌های A325 و A490 به ترتیب در شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵ آورده شده‌است.



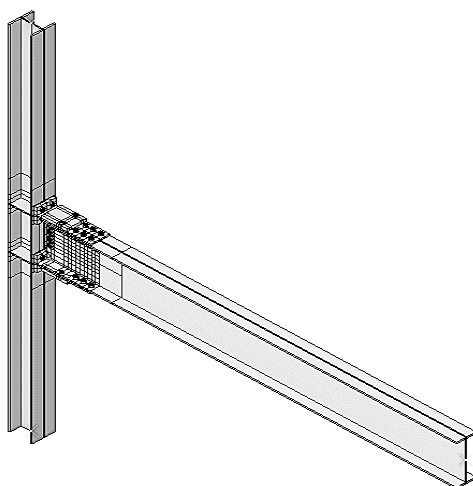
شکل ۴-۴. نمودار تنش-کرنش حقیقی پیچ A490



شکل ۴-۵. نمودار تنش- کرنش حقیقی پیچ A325

۳-۲-۴. سرهم بندی نمونه

اجزا ساخته شده در ماژول Part بعد از فراخوان به ماژول Assembly، به دقت در کنار یکدیگر قرار می گیرند. در این ماژول موقعیت هندسی اجزا نسبت به یکدیگر مشخص می گردد و هیچ گونه ارتباط مکانیکی و اندرکنشی تعریف نمی شود. در شکل ۴-۶ یکی از نمونه های ساخته شده در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۴-۶. نمائی از نمونه ی ساخته شده پس از سرهم بندی

۴-۲-۴. روش پردازش نمونه

در مازول Step روش پردازش و تنظیم‌های مربوط به آن انجام می‌گیرد. همچنین در این مازول خروجی‌های مورد نیاز هم مشخص می‌شود. در نمونه‌های مورد نظر در این پژوهش از پردازشگر Static-General استفاده شده است. گام‌بندی پردازش هم به این شکل است که نخست، گامی برای پیش‌تئیدگی پیچ‌ها در نظر گرفته شده است و پس از آن در گام دوم بارگذاری چرخه‌ای به نمونه اعمال می‌شود.

۴-۲-۵. برهم‌کنش و قید بین بخش‌های گوناگون نمونه

تعیین صحیح برهم‌کنش و قیدهای اجزا نمونه در یک پردازش اقتصادی و صحیح بسیار مهم است؛ تعریف این ویژگی‌ها در نرم‌افزار آباکوس در مازول Interaction انجام می‌شود. از آنجا که سطح‌های در تماس که در این نمونه وجود دارد همگی از پیچ شدن چند بخش از اتصال به هم ایجاد می‌شود و آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا برای این سطح‌ها رتبه‌بندی مشخص را در نظر می‌گیرد. این آئین‌نامه برای اتصال SST رتبه‌بندی A را برای سطح‌های که در قسمت پیچ شده قرار می‌گیرند را اعلام نموده و برابر با ضریب اصطکاک‌های که آئین‌نامه بایستگی‌های عمومی AISC [28] برای هر رتبه‌بندی اعلام می‌دارد، ضریب اصطکاک وارد شده در نرم‌افزار ۰/۳۳ قرار داده شده است.

در نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش برای تعریف برهم‌کنش بین سطح‌های در تماس از برهم‌کنش تماسی^۱ با ضریب اصطکاک ۰/۳۳ و رابطه‌ی پناالتی^۲ برای تحلیل اصطکاک در رفتار مماسی^۳ و از گزینه‌ی تماس سخت^۴ برای تعریف فشار-تداخل^۵ و همچنین قابلیت جدا شدن اجزا پس از برخورد در رفتار محوری^۶ استفاده شده است. برای معرفی سطح‌های در تماس باهم، باید دوه‌دو آنها را به نرم‌افزار معرفی کرد. در مواقعی که به علت پارتیشن‌بندی زیاد در اجزا و یا نوع نمونه، تعداد سطح‌ها بالاست و یا امکان انتخاب دوه‌دوی این سطوح در تماس وجود ندارد، می‌توان از General

¹ Contact

² Penalty

³ Tangential Behavior

⁴ Hard Contact

⁵ Pressure Overclosure

⁶ Normal Behavior

Contact برای تمام نمونه استفاده کرد که در اینجا چون تمام سطح های در تماس ضریب اصطکاک برابر داشتند از این مورد برای معرفی سطح های در تماس استفاده شده است.

۶-۲-۴. ویژگی های تکیه گاهی و بارگذاری های نمونه

برای به دست آوردن ویژگی های تکیه گاهی و بارگذاری نمونه های ساخته شده از ویژگی های گفته شده در آئین نامه ی اتصال های پیش پذیرفته ی آمریکا [1] استفاده شده است. تعریف این ویژگی ها در مازول Load انجام می شود. نمونه های ساخته شده در این پژوهش از نوع اتصال یک طرفه می باشد به این صورت که ویژگی های تکیه گاهی در نقطه های عطف تیر و ستون در قاب اعمال می شود. برای تکیه گاه پائین ستون تکیه گاه مفصلی و برای بالای ستون تکیه گاه مفصل غلتکی اعمال شده است، به شکلی که تکیه گاه در راستای قائم امکان جابجائی دارد. در انتهای تیر، همانند بالای ستون از تکیه گاه مفصل غلتکی استفاده شده است. همچنین در انتهای تیر جابجائی چرخه ای همانند شیوه نامه ی بارگذاری آئین نامه ی اتصال های پیش پذیرفته ی آمریکا اعمال شده است. تاریخچه ی بارگذاری در بخش ۱-۲-۳-۴ توضیح داده شده است.

برابر با استاندارد طراحی اتصال SST (فصل ۱۲ آئین نامه ی اتصال های پیش پذیرفته ی آمریکا) نیروی پیش تنیدگی برای پیچ های ساق پیوند تسلیمی در نظر گرفته شده است. مقدار پیش تنیدگی ۲۲۱ کیلونیوتن برابر با کمینه نیروی پیش تنیدگی آئین نامه ی الزامات عمومی AISC برای پیچ M22 نوع A490 اعمال شده است. همچنین برای مطالعه ی موردی که در فصل پیش رو توضیح داده خواهد شد، در پیچ های بال پیوند تسلیمی (M22 نوع A325) از پیش تنیدگی بیشینه به مقدار ۲۳۵ کیلونیوتن استفاده شده است.

در نرم افزار آباکوس توانائی اعمال پیش تنیدگی در پیچ ها در بارگذاری از نوع Bolt Load قرار داده شده است. برای اعمال پیش تنیدگی در نرم افزار از گزینه ی اعمال نیرو استفاده شده است.

۴-۲-۷. مش‌بندی نمونه

مش‌بندی یکی از گام‌های است که دقت و رعایت استانداردهای آن نه تنها در زمان پردازش، که در دقت نتایج و همچنین در به پایان رسیدن پردازش و عدم دریافت خطا در روند پردازش نقش مهمی دارد. در نرم‌افزار آباکوس گونه‌های زیادی برای ساختاربندی مش از وجود دارد که بسته به گونه، ویژگی‌ها و اهمیت بخش مربوطه می‌توان از هریک از این ساختارها استفاده کرد. البته بهترین گونه‌ی ساختاربندی مش، گونه‌ی Structural است که در این پژوهش به‌غیر از بخش کوچکی از تیر و ستون که از مش با ساختاربندی Tet (با المان ۳ بعدی جامد، ۴ گره‌ای؛ C3D4) استفاده شده، در تمام نمونه‌ها مش با ساختاربندی Structural (با المان ۳ بعدی جامد، ۸ گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته؛ C3D8R) به کار برده شده‌است. در بخش آنالیز حساسیت به علت استفاده از مش با ساختاربندی Tet اشاره خواهد شد.

برای یک مش‌بندی مناسب و کارا بهتر است برای اجزای پیچیده که در نمونه‌های این پژوهش هم به تعداد زیاد وجود دارد اجزا با بخش‌بندی به شکل‌های ساده تبدیل شود تا بتوان از هم از مش Structural استفاده کرد و هم کنترل بهتری روی مش‌بندی داشت. در نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش کوشش براین بوده تا با بخش‌بندی اجزا به شکل‌های ساده بتوان بهترین گونه‌ی مش‌بندی ممکن را انجام داد.

۴-۲-۷-۱. آنالیز حساسیت مش

از آنجا که مدل‌های نرم‌افزاری ساخته‌شده برای اتصال SST از لحاظ مدل‌سازی و مش‌بندی مدل‌های ساده و منظمی نیستند، آنالیز حساسیت مش در آنها کار دشواری است؛ و نیاز به مقایسه‌های فراوان دارد. در چنین مواردی بهترین راه حل استفاده از یک مدل پایه که از مش‌بندی مناسب برخوردار است می‌باشد. مش‌بندی مدل پایه باید در همه‌ی اجزا از مش‌بندی تا حد امکان ریز برخوردار باشد به گونه‌ای که زمان پردازش نیز در آن بالا نباشد. مش‌بندی مدل مبنا می‌تواند برپایه‌ی پژوهش‌های پیشین و تجربه‌ی پژوهش‌گر انجام شود.

نمونه‌ی پایه برای آنالیز حساسیت مش، از میان ۵ نمونه به گونه‌ای برگزیده شده که اجزای آن از لحاظ انداره‌ی هندسی در میان دیگر نمونه‌ها اندازه‌ی متوسطی داشته باشند تا بتوان از نتایج آنالیز

حساسیت مش در این نمونه برای دیگر نمونه‌های ساخته شده هم استفاده کرد. از آن جاکه در ۳ نمونه‌ی اول از یک گونه پیوند تسلیمی و ستون استفاده می‌شود برای نمونه‌ی پایه‌ی آنالیز حساسیت مش از نمونه‌ی چهارم استفاده شده است که اجزا آن به شکل معمول از ۳ نمونه‌ی اول بزرگتر و از نمونه‌ی پنجم کوچک‌تر است.

برای دست‌یابی به نتایج قابل اطمینان از روند آنالیز حساسیت مش در نمونه‌های عددی اتصال SST، بهترین روش آنالیز حساسیت مش اجزا و بخش‌های مهم اتصال به صورت جدا از هم است. تشخیص اجزائی که باید آنالیز حساسیت روی آنها صورت بگیرد به شناخت کامل رفتار این اتصال و اجزا تأثیر گذار بر عملکرد آن، بستگی دارد. همچنین با توجه به پژوهش‌های عددی مشابه صورت گرفته در گذشته می‌توان به نکته‌های مهمی دست‌یافت که برای از بین بردن ابهام‌های موجود در این زمینه‌ها بهتراست آنالیز حساسیت مش بر روی این موارد هم صورت گیرد، از این جمله می‌توان به تعداد لایه‌های مش در ضخامت ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها اشاره کرد.

پیرو گفته‌های بالا برای آنالیز حساسیت مش در اتصال SST، ۵ مورد مهم گزینش گردیده و روند آنالیز حساسیت مش بر روی آنها انجام شده است. این ۵ مورد عبارت‌اند از:

۱. تعداد لایه‌های مش در ضخامت ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها؛

۲. استفاده از مش Tet و بزرگ شدن مش‌ها در بخش‌های با تمرکز تنش پائین؛

۳. مش‌بندی پیچ‌ها؛

۴. مش‌بندی چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی؛ و

۵. مش‌بندی پیوند تسلیمی.

روند آنالیز حساسیت مش این گونه است که پس از گزینش و مش‌بندی نمونه‌ی پایه برای نخستین مورد از ۵ مورد بالا چندین نمونه مش‌بندی که در تمام اجزا و بخش‌ها مش‌بندی مشابه مدل پایه دارند و فقط در همان مورد خاص مدنظر مش‌بندی این چند نمونه متفاوت است، ساخته می‌شود و پس از برگزیدن نمونه‌ی مناسب با توجه به ۲ عامل همگرایی نتایج (در نمونه‌های با مش کوچک‌تر) و زمان

پردازش، از این نمونه برای نمونه‌ی پایه‌ی آنالیز حساسیت مورد دوم استفاده می‌شود. و به‌همین ترتیب مرحله‌های ۵ گانه طی می‌شود تا در پایان از میان نمونه‌های مش‌بندی‌شده برای مرحله‌ی پنجم نمونه‌ی مش‌بندی نهائی برگزیده و تمام مش‌بندی‌های دیگر نمونه‌های مورد نیاز در این پژوهش بر پایه‌ی مش‌بندی آن انجام شود؛ از جمله نمونه‌های راستی‌آزمائی که بر همین مبنا مش‌بندی می‌شوند.

برای پردازش‌های سُبک‌تر به‌جای بارگذاری چرخه‌ای از بارگذاری بارافزون^۱ استفاده شده‌است که در روند آنالیز حساسیت مش هم تأثیری نخواهد داشت. در ادامه به‌صورت کامل آنالیز حساسیت مش صورت گرفته در این پژوهش در ۵ گام آورده شده‌است.

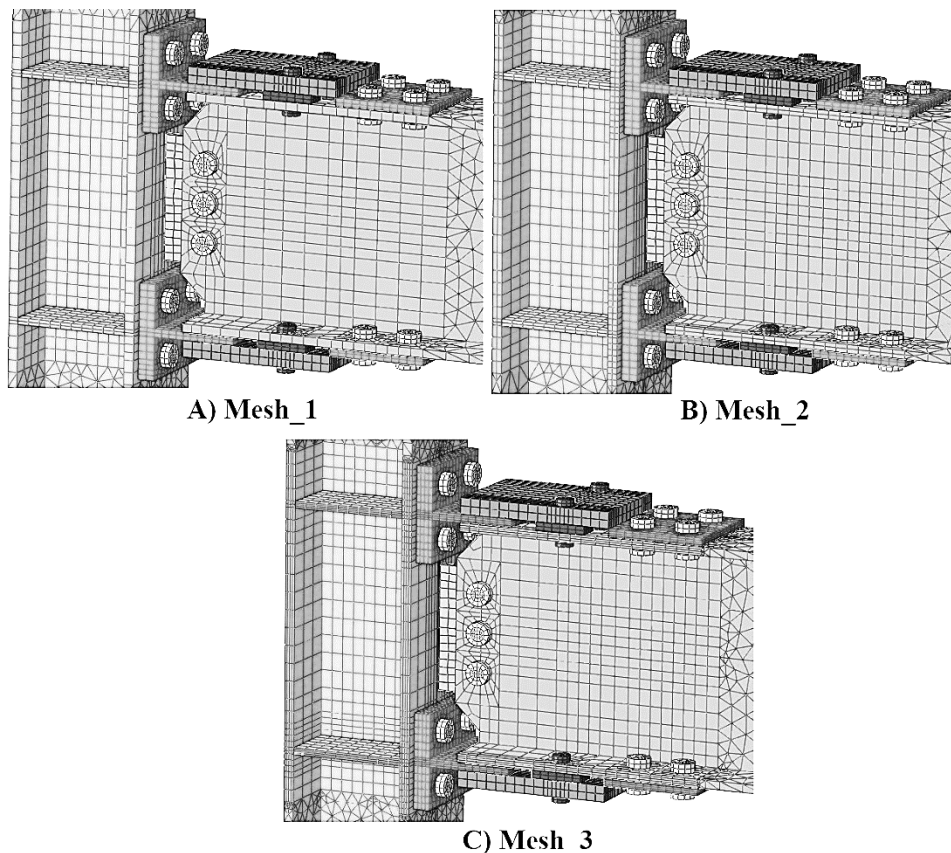
۴-۲-۱-۱. گام نخست: تعداد لایه‌های مش در ضخامت ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها

برای آنالیز حساسیت لایه‌های مش در ضخامت ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها ۳ نمونه تعریف شده‌است، که می‌توان بخش‌های دارای تفاوت در مش‌بندی این نمونه‌ها را در شکل ۴-۷ مشاهده نمود.

در نمونه‌ی نخست (Mesh_1) برای همه‌ی بخش‌ها در تمام اجزا از یک لایه مش استفاده شد که البته چون این نمونه نتوانست رفتار کُلی اتصال را در پردازش، درست شبه‌سازی کند و در قسمت‌های ساق پیوند تسلیمی و ورق‌های پیوستگی دچار کمانش شد؛ و به‌دلیل تغییر شکل‌های زیاد پردازش نتوانست تا انتها ادامه یابد. برای این نمونه در ضخامت همه‌ی ورق‌ها از جمله پیوند تسلیمی، ۲ لایه مش به‌کار برده شد، و ضخامت بال و جان نیم‌رخ‌ها از همان مش تک‌لایه استفاده شد و با این تغییرها، پردازش تا پایان بارگذاری انجام شد.

برای نمونه‌ی دوم (Mesh_2) که همان مدل پایه‌ی نخستین می‌باشد، در ضخامت همه‌ی ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها در محدوده‌ی اتصال (قسمت میانی بین ۳ مش Tet که در شکل ۴-۷ بخش A قابل مشاهده است) از ۲ لایه مش استفاده شده‌است. در نمونه‌ی سوم (Mesh_3) برای همه‌ی بخش‌ها در محدوده‌ی اتصال از ۴ لایه مش به‌کار برده شده‌است، به‌جز در ضخامت جان تیر و ستون که به علت ضخامت کم از ۳ لایه مش در محدوده‌ی اتصال استفاده شده‌است.

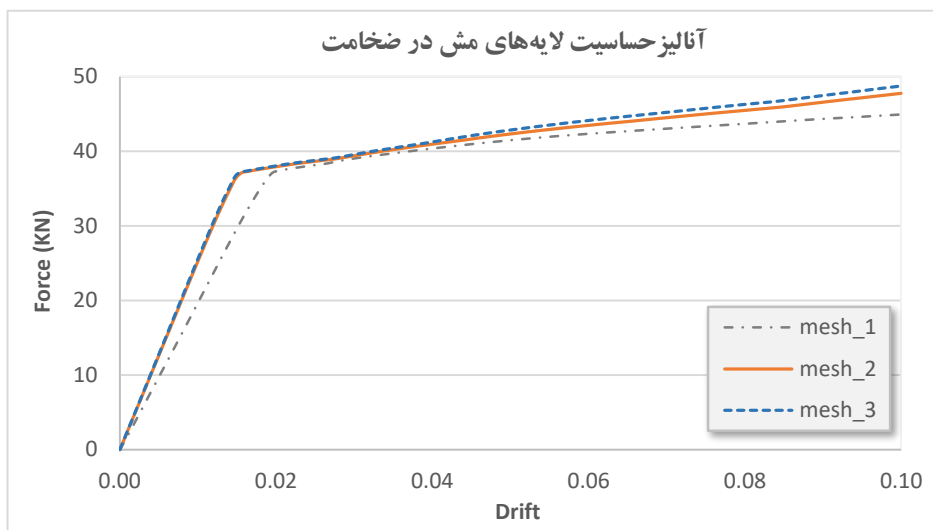
¹ Push



شکل ۴-۷. مش بندی نمونه های آنالیز حساسیت لایه های مش در ضخامت

در هر ۳ نمونه، همانند نمونه ی پایه برای بخش های خارج از محدوده ی اتصال از یک لایه مش در ضخامت استفاده شده است. نتایج مقایسه ی این ۳ مدل در شکل ۴-۸ آورده شده است.

خروجی گرافیکی نمونه نخست کمانش در ورق جان ستون در چشمه ی اتصال را نشان داد که در ۲ نمونه ی دیگر که تعداد لایه های مش در جان ستون (بخش چشمه ی اتصال) بیشتر از یک لایه بود این کمانش مشاهد نمی شد و این نکته بیان گر این موضوع است که در ورق های که در نمونه تحت بار گذاری امکان کمانش دارند، بایستی بیش از ۲ لایه مش داشته باشند و گرنه پدیده ی کمانش در آنها بسیار زود هنگام رخ می دهد.



شکل ۴-۸. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت لایه‌های مش در ضخامت

جدول ۴-۲. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت لایه‌های مش در ضخامت

Mesh_3	Mesh_2	Mesh_1	
۲۶۴۹	۲۲۲۵	۱۶۳۰	زمان پردازش (ثانیه)
۱۹٪ افزایش	۰	۲۷٪ کاهش	درصد نابرابری

همان‌گونه که در نمودار شکل ۴-۸ دیده می‌شود ۲ نمونه‌ی دوم و سوم نتایج کمابیش یکسانی به‌ویژه در سختی و مقاومت تسلیم دارند و این نشان می‌دهد که استفاده بیش از دو لایه مش در ضخامت ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها تأثیری در نتایج ندارد؛ همچنین مطابق جدول ۴-۲ با توجه به بالاتر بودن زمان پردازش نمونه‌ی سوم نسبت به نمونه‌ی دوم می‌توان به این نتیجه دست یافت که استفاده از ۲ لایه مش در ضخامت ورق‌ها و نیم‌رخ‌ها در محدوده‌ی اتصال که در نمونه‌ی دوم به کار برده شده است، برای مش‌بندی مناسب است. بنابراین از نمونه‌ی دوم به‌عنوان نمونه‌ی پایه برای گام دوم آنالیز حساسیت مش استفاده می‌شود.

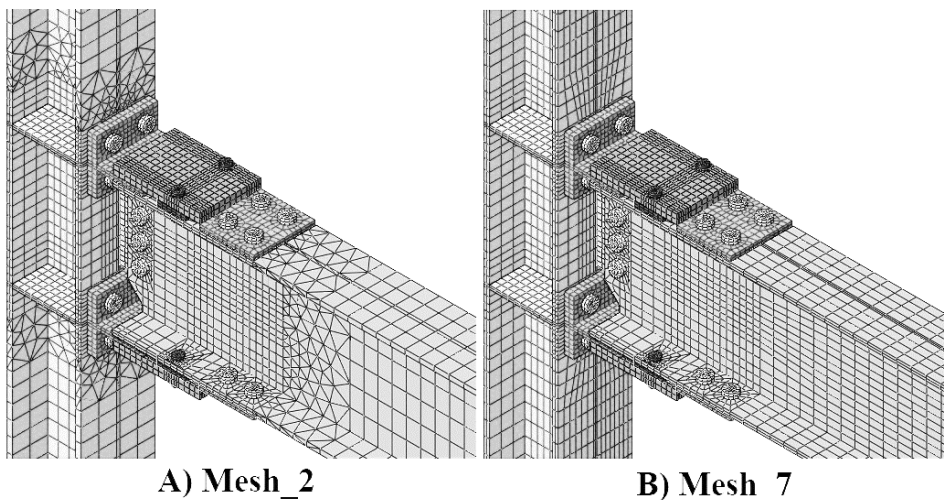
۲-۷-۱-۲-۴. گام دوم: استفاده از مش Tet و بزرگ شدن مش ها در بخش های با تمرکز تنش پائین

در مش بندی به کارگیری مش ریز در بخش های حساس و با تمرکز تنش و مش های درشت تر در بخش های کم اهمیت و با تنش کمتر، پردازشی مناسب از لحاظ هزینه زمانی را در پی خواهد داشت. همان گونه که پیش تر گفته شد استفاده از مش با ساختار بندی Structural قابل اطمینان ترین و بهترین نتایج را در پی خواهد داشت؛ اما استفاده از این گونه ی ساختار بندی مش تنگناهایی را برای سبک سازی مش در بخش های کم اهمیت نمونه ایجاد می کند که از آن جمله می توان به این مورد اشاره کرد که برای سبک سازی مش با گونه ی Structural فقط می توان در طول تیر و ستون اندازه ی مش را بزرگ تر کرد و امکان کاهش تعداد مش ها در عرض بال، ارتفاع جان و همچنین لایه های مش در ضخامت بال و جان در تیر و ستون وجود ندارد، که این خود، به هم خوردن نسبت بُعد های^۱ هندسی مش را در پی دارد که باعث کاهش دقت پردازش می شود.

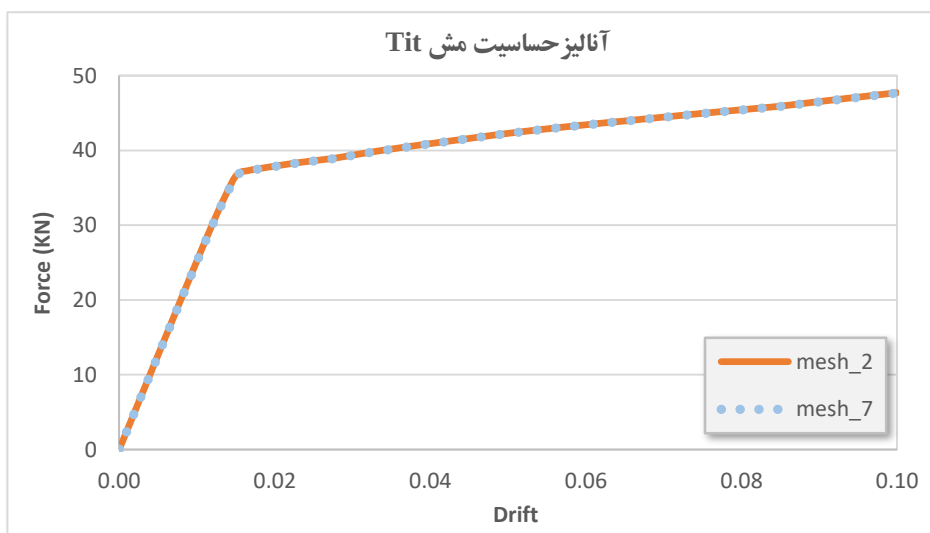
با به کارگیری یک بخش پیوندی میان ۲ قسمت محدوده ی اتصال که جزء بخش های حساس و دارای تمرکز تنش به شمار می آید، و قسمت با تنش های پائین (انتهای تیر و ستون)، چالش سبک سازی مش با استفاده از ساختار بندی Structural را می توان حل نمود. از این رو برای این بخش پیوندی از مش با ساختار بندی Tet استفاده می شود.

برای اطمینان از بی تأثیر بودن به کارگیری مش با ساختار بندی Tet و همچنین عدم تأثیر سبک سازی مش در بخش های بیرون از محدوده ی اتصال، در نتایج، نیاز به آنالیز حساسیت مش وجود دارد؛ که این کار با ساخت و مش بندی دوباره از نمونه ی پایه ی به دست آمده از گام پیشین (Mesh_2)، انجام شد؛ به این صورت که در نمونه ی پایه از ساختار بندی Tet و سبک سازی مش در خارج از محدوده ی اتصال استفاده شده بود ولی در نمونه ی دیگر (Mesh_7) مش بندی شده، در تمام نمونه مش بندی با ساختار بندی Structural و بدون سبک سازی مش انجام گرفت. می توان مش بندی این ۲ نمونه را در شکل ۴-۹ مشاهده نمود.

^۱ Aspect Ratio



شکل ۴-۹. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت به کارگیری مش با ساختار بندی Tet و سبک‌سازی مش



شکل ۴-۱۰. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت به کارگیری مش با ساختار بندی Tet و سبک‌سازی مش

مقایسه‌ی نتایج این ۲ نمونه که در شکل ۴-۱۰ قابل مشاهده‌است، نشان می‌دهد که استفاده از مش با ساختار بندی Tet برای بخش پیوندی میان ۲ قسمت Structural و همچنین سبک‌سازی مش در

جدول ۳-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت به کارگیری مش با ساختار بندی Tet و سبک سازی مش

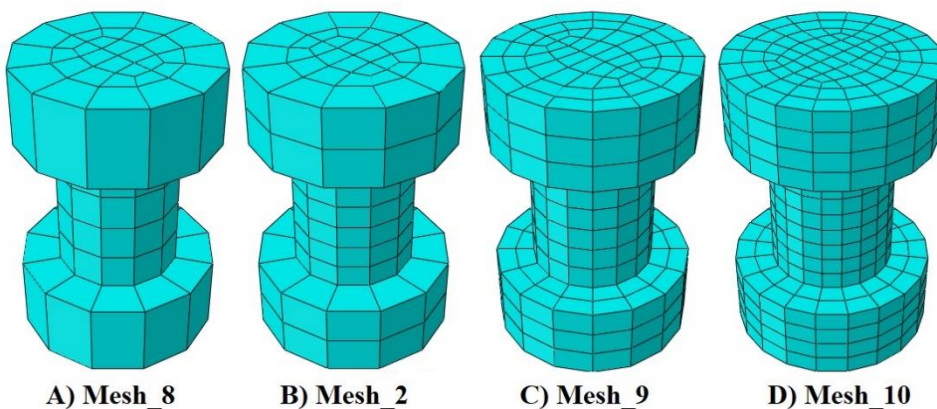
Mesh_7	Mesh_2	
۲۶۳۶	۲۲۲۵	زمان پردازش (ثانیه)
۱۸٪ افزایش	۰	درصد نابرابری

بیرون از محدوده‌ی اتصال، تأثیری در نتایج پردازش ندارد و از آنجا که باعث کاهش ۱۸ درصدی در زمان پردازش می‌گردد به کارگیری آنها بسیار مناسب است.

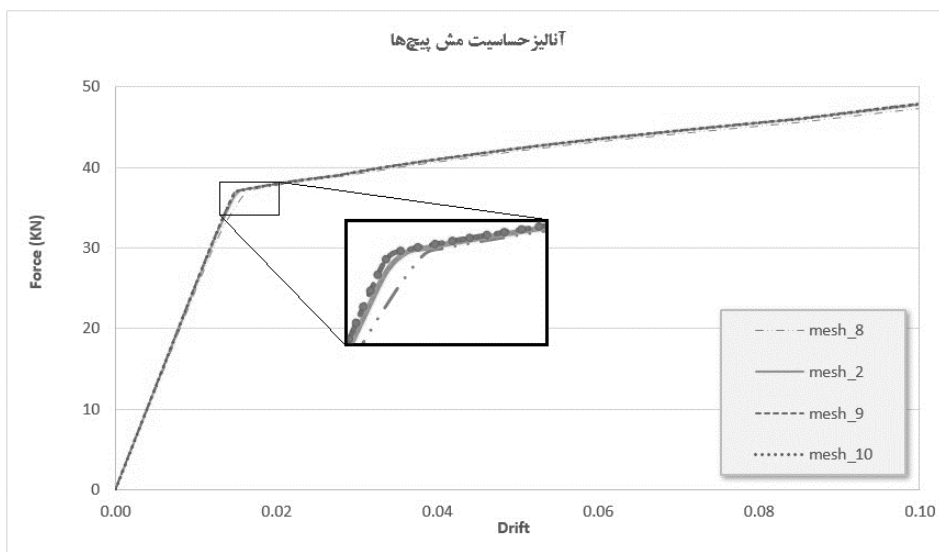
به این ترتیب از همان نمونه‌ی پایه‌ی گام نخست آنالیز حساسیت مش (Mesh_2)، برای گام سوم استفاده می‌شود.

۳-۱-۷-۲-۴. گام سوم: مش بندی پیچ‌ها

برای آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها ۳ نمونه‌ی مشابه نمونه‌ی پایه (Mesh_2) مش بندی گردید، با این تفاوت که در یک نمونه (Mesh_9) مش بندی پیچ‌ها در آن نسبت به نمونه‌ی پایه درشت‌تر و در ۲ نمونه‌ی دیگر (Mesh_9 & Mesh_10) مش بندی پیچ‌ها با اندازه‌های کوچکتر از نمونه‌ی پایه انجام شد؛ که در شکل ۴-۹ مش بندی‌های این ۴ نمونه را برای پیچ‌های اتصال دهنده‌ی ساق پیوند تسلیمی به بال تیر، آورده شده است.



شکل ۴-۹. مش بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها



شکل ۴-۱۰. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها

جدول ۴-۴. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیچ‌ها

Mesh_10	Mesh_9	Mesh_2	Mesh_8	
۲۸۰۸	۲۴۱۵	۲۲۲۵	۳۹۰۰	زمان پردازش (ثانیه)
۲۶٪ افزایش	۹٪ افزایش	۰	۷۵٪ افزایش	درصد نابرابری

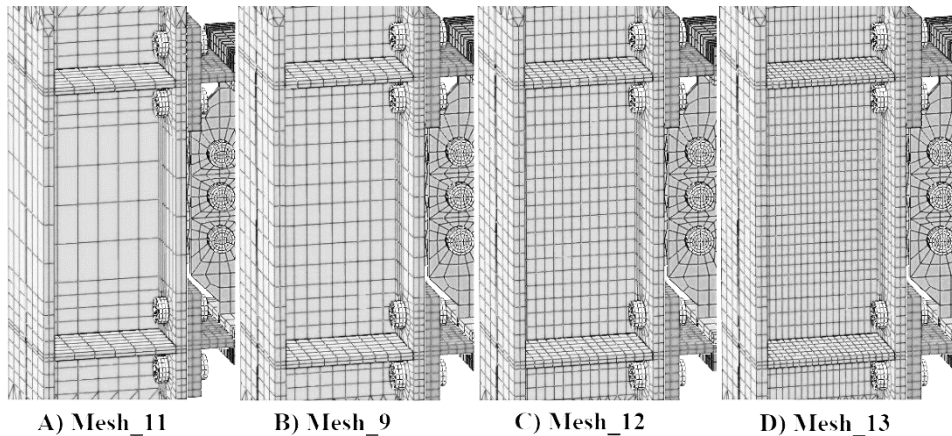
همان گونه که در نمودار شکل ۴-۱۰ نمایان است کمابیش همه‌ی نمونه‌ها نتایجی همانند دارند، جز نمونه‌ی با مش بزرگ‌تر که اندکی در مقاومت نهائی کمتر از نمونه‌های دیگر است و همچنین در قسمت مقاومت تسلیم هم فاصله‌ی آن با دیگر نمونه‌ها زیادتر است و همچنین به دلیل گره‌هائی که بزرگ بودن مش پیچ، در پردازش ایجاد می‌کند زمان پردازش آن هم اختلاف آشکار دارد که استفاده از پیچ با این مش را غیرقابل توجه می‌کند. در مقایسه‌ی ۳ نمونه‌ی دیگر با توجه به این که ۲ نمونه‌ی با مش کوچک‌تر (Mesh_9 & Mesh_10) به‌طور کامل نتایج یکسانی دارند و اما زمان پردازش در نمونه‌ی Mesh_9 بهتر است و نمونه‌ی پایه در قسمت مقاومت تسلیم فاصله‌ی اندکی با این ۲ نمونه دارد، در

نتیجه نمونه‌ی Mesh_9 را به عنوان گزینه‌ی مناسب انتخاب نمود؛ و به این ترتیب این نمونه به عنوان نمونه‌ی پایه برای گام بعدی آنالیز حساسیت مش انتخاب می شود.

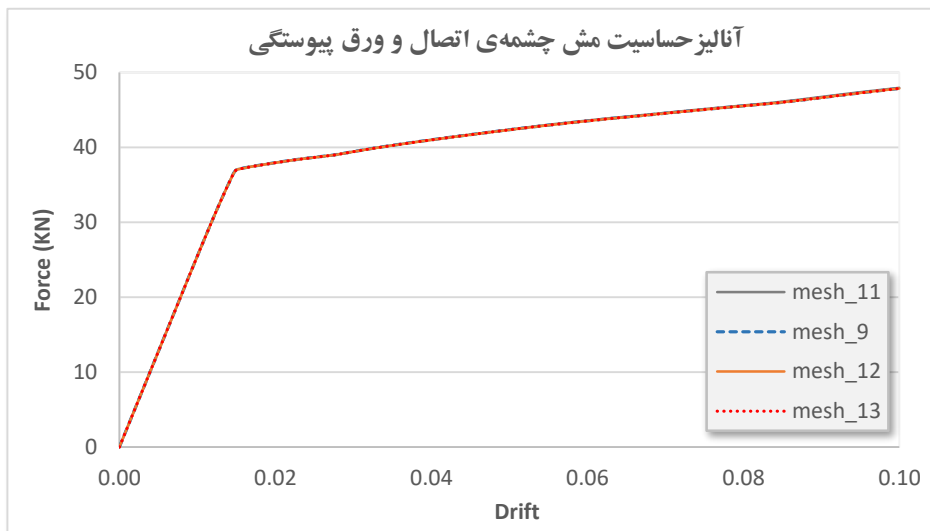
۴-۲-۷-۴. گام چهارم: مش بندی چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی

برای آنالیز حساسیت مش چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی از روی نمونه‌ی پایه‌ی گام پیشین (Mesh_9) نمونه‌ی دیگر ساخته شد و مش بندی ستون در محدوده‌ی اتصال دوباره صورت گرفت؛ به این صورت که یک نمونه با مش بندی بزرگ تر و ۲ نمونه با مش بندی کوچک تر نسبت به نمونه‌ی پایه ساخته شد. تعداد لایه‌های مش همانند نتایج گام نخست ۲ لایه برای هر ۴ نمونه در نظر گرفته شده است. همچنین مش بندی ورق پیوستگی به شکلی انجام گرفته تا با چشمه‌ی اتصال همسان باشد. مش بندی این ۴ نمونه را در شکل ۴-۹ می توان دید.

نتایج این ۴ نمونه همان گونه که در شکل ۴-۱۰ دیده می شود به طور کامل باهم یکسان هستند؛ اما در هزینه‌ی زمانی پردازش با هم متفاوت اند و از میان این نمونه‌ها هر کدام که زمان پردازش کمتری دارند را می توان به عنوان گزینه‌ی مناسب قلمداد کرد. همان گونه که از آنالیز حساسیت مش این گام و گام مربوط به پیچ‌ها می توان دریافت، بزرگ تر نمودن اندازه‌ی مش می تواند در مواردی به بالاتر رفتن زمان پردازش بینجامد.



شکل ۴-۱۱. مش بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت مش چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی



شکل ۴-۱۲. مقایسه‌ی نتایج آنالیز چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی

جدول ۴-۵. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت مش چشمه‌ی اتصال و ورق پیوستگی

Mesh_13	Mesh_12	Mesh_9	Mesh_11	
۲۵۰۰	۲۵۸۶	۲۴۱۵	۲۶۸۸	زمان پردازش (ثانیه)
۰.۴٪ افزایش	۰.۷٪ افزایش	۰	۱۱٪ افزایش	درصد ناپرابری

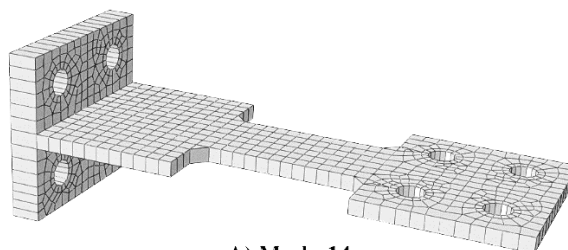
با توجه به جدول ۴-۵ و زمان‌های پردازش، نمونه‌ی Mesh_9 با کمترین زمان پردازش به‌عنوان نمونه‌ی پایه‌ی برای گام بعد به‌کار برده می‌شود.

۴-۷-۱-۵. گام پنجم: مش‌بندی پیوند تسلیمی

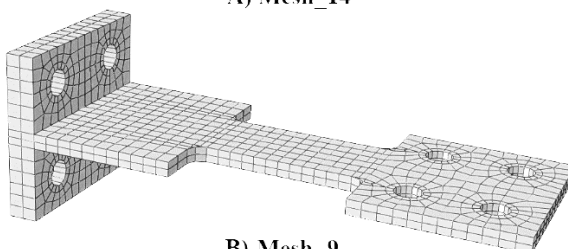
آنالیز حساسیت مش برای پیوند تسلیمی از این‌رو در گام پایانی انجام شده‌است، که این عضو مهم‌ترین قطعه‌ی اتصال بوده و تشکیل مفصل پلاستیک اتصال در نتیجه‌ی تسلیم شدن بخش کاهش‌یافته‌ی این عضو صورت می‌پذیرد. انجام آنالیز حساسیت مش برای پیوند تسلیمی در گام پایانی باعث می‌شود که نمونه‌ی پایه‌ی مورد استفاده در این گام دارای مناسب‌ترین مش‌بندی در دیگر عضوهای اتصال باشد.

برای ساخت نمونه‌های این گام از مدل پایه‌ی گام پیشین ۲ نمونه‌ی دیگر ساخته شد که برای مش‌بندی پیوند تسلیمی در یک نمونه مش‌های درشت‌تر و در نمونه‌ی دیگر مش‌های کوچک‌تر از نمونه‌ی پایه استفاده شد. شکل ۴-۱۳ مش‌بندی پیوند تسلیمی ۳ نمونه را نشان می‌دهد.

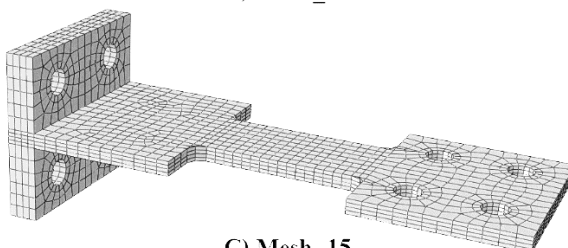
تفاوت در مش‌بندی پیوندهای تسلیمی هم در تعداد لایه‌های مش در ضخامت و هم در اندازه‌های ابعادی مش (به‌ویژه در بخش کاهش یافته‌ی پیوند تسلیمی)، مدنظر قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که در نمونه‌ی با مش درشت‌تر نه تنها ابعاد مش نسبت به نمونه‌ی پایه بزرگ‌تر است، بلکه در این نمونه سعی شد همانند گام نخست نمونه‌ای ایجاد شود تا با یک لایه مش در ضخامت پیوند تسلیمی بتوان رفتار کُلی اتصال را تا آخرین گام پردازش بررسی نمود که البته آن‌چنان که در گام نخست نیز گفته شد به دلیل کمایش ساق پیوند تسلیمی، ساخت چنین نمونه‌ای کار دشواری بود که با اصلاحاتی بر روی مش‌بندی امکان پذیر شد و می‌توان نمودار بارافزون نمونه‌ی Mesh_14 را در نمودار شکل ۴-۱۴ مشاهده نمود که در آن، قسمت کاهش مقاومت نمایان گر کمایش ساق پیوند تسلیمی است. همچنین در نمودار شکل ۴-۱۴ نتایج ۲ نمونه‌ی دیگر هم ارائه گردیده است.



A) Mesh_14



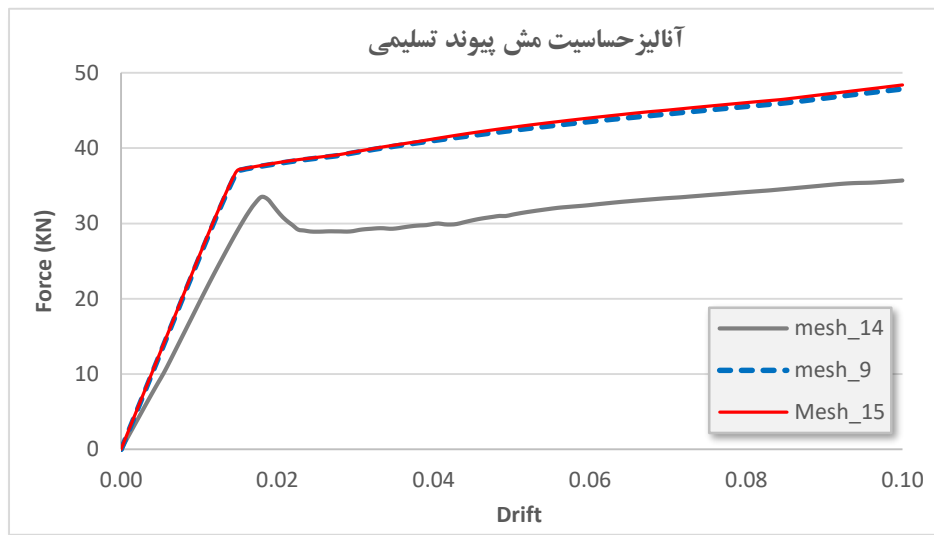
B) Mesh_9



C) Mesh_15

شکل ۴-۱۳. مش‌بندی نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیوند تسلیمی

با توجه به همانند بودن نمودار نتایج ۲ نمونه‌ی با مش‌بندی کوچک‌تر، به‌ویژه در سختی و مقاومت تسلیم، می‌توان هر کدام از این ۲ نمونه را به‌عنوان نمونه‌ی پایه برای ادامه‌ی روند نمونه‌سازی پژوهش برگزید که با در نظر گرفتن زمان پردازش، نمونه‌ی Mesh_9 به‌عنوان نمونه‌ی پایانی برای روند آنالیز حساسیت مش برگزیده‌شد.



شکل ۴-۱۴. مقایسه‌ی نتایج آنالیز حساسیت مش پیوند تسلیمی

جدول ۴-۶. زمان پردازش نمونه‌های آنالیز حساسیت مش پیوند تسلیمی

Mesh_15	Mesh_9	Mesh_14	
۲۷۲۰	۲۴۱۵	۶۲۳۹	زمان پردازش (ثانیه)
۹٪ افزایش	۰	۲۵۸٪ افزایش	درصد نابرابری

۴-۲-۸. خروجی‌های پردازش نمونه

دست آوردهای پردازش انجام شده از سوی نرم افزار آباکوس با توجه به خروجی‌های خواسته شده در ماژول Step را می توان در ماژول Visualization مشاهده نمود. یکی از مهم ترین گام ها در یک پردازش قابل اطمینان، بررسی خروجی گرافیکی پردازش است؛ زیرا بسیاری از خطاها و لغزش ها در ساخت نمونه را می توان با بررسی موشکافانه ی خروجی های گرافیکی پیدا و نسبت به رفع آنها اقدام نمود. همچنین زمانی می توان خروجی های نموداری پردازش که هرچند بسیار هم نزدیک به واقعیت باشد، را قابل پذیرش دانست که پس از بررسی خروجی گرافیکی مشکلی در ساخت نمونه و شبه سازی رفتار کُلی اتصال وجود نداشته باشد.

۳-۴. راستی آزمائی

از آنجاکه اتصال SST در گروه اتصال‌های انحصاری و ثبت اختراع شده‌ی استاندارد اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکاست، همه‌ی آزمایش‌های این اتصال توسط شرکت دارای امتیاز این اتصال (شرکت سیمپسون استرانگ تان) انجام گرفته، و این شرکت هم در انتشار نتایج آزمایش‌های صورت گرفته به صورت عمومی محدودیت در نظر گرفته و هیچ مقاله یا گزارشی با جزئیات کامل از این آزمایش‌ها در دست نیست. تنها مقاله‌ای که یک نمودار چرخه‌ای از قاب مقاوم سیمپسون استرانگ تان که در آن در یک سمت از اتصال مفصلی و در سمت دیگر از اتصال SST استفاده شده، مقاله آقای پریور [19] (سرتیم ارائه‌کننده و طراح اتصال SST) است که در سال ۲۰۱۳ ارائه شده‌است. در این مقاله هیچ‌گونه داده‌های از جزئیات قاب ارائه نشده و به همین سبب در این پژوهش برای آسودگی خاطر از راستی آزمائی مناسب ۲ مورد راستی آزمائی انجام شده‌است.

در راستی آزمائی نخست اتصالی مشابه با اتصال SST مورد استفاده قرار گرفته‌است و برای راستی آزمائی دوم تلاش شده تا از روی داده‌های در دست از مقاله آقای پریور و دیگر دانسته‌ها از اتصال SST که به روش‌های گوناگون به دست آمده به ساخت نمونه‌ی مورد آزمایش (که نتایج آن در مقاله‌ی آقای پریور آورده شده‌است) پرداخته و آن نمونه را با نتایج ارائه‌شده در مقاله، راستی آزمائی نمود.

۳-۴-۱. راستی آزمائی نخست

در راستی آزمائی نخست کوشیده شده تا نمونه‌ی آزمایشگاهی با بیشترین شباهت به اتصال SST برگزیده شود تا بتوان به نتایج این راستی آزمائی برای ادامه‌ی روند ساخت نمونه‌های موردنیاز در این پژوهش تکیه نمود. اتصالی که از لحاظ عملکرد بسیار به اتصال SST هماننداست، اتصال سپری انتهائی^۱ است. از آنجاکه این گونه‌ی اتصال، پیچی بوده، از سوی دیگر می‌تواند رفتار اهرمی در بال پیوند تسلیمی را شبیه‌سازی کند، می‌تواند مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین گزینه به اتصال SST باشد.

^۱ T-Stub

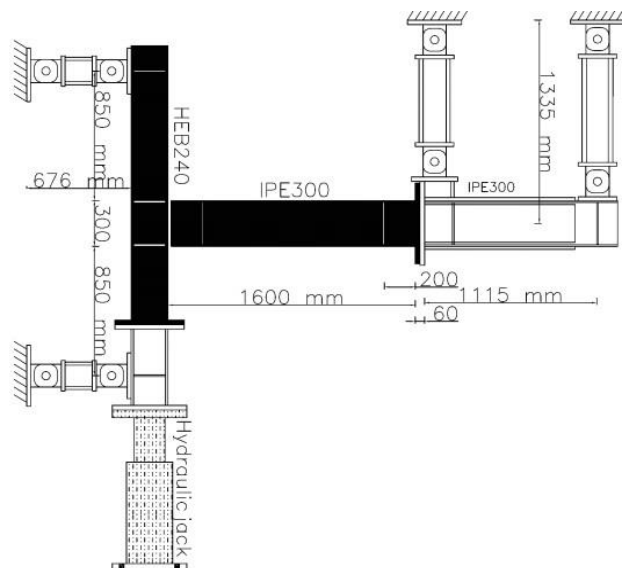
مقاله‌ی به کار گرفته شده برای راستی آزمائی نخست از دانش [29] بوده که در آن به بررسی رفتار اتصال تیر پیوند به ستون در قاب‌های مهاربندی با خروج از مرکزیت، با استفاده از اتصال سپری انتهائی پرداخته شده است.

برای ساخت نمونه‌ی مقاله‌ی دانش، همانند روش به کار گرفته شده در کتاب اوکازاکی [30] که کار آزمایشگاهی و عددی مشابه همین مقاله انجام داده، برای ساده سازی روند نمونه سازی از اتصال پیچی یک سمت ستون به قسمت ارتباطی ستون به جک هیدرولیکی چشم پوشی شده و ستون به صورت یک پارچه ساخته شده است. در شکل ۴-۱۵ روش ساخت نمونه و ویژگی‌های تکیه گاهی وارد شده در نرم افزار آباکوس برگرفته از ساختار چیدمان آزمایشگاهی انجام شده، نمایش داده شده است.

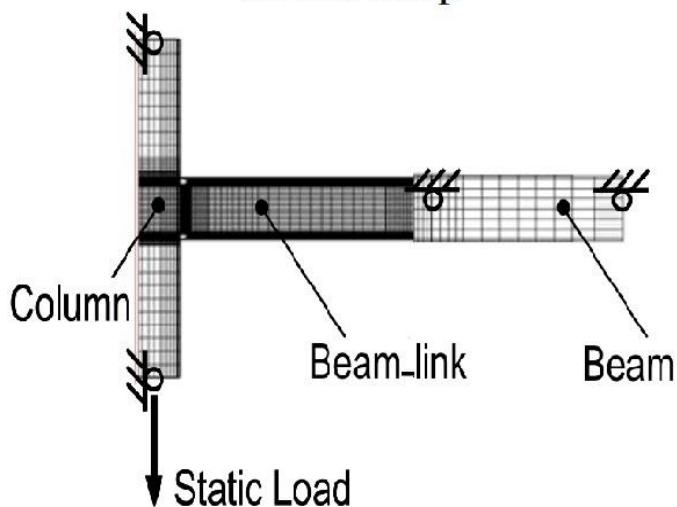
در جدول ۴-۷ ویژگی‌های هندسی همه‌ی بخش‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌ی، راستی آزمائی نخست آورده شده است.

برای ویژگی‌های مصالح همانند گفته‌های پیشین، نمودار تنش- کرنش مهندسی به نمودار تنش- کرنش حقیقی برگردانده شده است. از پردازش گر General Static برای انجام روند پردازش با ۲ گام استفاده شد؛ که در گام نخست پیش‌تیدگی پیچ‌ها و در گام دوم بارگذاری چرخه‌ای انجام می‌شود. برای معرفی ضریب اصطکاک مقدار ۰/۵ برای تمام نمونه در نرم افزار به کار برده شده است.

ویژگی‌های تکیه گاهی هم همانند آنچه در شکل ۴-۱۵ آورده شده است، برای ۴ نقطه‌ی نمایش داده شده مفصل غلتکی قرار داده شده است؛ در این نقطه‌ها ویژگی مهار پیرامونی هم در نظر گرفته شده است. شیوه‌نامه‌ی بارگذاری هم با برداشت از مقاله‌ی دانش به نرم افزار داده شده است؛ البته با توجه به چرخش ارائه شده در نمودارهای خروجی آزمایشگاهی، ویرایش‌های در میزان جابجائی‌های فراخوان شده به نرم افزار انجام پذیرفته است؛ به شکلی که میزان چرخش‌های خروجی نرم افزار با مقدار چرخش‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی برابر باشد.



A. Test Setup



B. FEM Modeling

شکل ۴-۱۵. روش ساخت نمونه‌ی نرم‌افزاری برگرفته از ساختار برپائی آزمایش

در مش‌بندی نمونه‌ی راستی آزمائی تلاش گردیده تا از دست‌آوردهای آنالیز حساسیت مش انجام گرفته، بیشترین استفاده صورت گیرد. البته در سرتاسر مش‌بندی نمونه‌ی راستی آزمائی از مش با

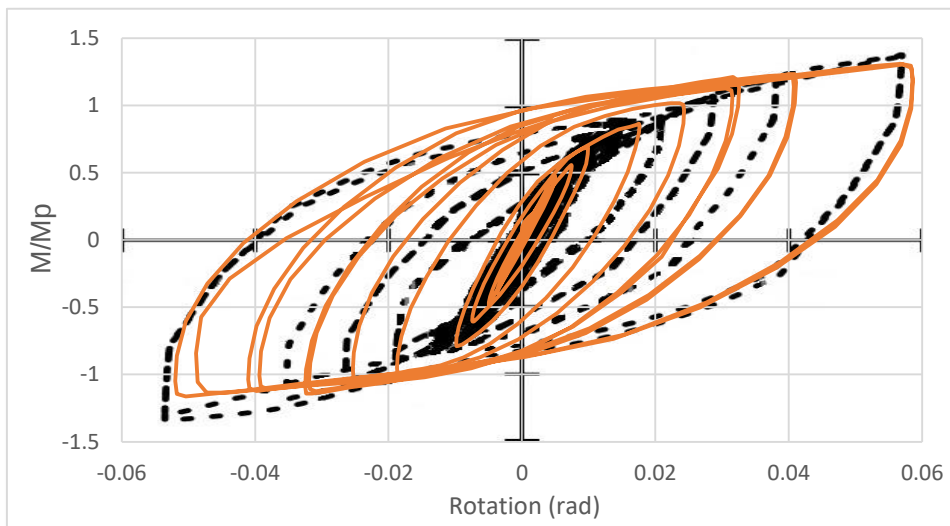
جدول ۴-۷. ویژگی های هندسی بخش های به کار رفته در ساخت نمونه ی راستی آزمائی نخست

طول (mm)	نیم رخ ها / ابعاد (mm)	
2000	HEB240	ستون
1600	IPE300	تیر پیوند
1145	IPE300	تیر
	CUT IPE360	سپری انتهائی
	2PL.220×100×12 (with cut)	ورق های برش گیر
	4PL.206×105×15	ورق های پیوستگی
	2PL.550×206×10	ورق تقویت چشمه ی اتصال
	2PL.1145×150×10	ورق تقویت تیر
	31 M16	پیچ ها

ساختار بندی Structural با المان های ۳ بعدی جامد، ۸ گره ای با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است.

در شکل ۴-۱۶ مقایسه ی میان نمودار چرخه ای نمونه ی عددی ساخته شده در این پژوهش و نمونه ی آزمایشگاهی دانش را می توان دید؛ از این قیاس می توان نتیجه گرفت که همانندی خوبی میان ۲ نمودار وجود دارد و مقدار اختلافی که در سختی های کشسان ۲ نمودار مشاهده می شود با توجه به اینکه به طور معمول نمونه های عددی سختی کشسان بیشتری نسبت به نمونه های آزمایشگاهی دارند، قابل چشم پوشی است.

از آنجا که نمودار ارائه شده در مقاله ی دانش به خوبی سختی کشسان را نشان نمی دهد، از مقایسه ی درصدی، میان سختی کشسان ۲ نمونه پرهیز شده است ولی با مشاهده ی نمودار ۴-۱۶ می توان گفت سختی نمونه ی عددی در حد مناسب با سختی نمونه ی آزمایشگاهی همخوانی دارد؛ در جدول ۴-۸ به مقایسه ی مقاومت نهائی دو نمونه ی عددی و آزمایشگاهی برای ۳ چرخه ی آخر پرداخته شده است.



شکل ۴-۱۶. نمودار راستی آزمائی نخست؛ مقایسه‌ی نمودار چرخه‌ای عددی با نمودار چرخه‌ای آزمایشگاهی دانش

جدول ۴-۸. مقایسه‌ی درصد نابرابری ۳ چرخه‌ی آخر راستی آزمائی نخست

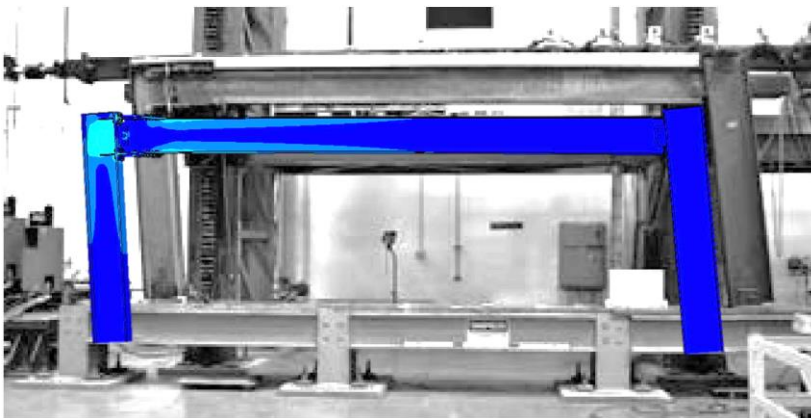
نمودار آزمایشگاهی			نمودار عددی			نابرابری		
چرخه ۷	چرخه ۸	چرخه ۱	چرخه ۷	چرخه ۸	چرخه ۱	چرخه ۷	چرخه ۸	چرخه ۹
۱/۰۸	۱/۲۲	۱/۳۸	۱/۱۹	۱/۲۳	۱/۳۲	۱/۱۰	۱/۰۸	۴/۳
۱/۲	۱/۱۳	۱/۱۸	۱/۰۸	۱/۱۷	۱/۳۲	۱/۱۰	۳/۵	۱/۱۱

۴-۳-۲. راستی آزمائی دوم

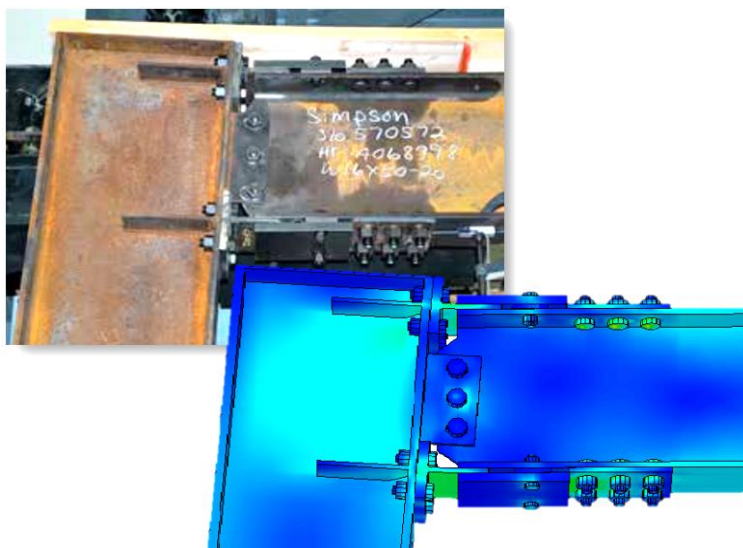
همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد در مقاله‌ی پریور [19] داده‌های نمونه‌ی آزمایش‌شده، داده نشده‌است؛ اما از آنجاکه شرکت «سیمپسون استرانگ‌تای» در ابتدا تنها ۳ نمونه‌ی سُبک، متوسط و سنگین برای پیوندهای تسلیمی در نظر گرفته بود و از این میان تنها پیوند تسلیمی سنگین دارای ۶ پیچ در قسمت ساق است، و در تصویری که در مقاله از آزمایش انجام شده، ارائه شده ۶ پیچ در قسمت اتصال ساق پیوند تسلیمی به بال تیر دیده می‌شود؛ می‌توان دریافت که پیوند تسلیمی استفاده شده در این آزمایش از گونه‌ی پیوند تسلیمی سنگین است.

اندازه‌های هندسی پیوند تسلیمی سنگین از گزارش‌های طراحی ارائه‌شده توسط شرکت «سیمپسون استرانگ‌تای» به‌دست آمده و در ادامه از تصویر کُلّ قاب مورد آزمایش در مقاله موردنظر، با به‌کارگیری نرم‌افزار مقیاس‌بندی، طول و شماره‌ی نیم‌رخ‌های تیر و ستون برآورد گردیده‌است. در تصویر دیگری از این آزمایش که از تارنمای شرکت «سیمپسون استرانگ‌تای» به‌دست آمده، شماره‌ی نیم‌رخ نوشته‌شده روی تیر با شماره‌ی نیم‌رخ برآورد شده به‌روش مقیاس‌بندی، یکسان بود و این می‌تواند گواه درست بودن مقیاس‌بندی انجام‌شده باشد.

برای به‌دست آوردن اندازه‌های پیچ‌ها و ورق‌های به‌کار گرفته در آزمایش، از گزارش‌های طراحی، راهنماهای طراحی و خروجی‌های نرم‌افزار طراحی ارائه‌شده توسط شرکت «سیمپسون استرانگ‌تای»، استفاده شده‌است که در آن برای همه‌ی قاب‌های طراحی شده، در این اعضا هم‌خوانی وجود دارد و می‌توان با اطمینان اندازه‌های این بخش‌ها را مشخص نمود. در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ قاب پردازش شده در نرم‌افزار در کنار قاب آزمایش شده نمایش داده شده‌است.



شکل ۴-۱۷. نمونه‌ی آزمایشگاهی در کنار نمونه‌ی عددی ساخته‌شده



شکل ۴-۱۸. تصویری از اتصال SST در قاب مورد آزمایش در کنار نمونه‌ی عددی ساخته‌شده

در راستی آزمائی دوم همانند مقاله‌ی پریور، یکای آمریکائی (اینچ برای طول و پوند برای نیرو) برای ساخت نمونه به کار برده شده‌است. در ادامه همه‌ی ویژگی‌های هندسی بخش‌های که برای ساخت نمونه‌ی راستی آزمائی مقاله‌ی پریور در این پژوهش به کار برده شده‌است، در جدول ۴-۹ آورده شده‌است.

در مقاله‌ی پریور به نوع فولادهای نیم‌رخ‌ها و دیگر بخش‌های اتصال اشاره نشده است ولی می‌توان فولادهای مورد استفاده برای بخش‌های گوناگون را از روی شیوه‌نامه‌های طراحی و گزارش‌های طراحی شرکت «سیمپسون استرانگ‌تای» مشخص نمود. در جدول ۴-۱۰ استاندارد فولاد به کار رفته برای بخش‌های گوناگون قاب آورده شده‌است.

از آنجاکه ویژگی‌های مصالح قاب آزمایش‌شده با آزمایش بروی مصالح مورد استفاده در این آزمایش مشخص نشده و در مقاله‌ی آقای پریور فقط به مقاومت اسمی تسلیم و نهائی اشاره شده‌است؛ برای ویژگی‌های فولاد A992 رده‌ی ۵۰ که برای نیم‌رخ‌ها به کار برده شده‌است و همچنین فولاد A572 رده‌ی ۵۰ که برای ورق‌ها مورد استفاده قرار گرفته؛ از رابطه‌ای که در آئین‌نامه بایستگی‌های عمومی

جدول ۴-۹. ویژگی های هندسی بخش های به کاررفته در ساخت نمونه ی راستی آزمائی دوم

طول (in)	نیم رخ ها / ابعاد (in)	
105.75	W 16×57	ستون
244.975	W 16×45	تیر
	CUT IPE360	پیوند تسلیمی
	PL 9×4.5×0.375	ورق های برش گیر
	4PL 7.5×3.345×0.375	ورق های پیوستگی
	2PL 16.43×7.12×0.25	ورق های سخت کننده ی بالای ستون
	2PL 9.125×7×0.875	ورق کمانش گیر
	4PL 3×1.5×0.5	ورق جداگر
	12 Bolt 7/8	پیچ های ساق پیوند تسلیمی
	8 Bolt 7/8	پیچ های بال پیوند تسلیمی
	6 Bolt 7/8	پیچ های ورق برش گیر
	4 Bolt 5/8	پیچ های ورق کمانش گیر

AISC برای محاسبه ی تنش محتمل داده شده است استفاده گردیده است. از آنجاکه در این رابطه برای تبدیل تنش اسمی به تنش محتمل از ضریب هایی استفاده می شود (R_y و R_t) که از آزمایش های مختلف انجام شده در حالت های گوناگون به دست آمده است، برای این پژوهش استفاده از این رابطه مناسب ترین راهکار است و می توان جواب های حاصل از آن را نزدیک ترین جواب ها به حالت واقعی دانست. البته از آنجا که در استانداردهای مربوط به فولادهای بالا مقدار کرنش برابر با مقاومت نهائی داده نشده (در این استانداردها کرنش لحظه ی گسیختگی ارائه شده)، ناگزیر از مقاله ی پایه برای برداشت

جدول ۴-۱۰. ویژگی های مصالح بخش های به کاررفته در ساخت نمونه ی راستی آزمائی دوم

استاندارد مصالح	
A992 Gr-50	ستون
A992 Gr-50	تیر
A572 Gr-50	پیوند تسلیمی

A992 Gr-50	ورق‌های برش‌گیر
A992 Gr-50	ورق‌های پیوستگی
A992 Gr-50	ورق‌های سخت‌کننده‌ی بالای ستون
A992 Gr-50	ورق کمانش‌گیر
A992 Gr-50	ورق جداگر
A490	پیچ‌های ساق پیوند تسلیمی
A325	پیچ‌های بال پیوند تسلیمی
A325	پیچ‌های ورق برش‌گیر
A325	پیچ‌های ورق کمانش‌گیر

کرنش‌های این فولادها استفاده شده‌است. برای انتخاب مقاله‌های مناسب برای ویژگی‌های مصالح در این پژوهش تلاش گردیده تا از مقاله‌هایی استفاده شود که به صورت تخصصی و دقیق به این موضوع پرداخته‌اند.

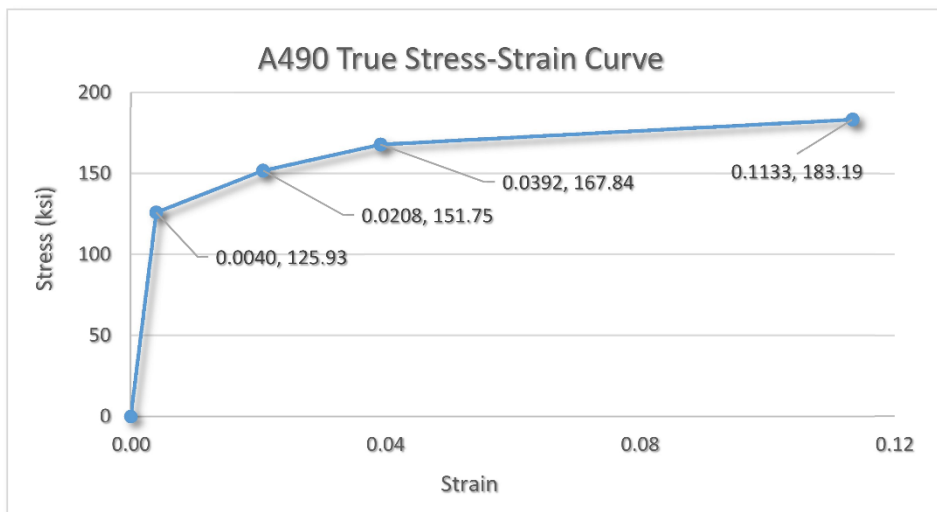
برای برداشت کرنش‌ها از مقاله‌ی اراسرآدنم^۱ [31] استفاده شده‌است؛ که در آن به ویژگی‌های این فولاد و حقیقی سازی نمودار تنش-کرنش آنها پرداخته است. البته در این مقاله فولاد 350W که همسان فولاد A572 رده‌ی ۵۰ در استاندارد فولاد کانادا است، استفاده شده که نتایج آن می‌تواند برای این گونه‌ی فولاد هم به کار برده شود. همچنین برای مصالح پیچ که در آئین نامه الزامات عمومی AISC برای تبدیل تنش اسمی به تنش محتمل در آنها رابطه‌ای آورده نشده‌است، همانند بخش ۴-۲-۲، از مقاله‌ی هدایت [27] استفاده شده‌است که به صورت اختصاصی به ویژگی‌های ۲ گونه‌ی فولاد A490 و A325 در ساخت نمونه‌ی عددی اتصال پیچی در نرم‌افزار آباکوس پرداخته‌است. نمودار تنش-کرنش حقیقی داده شده به نرم‌افزار آباکوس برای پیچ‌های رده‌ی A490 و A325 پیش‌تر در شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵ ارائه شد که همانند این نمودارها در شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ تکرار شده‌است با این تفاوت که در اینجا یکای تنش پوند بر اینچ مربع می‌باشد. نمودار تنش-کرنش حقیقی فولاد A992 رده‌ی ۵۰ و A572 رده‌ی ۵۰، به ترتیب در شکل‌های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ آورده شده‌است. همان گونه که در این

¹ P. Arasaratnam

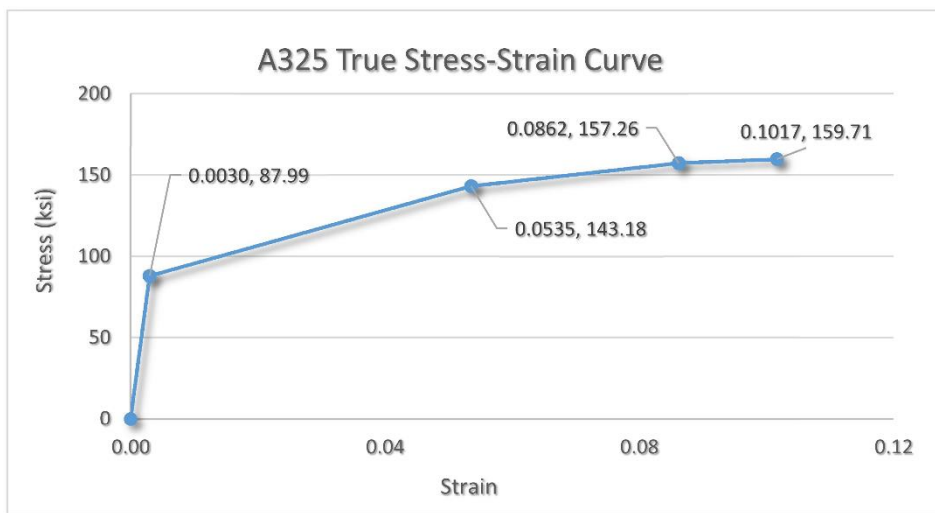
نمودارها دیده می شود کشیدگی تسلیم هم در نمودار در نظر گرفته شده است. مقدار کرنش نقطه ی کشیدگی تسلیم از داده های موجود در مقاله ی اراسر آدنم برداشت شده است.

روند پردازش در ۲ گام انجام شده است؛ که در گام نخست پیش تنیدگی پیچ ها و در گام دیگر بارگذاری چرخه ای اعمال شده است.

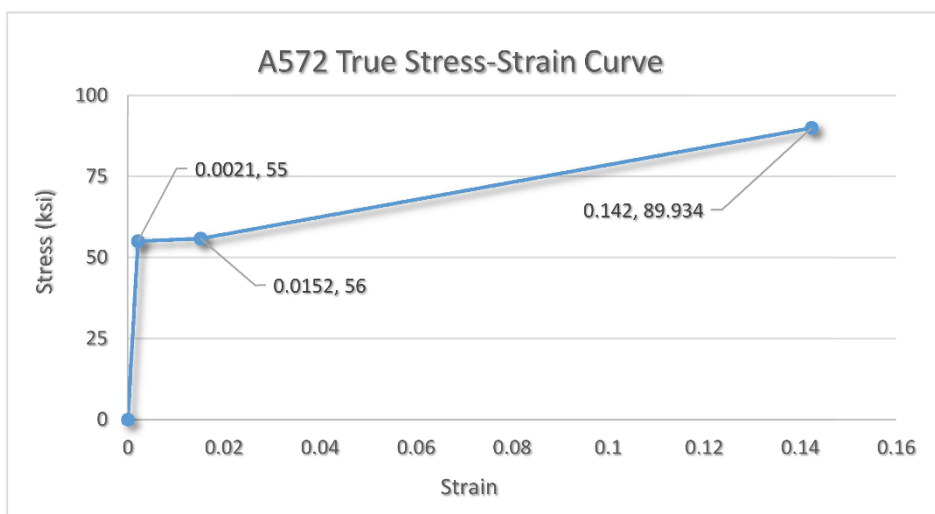
برای اتصال SST سطح های در تماس که بین آنها اصطکاک ایجاد می شود در آئین نامه ی اتصال های پیش پذیرفته ی آمریکا از رده ی A دسته بندی شده است. ضریب اصطکاک 0.33 برای تمام نمونه، برگرفته از آئین نامه ی بایستگی های عمومی AISI برای سطح ها رده ی A به نرم افزار داده شده است.



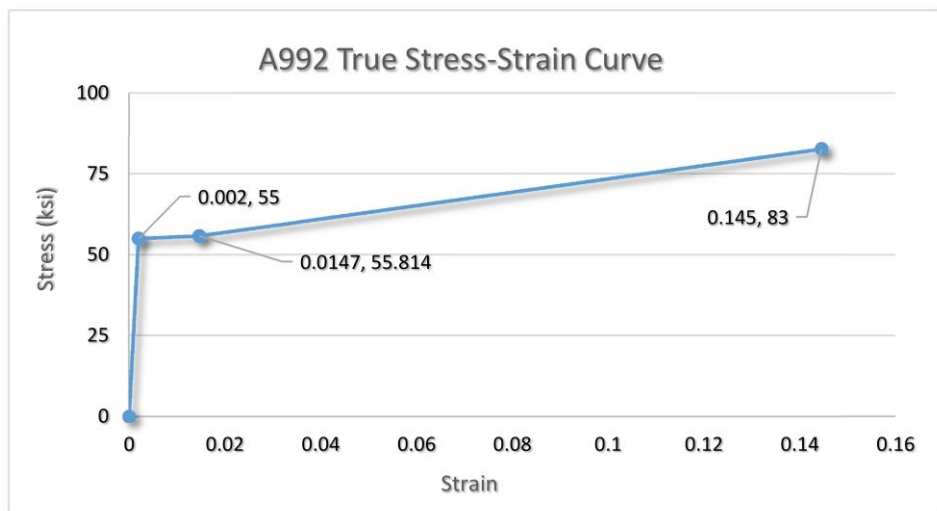
شکل ۴-۱۹. نمودار تنش-کرنش حقیقی پیچ رده ی A490



شکل ۴-۲۰. نمودار تنش-کرنش حقیقی پیچ رده‌ی A325



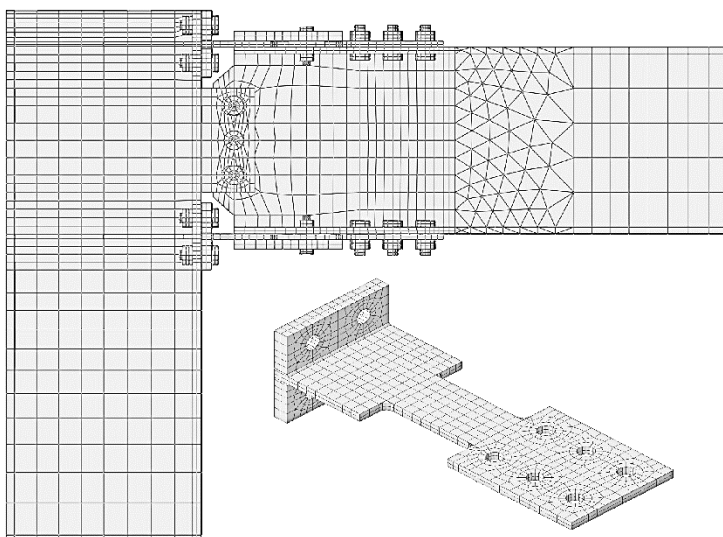
شکل ۴-۲۱. نمودار تنش-کرنش حقیقی فولاد A572



شکل ۴-۲۲. نمودار تنش- کرنش حقیقی فولاد A992

ویژگی‌های تکیه گاهی همانند آنچه از مقاله‌ی پریور برداشت شده‌است، برای ۲ تکیه گاه پائین ستون، مفصل غلتکی و برای بالای هر ۲ ستون، مهار پیرامونی قرار داده شده‌است. بارگذاری هم برپایه‌ی شیوه‌نامه‌ی بارگذاری آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا (شکل ۲-۱) به بالای ستون متصل به اتصال SST داده شده‌است. مقدار جابجائی بالای ستون از ضرب مقدار زاویه‌ی موجود در شیوه‌نامه‌ی بارگذاری در ارتفاع ستون به دست می‌آید.

در مش‌بندی نمونه‌ی راستی آزمائی تلاش گردیده تا از دست‌آوردهای آنالیز حساسیت مش انجام گرفته، بیشترین استفاده صورت گیرد. در مش‌بندی نمونه‌ی راستی آزمائی دوم در بیشتر بخش‌ها از مش با ساختار بندی Structural با المان‌های ۳ بعدی جامد، ۸ گره‌ای با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) و برای سُبک‌سازی مش در قسمت‌های به دور از تمرکز تنش در بخش‌هایی از مش، با ساختار Tet استفاده شده‌است. مش‌بندی بخش‌های مهم قاب ساخته شده را در شکل ۴-۲۳ می‌توان دید.

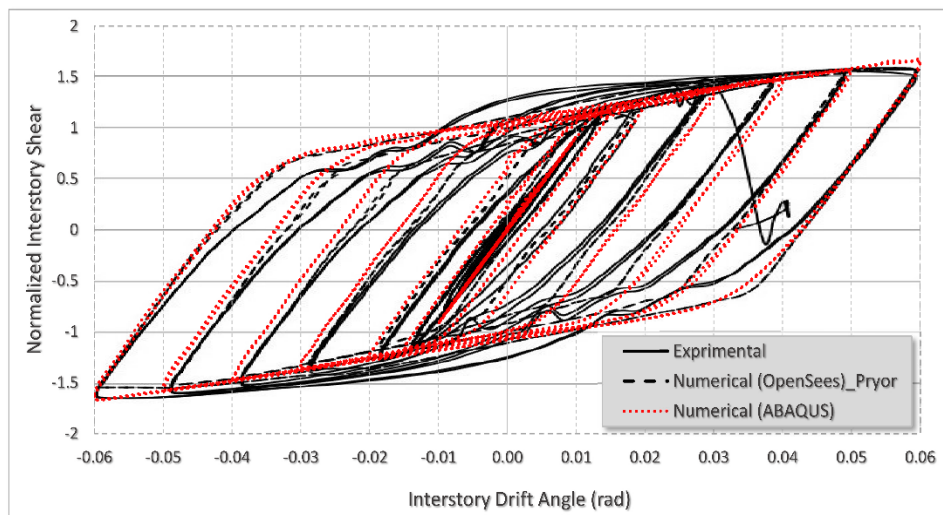


شکل ۴-۲۳. مش‌بندی بخشی از نمونه‌ی ساخته‌شده برای راستی‌آزمایی دوم

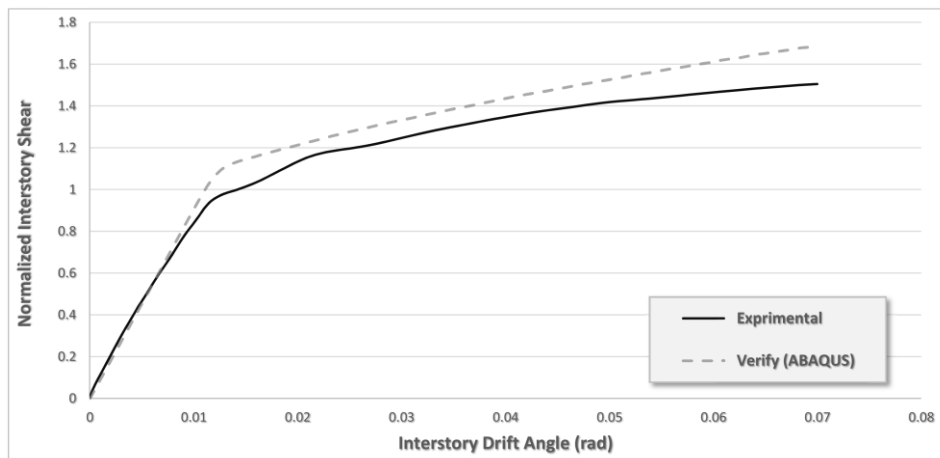
در شکل ۴-۲۴ و ۴-۲۵ مقایسه‌ی میان نمودارهای چرخه‌ای و بارافزون عددی با نمودارهای نمونه‌ی آزمایشگاهی ارائه شده‌است؛ در شکل ۴-۲۵ می‌توان نمودار عددی پریور که از نرم‌افزار آپن‌سیس^۱ به‌دست آمده را هم دید که بسیار به نمودار عددی این پژوهش که از نرم‌افزار آباکوس به‌دست آمده نزدیک است.

مقدار نرمال‌سازی برش پایه از نسبت برش پایه‌ی به‌دست آمده از نرم‌افزار به برش پایه‌ی تسلیم اسمی (همانند مقاله‌ی پریور) به‌دست آمده‌است. برای محاسبه‌ی لنگر تسلیم اتصال از رابطه‌ی ۵-۱۲.۹ آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی امریکا استفاده و در ادامه با استفاده از معادله‌های تعادل، مقدار برش پایه‌ی قاب در هنگام تسلیم اتصال محاسبه شده‌است. برای محاسبه‌ی لنگر تسلیم اسمی اتصال، مقاومت اسمی فولاد (50 kpi) به‌کاربرده شده‌است. مقدار برش پایه‌ی تسلیم اسمی با اندکی ساده‌سازی در معادله‌های تعادل برای این قاب ۱۴۵۳۳ پوندنیرو (lbf) به‌دست می‌آید.

^۱ OpenSees



شکل ۴-۲۴. نمودار چرخه‌ای راستی‌آزمایی دوم؛ مقایسه‌ی نمودار چرخه‌ای عددی با نمودار چرخه‌ای آزمایشگاهی پی‌یور



شکل ۴-۲۵. نمودار بارافزون راستی‌آزمایی دوم؛ مقایسه‌ی نمودار بارافزون عددی با نمودار بارافزون آزمایشگاهی پی‌یور

از آنجاکه در مقاله‌ی راستی‌آزمایی دوم نمودار بارافزون نمونه‌ی آزمایشگاهی وجود دارد برای مقایسه‌ی سختی کشسان نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی از نمودارهای بارافزون آزمایشگاهی و عددی استفاده شده‌است. در جدول ۴-۱۱ به مقایسه‌ی مقاومت نهایی دو نمونه‌ی عددی و آزمایشگاهی برای ۳ چرخه‌ی آخر پرداخته شده‌است.

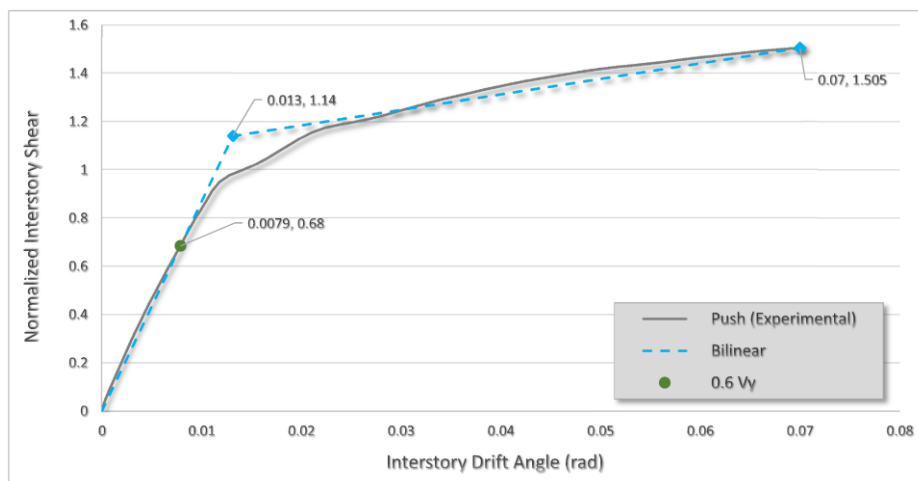
جدول ۴-۱۱. درصد نابرابری ۳ چرخه‌ی پایانی نمودار چرخه‌ای راستی آزمائی دوم

نمودار آزمایشگاهی	نمودار عددی	نابرابری
چرخه ۸	چرخه ۹	چرخه ۸
چرخه ۵	چرخه ۸	چرخه ۵
چرخه ۶	چرخه ۹	چرخه ۶
چرخه ۷	چرخه ۸	چرخه ۷
چرخه ۸	چرخه ۹	چرخه ۸
چرخه ۹	چرخه ۸	چرخه ۹
چرخه ۱۰	چرخه ۷	چرخه ۱۰
چرخه ۱۱	چرخه ۶	چرخه ۱۱
چرخه ۱۲	چرخه ۵	چرخه ۱۲
چرخه ۱۳	چرخه ۴	چرخه ۱۳
چرخه ۱۴	چرخه ۳	چرخه ۱۴
چرخه ۱۵	چرخه ۲	چرخه ۱۵
چرخه ۱۶	چرخه ۱	چرخه ۱۶
چرخه ۱۷	چرخه ۰	چرخه ۱۷
چرخه ۱۸	چرخه ۰	چرخه ۱۸
چرخه ۱۹	چرخه ۰	چرخه ۱۹
چرخه ۲۰	چرخه ۰	چرخه ۲۰
چرخه ۲۱	چرخه ۰	چرخه ۲۱
چرخه ۲۲	چرخه ۰	چرخه ۲۲
چرخه ۲۳	چرخه ۰	چرخه ۲۳
چرخه ۲۴	چرخه ۰	چرخه ۲۴
چرخه ۲۵	چرخه ۰	چرخه ۲۵
چرخه ۲۶	چرخه ۰	چرخه ۲۶
چرخه ۲۷	چرخه ۰	چرخه ۲۷
چرخه ۲۸	چرخه ۰	چرخه ۲۸
چرخه ۲۹	چرخه ۰	چرخه ۲۹
چرخه ۳۰	چرخه ۰	چرخه ۳۰
چرخه ۳۱	چرخه ۰	چرخه ۳۱
چرخه ۳۲	چرخه ۰	چرخه ۳۲
چرخه ۳۳	چرخه ۰	چرخه ۳۳
چرخه ۳۴	چرخه ۰	چرخه ۳۴
چرخه ۳۵	چرخه ۰	چرخه ۳۵
چرخه ۳۶	چرخه ۰	چرخه ۳۶
چرخه ۳۷	چرخه ۰	چرخه ۳۷
چرخه ۳۸	چرخه ۰	چرخه ۳۸
چرخه ۳۹	چرخه ۰	چرخه ۳۹
چرخه ۴۰	چرخه ۰	چرخه ۴۰
چرخه ۴۱	چرخه ۰	چرخه ۴۱
چرخه ۴۲	چرخه ۰	چرخه ۴۲
چرخه ۴۳	چرخه ۰	چرخه ۴۳
چرخه ۴۴	چرخه ۰	چرخه ۴۴
چرخه ۴۵	چرخه ۰	چرخه ۴۵
چرخه ۴۶	چرخه ۰	چرخه ۴۶
چرخه ۴۷	چرخه ۰	چرخه ۴۷
چرخه ۴۸	چرخه ۰	چرخه ۴۸
چرخه ۴۹	چرخه ۰	چرخه ۴۹
چرخه ۵۰	چرخه ۰	چرخه ۵۰
چرخه ۵۱	چرخه ۰	چرخه ۵۱
چرخه ۵۲	چرخه ۰	چرخه ۵۲
چرخه ۵۳	چرخه ۰	چرخه ۵۳
چرخه ۵۴	چرخه ۰	چرخه ۵۴
چرخه ۵۵	چرخه ۰	چرخه ۵۵
چرخه ۵۶	چرخه ۰	چرخه ۵۶
چرخه ۵۷	چرخه ۰	چرخه ۵۷
چرخه ۵۸	چرخه ۰	چرخه ۵۸
چرخه ۵۹	چرخه ۰	چرخه ۵۹
چرخه ۶۰	چرخه ۰	چرخه ۶۰
چرخه ۶۱	چرخه ۰	چرخه ۶۱
چرخه ۶۲	چرخه ۰	چرخه ۶۲
چرخه ۶۳	چرخه ۰	چرخه ۶۳
چرخه ۶۴	چرخه ۰	چرخه ۶۴
چرخه ۶۵	چرخه ۰	چرخه ۶۵
چرخه ۶۶	چرخه ۰	چرخه ۶۶
چرخه ۶۷	چرخه ۰	چرخه ۶۷
چرخه ۶۸	چرخه ۰	چرخه ۶۸
چرخه ۶۹	چرخه ۰	چرخه ۶۹
چرخه ۷۰	چرخه ۰	چرخه ۷۰
چرخه ۷۱	چرخه ۰	چرخه ۷۱
چرخه ۷۲	چرخه ۰	چرخه ۷۲
چرخه ۷۳	چرخه ۰	چرخه ۷۳
چرخه ۷۴	چرخه ۰	چرخه ۷۴
چرخه ۷۵	چرخه ۰	چرخه ۷۵
چرخه ۷۶	چرخه ۰	چرخه ۷۶
چرخه ۷۷	چرخه ۰	چرخه ۷۷
چرخه ۷۸	چرخه ۰	چرخه ۷۸
چرخه ۷۹	چرخه ۰	چرخه ۷۹
چرخه ۸۰	چرخه ۰	چرخه ۸۰
چرخه ۸۱	چرخه ۰	چرخه ۸۱
چرخه ۸۲	چرخه ۰	چرخه ۸۲
چرخه ۸۳	چرخه ۰	چرخه ۸۳
چرخه ۸۴	چرخه ۰	چرخه ۸۴
چرخه ۸۵	چرخه ۰	چرخه ۸۵
چرخه ۸۶	چرخه ۰	چرخه ۸۶
چرخه ۸۷	چرخه ۰	چرخه ۸۷
چرخه ۸۸	چرخه ۰	چرخه ۸۸
چرخه ۸۹	چرخه ۰	چرخه ۸۹
چرخه ۹۰	چرخه ۰	چرخه ۹۰
چرخه ۹۱	چرخه ۰	چرخه ۹۱
چرخه ۹۲	چرخه ۰	چرخه ۹۲
چرخه ۹۳	چرخه ۰	چرخه ۹۳
چرخه ۹۴	چرخه ۰	چرخه ۹۴
چرخه ۹۵	چرخه ۰	چرخه ۹۵
چرخه ۹۶	چرخه ۰	چرخه ۹۶
چرخه ۹۷	چرخه ۰	چرخه ۹۷
چرخه ۹۸	چرخه ۰	چرخه ۹۸
چرخه ۹۹	چرخه ۰	چرخه ۹۹
چرخه ۱۰۰	چرخه ۰	چرخه ۱۰۰

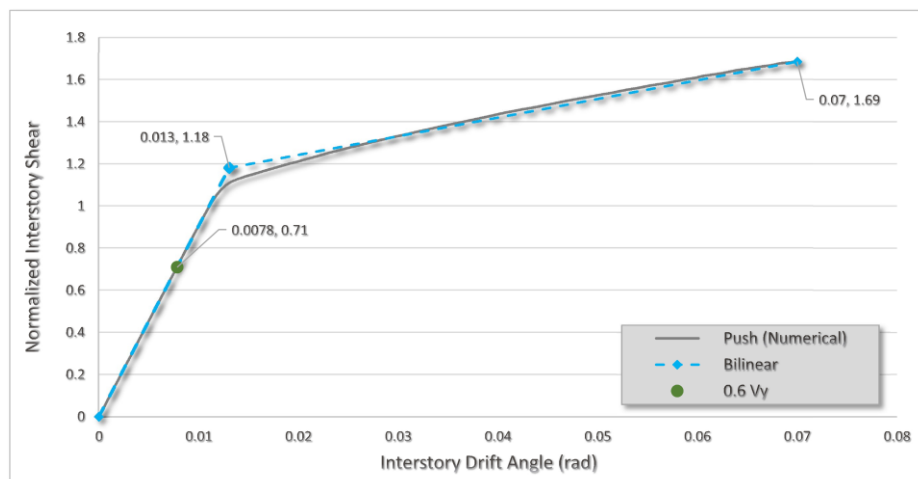
برای مقایسه‌ی سختی کشتان نمودارهای بار افزون آزمایشگاهی و عددی، ابتدا ۲ نمودار به روش گفته شده در آئین‌نامه‌ی FEMA-356 [32] دوخطی‌سازی شده و سپس سختی مؤثر، برش پایه‌ی نهائی و اتلاف انرژی نمودار دوخطی ۲ نمونه‌ی آزمایشگاهی و عددی که در شکل‌های ۴-۲۶ و ۴-۲۷ آورده شده است در جدول ۴-۱۲ با هم مقایسه شده‌است.

البته همان‌گونه که در نمودارهای بار افزون شکل ۴-۲۵ نمایان است، نابرابری میان نقطه‌های شروع تسلیم در دو نمودار بیشتر از اختلاف ۲/۹ درصدی میان نقطه‌های تسلیم نمودارهای دوخطی (در شکل ۴-۲۶ و ۴-۲۷) می‌باشد. اختلاف ایجاد شده در تشخیص نقطه‌ی تسلیم در نمودار عددی از این‌روست که نقطه‌ی شروع خمیدگی نمودار آزمایشگاهی نخست در پی لغزش‌های رخ داده قسمت‌های پیچ‌شده‌ی اتصال بوده و سپس در پله‌ی دوم ایجاد شده در نمودار، تسلیم در بخش‌های کاهش‌یافته‌ی پیوند تسلیمی اتفاق افتاده‌است؛ درحالی‌که این لغزش‌ها در نمونه‌ی عددی به دلیل شرایط ایده‌آل نمونه‌های عددی، پیش از نخستین تسلیم مؤثر اتصال (در بخش کاهش‌یافته‌ی پیوند تسلیمی) رخ نداده‌است.

در ادامه‌ی این بخش به بررسی عملکردی قاب راستی آزمائی شده نسبت به آنچه که پدید آورندگان این اتصال در پی آن بوده و این ویژگی‌ها را از برتری‌های این اتصالیان نموده‌اند، پرداخته و عملکرد نمونه‌ی عددی را در برابر آن ویژگی‌ها مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.



شکل ۴-۲۶. دوخطی سازی نمودار بارافزون نمونه‌ی آزمایشگاهی آقای پریور



شکل ۴-۲۷. دوخطی سازی نمودار بارافزون نمونه‌ی عددی راستی آزمائی دوم

جدول ۴-۱۲. درصد ناپرابری نمودارهای بار افزون راستی آزمائی دوم

نمودار آزمایشگاهی	نمودار عددی	ناپرابری
۸۶/۸۸	۹۰/۴۴	۴/۱٪
۱/۱۴	۱/۱۸	۲/۹٪
۱/۵۱	۱/۶۹	۱۲٪
۰/۰۸۲۷	۰/۰۸۹۴	۸٪

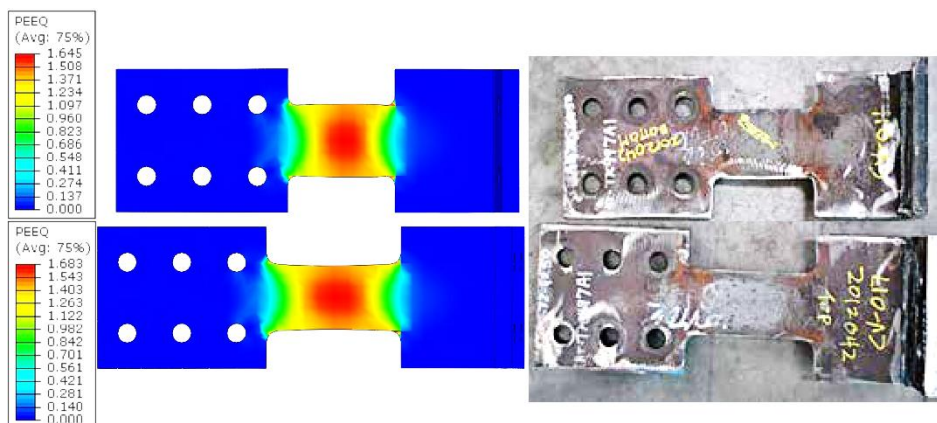
سختی مؤثر نمودار دوخطی

برش پایه‌ی تسلیم نمودار دوخطی (نرمال سازی شده)

برش پایه‌ی نهائی نمودار دوخطی (نرمال سازی شده)

اتلاف انرژی (نمودار نرمال سازی شده)

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های که پدیدآورندگان اتصال SST در پی آن بوده‌اند، طراحی اتصال به گونه‌ای است که بتوان مفصل پلاستیک و قسمت‌های تسلیم شونده‌ی ناشی از آن را در بخش‌های از پیش گزینش شده مهار نمود. در شکل ۴-۲۸ می‌توان کرنش تسلیم معادل را در چرخه‌ی دوم دریافت ۰/۰۶، در کنار تصویری از ۲ پیوند تسلیمی پس از آزمایش را دید؛ البته در نمونه‌ی عددی تسلیم‌های محلی در بخش‌های کوچک دیگری از اتصال از جمله در قسمت‌های پیچ‌شده‌ی بال تیر (ناشی از نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها) و جان تیر (ناشی از لهدگی موضعی سوراخ میانی جان تیر) دید که هیچ کدام از این تسلیم‌ها در عملکرد کلی اتصال تأثیر آنچنانی نداشته و تسلیم‌های مؤثر در عملکرد اتصال همانند پیش‌بینی به‌طور کامل در بخش کاهش‌یافته‌ی ساق پیوند تسلیمی رخ داده‌است. البته لهدگی پیرامون سوراخ مرکزی جان تیر، می‌تواند باعث جابجایی مرکز مفصل پلاستیک در اتصال SST شود. در نمونه‌ی عددی راستی آزمائی دوم این پژوهش، لهدگی گفته‌شده زیاد نبوده‌است.



شکل ۴-۲۸. بخش‌های تسلیم‌شده‌ی پیوند تسلیمی نمونه راستی آزمائی دوم در کنار پیوندهای تسلیمی پس از آزمایش

با به‌کارگیری روش‌هایی برای کنترل بخش‌های کاهش‌یافته‌ی ساق پیوند تسلیمی می‌توان به عملکرد بهتر برای این بخش‌ها دست پیدا کرد که در پی آن می‌توان عملکرد کلی اتصال را بهبود داد. از جمله‌ی این روش‌ها به نوآوری که طراحان در اتصال SST به‌کار بسته‌اند می‌توان اشاره نمود؛ در این اتصال برای کنترل بخش تسلیم شونده‌ی ساق پیوند تسلیمی، از ورق کمانش گیر بر روی این بخش استفاده شده است که در پی آن این قسمت در چرخه‌های بارگذاری بالا دچار کمانش نگردیده و

همان گونه که در نمودار شکل ۴-۲۴ می توان دید، این اتصال تا چرخه‌ی ۰/۰۶ رادیان که آخرین چرخه‌ی آزمایش و همچنین نمونه‌ی عددی بوده است هیچ گونه کاهش در باربری را تجربه نکرده و همواره مقاومت اتصال سیر بالارونده‌ای را به خود دیده است؛ رسیدن به این دست آورد مهم در این اتصال از این روست که بخش تسلیم شونده در اتصال به دلیل کنترل در برابر کماتش، در چرخه‌های بالا هم بدون کماتش به باربری خود ادامه داده و می تواند تا رسیدن به آستانه‌ی گسیختگی روند افزایش در باربری را تجربه کند.

همان گونه که می توان در شکل ۴-۲۴ مشاهده نمود اتصال SST در این قاب توانسته است به شکل شایسته‌ای بایستگی‌های آئین نامه‌ی اتصال‌های پیش پذیرفته‌ی آمریکا را برای قاب‌های ویژه و متوسط برآورده کند. برای اتصال‌های به کار برده شده در سازه‌های ویژه برگرفته از آئین نامه‌ی اتصال‌های پیش پذیرفته‌ی آمریکا، در زاویه‌ی دریفت ۰/۰۴ رادیان، میزان کاهش مقاومت نباید بیش از ۰/۸ لنگر تسلیم اتصال باشد؛ که در این قاب، اتصال SST حتا تا انتهای بارگذاری چرخه‌ای (دریفت ۰/۰۶ رادیان) هم دچار کاهش مقاومت نشده و به عنوان یک اتصال ویژه مورد پذیرش آئین نامه قرار گیرد. البته این اتصال برای پیش پذیرفته شدن، ۲ الزام تکمیلی را هم گذرانده است، که در فصل پیش رو به طور کامل در مورد آن توضیح داده خواهد شد.

در ادامه (فصل پیش رو) با به کارگیری نیم رخ‌های پُر کاربرد در ایران به جای نیم رخ‌های آمریکائی، بررسی می کنیم که آیا این اتصال با نیم رخ‌های گفته شده هم می تواند بایستگی‌های آئین نامه‌ی اتصال‌های پیش پذیرفته را گذرانده و گام نخست را برای استفاده در سازه‌های متوسط و ویژه (در ایران) را بگذراند. گام دوم پیش پذیرفتگی این اتصال برای کاربرد در ایران، در این پژوهش مورد نظر نمی باشد.

۵. بررسی رفتار اتصال SST با نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در ایران

۵-۱. پیش‌گفتار

همان‌گونه که در در بخش‌های آغازین فصل پیش به‌طور کامل توضیح داده‌شد، در این پژوهش ۵ نمونه‌ی پایه (نخست) داریم که از طراحی اتصال برای ۵ تیر IPE به‌دست آمده‌است. برابر با آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا در این اتصال فقط می‌توان از همین ۵ شماره‌ی تیر استفاده نمود. در جدول ۴-۱ ویژگی‌های مصالح و ویژگی‌های هندسی بخش‌های گوناگون به‌کاررفته در نمونه‌های ۵ گانه نخست آورده شده‌است.

در ادامه ابتدا به بنیادی‌ترین هدف این پژوهش که پذیرش یا واخوردگی اتصال SST برپایه‌ی پیش‌شرط‌های آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا پرداخته خواهدشد.

البته همان‌گونه که در بخش انتهائی فصل اول به‌طور کامل توضیح داده‌شد برای اتصال SST که نخستین و یگانه اتصال نیمه‌گیردار پیش‌پذیرفته‌است؛ در روند پذیرش برای اثبات عملکرد مناسب سازه با این اتصال ۲ بررسی دیگر برابر با FEMA P-795^۱ و FEMA P-350^۲ انجام شده‌است؛ که به‌علت گسترده بودن این بررسی‌ها و همچنین علّت‌هایی که در ادامه به آنها اشاره خواهدشد در این پژوهش به‌بررسی بخش اصلی و عمومی بایستگی پیش‌پذیرفتگی اتصال پرداخته‌می‌شود. بایستگی عمومی پیش‌پذیرفتگی اتصال می‌گوید که مقاومت خمشی اتصال نباید از ۸۰٪ مقاومت خمشی پلاستیک اسمی اتصال کمتر باشد. در ادامه‌ی این فصل به‌صورت فراگیر رفتار لرزه‌ای نمونه‌ها را بررسی می‌کنیم.

^۱ FEMA (2011), Quantification of Building Seismic Performance Factors: Component Equivalency Methodology, FEMA P-795

^۲ FEMA (2000b), Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA 350

در بخش پایانی این فصل به ۲ مقایسه پرداخته خواهد شد. این مقایسه‌ها میان اتصال SST با اتصال RBS و همچنین اتصال SST اصلاح شده می‌باشد.

۲-۵. بررسی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

در این بخش به صورت کامل به بررسی رفتار لرزه‌ای ۵ نمونه‌ی نخست پرداخته خواهد شد. در آغاز نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌ها از نظر بایستگی عمومی آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا برای پذیرش یا رد کردن اتصال برای کاربرد در سازه‌های ویژه و متوسط، ارزیابی خواهد شد؛ و در ادامه نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال، سپس نمودار چرخه‌ای لنگر-دوران چشمه‌ی اتصال ارائه می‌شود. در پایان به بررسی رفتار اتصال از نظر سختی و شکل‌پذیری برگرفته از نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال پرداخته خواهد شد.

۱-۲-۵. ارزیابی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست از دیدگاه بایستگی‌های پیش‌پذیرفتگی

همان‌گونه که در بخش ۲-۲-۳-۸ گفته شد برای پذیرش اتصال در آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا به صورت عمومی برای هر کدام از سازه‌های متوسط و ویژه، پیش‌شرط‌های گذاشته شده است که به صورت طبیعی این شرط‌ها برای سازه‌های ویژه سخت‌گیرانه‌تر است. در ادامه هر کدام از نمونه‌ها را از نظر پذیرش برای کاربرد در سازه‌های ویژه بررسی کرده و در صورت رد شدن، آن نمونه برای شرط‌های اتصال پیش‌پذیرفته برای کاربرد در سازه‌های متوسط مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

هر ۲ الزام معمول مربوط به سازه‌های ویژه را می‌توان این گونه خلاصه کرد که نقطه‌ی بیشینه لنگر در دررفت ۰/۰۴ رادیان باید بیش از ۸۰٪ لنگر تسلیم تیر مقاومت داشته باشد. البته در اتصال SST هم همانند پژوهش‌های انجام گرفته توسط پژوهش‌گران دیگر در مورد اتصال RBS که ظرفیت پلاستیک تیر را همان لنگر پلاستیک محل مفصل پلاستیک (مرکز بخش کاهش یافته) در نظر گرفته‌اند، در لنگر تسلیم این اتصال به جای تیر، هندسه‌ی اتصال (بخش کاهش یافته‌ی ساق پیوند تسلیمی) به کار گرفته شده است؛ این نکته در تفسیر آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا برای اتصال SST گفته

شده‌است. در همه‌ی پژوهش‌ها پیشین لنگر تسلیم را لنگر مورد انتظار پلاستیک که در ادامه رابطه‌ی آن آورده شده‌است، قلمداد کرده‌اند.

لنگر مورد انتظار پلاستیک اتصال SST لنگر تسلیم مورد انتظار جفت پیوندهای تسلیمی است که رابطه‌ی آن در آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا ارائه شده‌است. این رابطه‌ها در زیر آورده شده‌است.

$$P_{ye-link} = A_{y-link} R_y F_{y-link} \quad (۱-۵)$$

$$M_{ye-link} = P_{y-link} (d + t_{stem}) \quad (۲-۵)$$

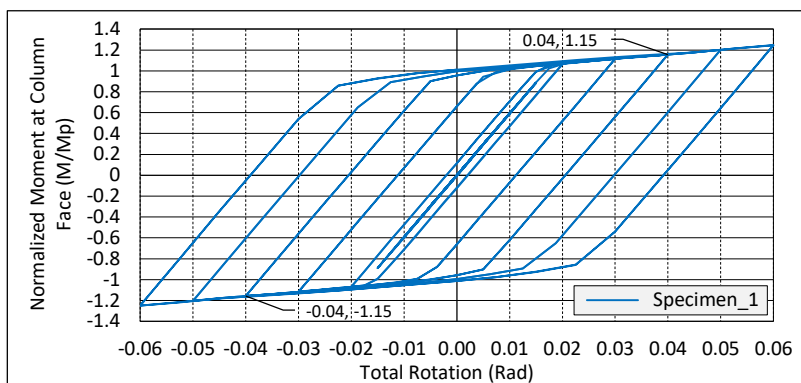
در ادامه نمودار لنگر-چرخش نمونه‌های ۵ گانه ارائه شده‌است؛ لنگر در این نمودارها، لنگر بر ستون می‌باشد که با لنگر مورد انتظار پلاستیک اتصال نرمال‌سازی شده‌است.

لنگر تسلیم مورد انتظار جفت پیوندهای تسلیمی برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست، برگفته از رابطه‌های ۱-۵ و ۲-۵، با توجه به داده‌های به‌کاررفته در محاسبه‌ی آن، در جدول ۱-۵ ارائه گردیده‌است.

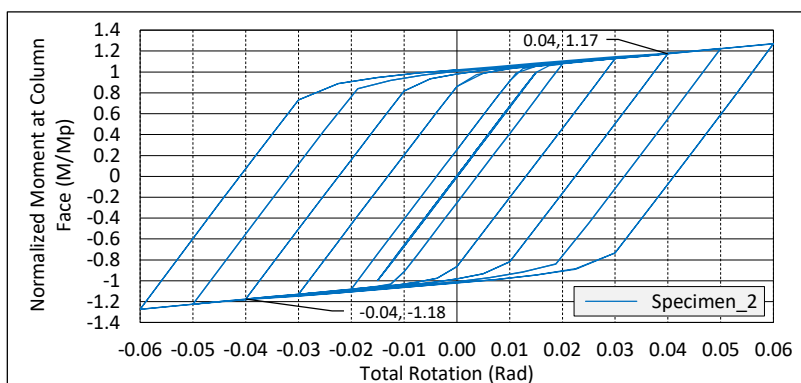
جدول ۱-۵. لنگر تسلیم مورد انتظار جفت پیوندهای تسلیمی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

	$A_{y-link} (m^2)$	R_y	$F_{y-link} (kN/m^2)$	$d (m)$	$t_{stem} (m)$	$M_{y-link} (kN.m)$
Specimen_1	7.410 E-04	1.1	353039.4	0.27	0.013	81.44
Specimen_2	7.410 E-04	1.1	353039.4	0.30	0.013	90.07
Specimen_3	7.410 E-04	1.1	353039.4	0.33	0.013	98.70
Specimen_4	9.490 E-04	1.1	353039.4	0.36	0.013	137.46
Specimen_5	1.118 E-03	1.1	353039.4	0.40	0.013	179.31

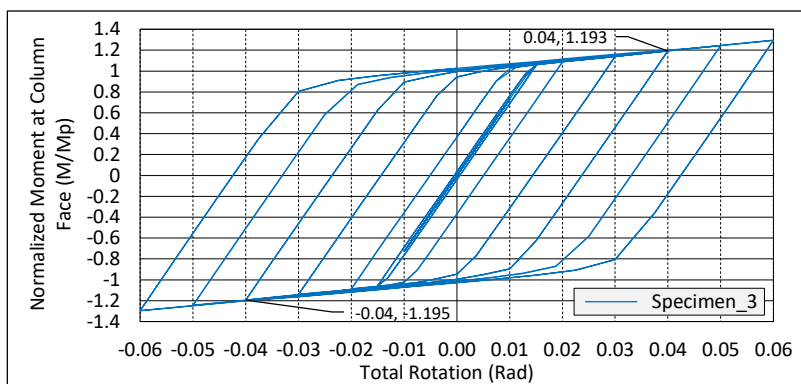
نمودار هیستریزیس نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست را می‌توان در شکل‌های ۱-۵ تا ۵-۵ مشاهده نمود.



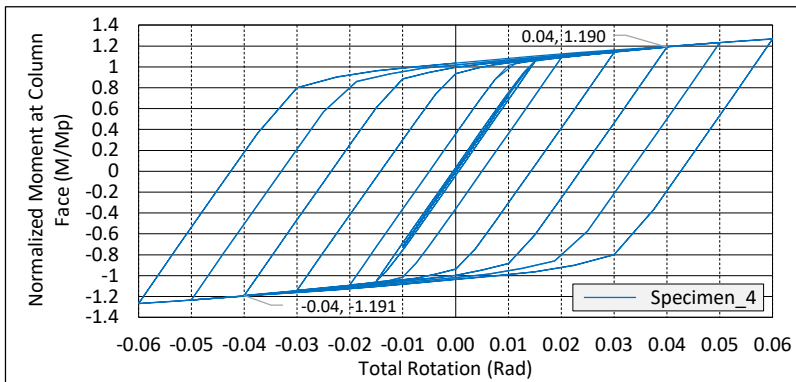
شکل ۵-۱. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کلی نمونه‌ی نخست



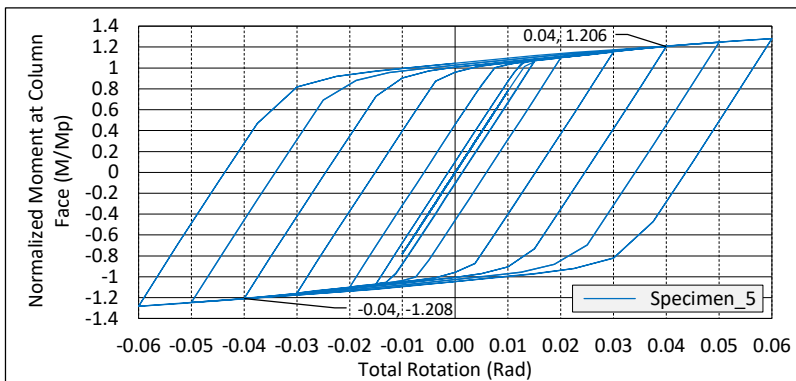
شکل ۵-۲. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کلی نمونه‌ی دوم



شکل ۵-۳. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کلی نمونه‌ی سوم



شکل ۴-۵. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کلی نمونه‌ی چهارم



شکل ۵-۵. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش کلی نمونه‌ی پنجم

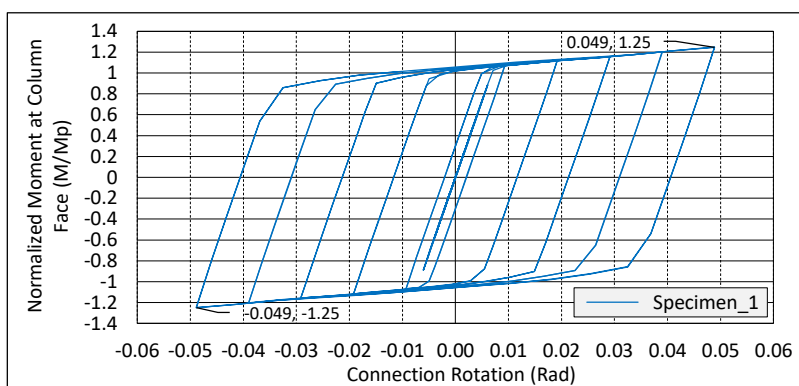
در ارزیابی نمودار شکل‌های ۵-۱ تا ۵-۵ روشن است که در هر ۲ بخش چرخش مثبت و منفی در دوران ۰/۰۴ رادیان، نمونه‌ها توانسته‌اند مقاومتی بسیار بیشتر از ۰/۸ لنگر پلاستیک را تحمل کند؛ این نشان می‌دهد که الزام عمومی آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا برای اتصال‌های مورد استفاده در سازه‌های ویژه، برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست برآورده شده است.

همان گونه که در آئین‌نامه‌ی بایستگی‌های لرزه‌ای AISC گفته شده است؛ الزام ۰/۸ لنگر پلاستیک برای آسودگی خاطر از این نکته است که، اتصال در چرخش ۰/۰۴ رادیان، بیش از حد وارد گستره‌ی کاهش مقاومت نشده باشد. این آئین‌نامه همچنین پذیرفته است که نمودار لنگر-چرخش اتصال‌های گوناگون می‌تواند ویژگی‌های متفاوت داشته باشد و در اینجا به روشنی می‌توان دید که یکی از

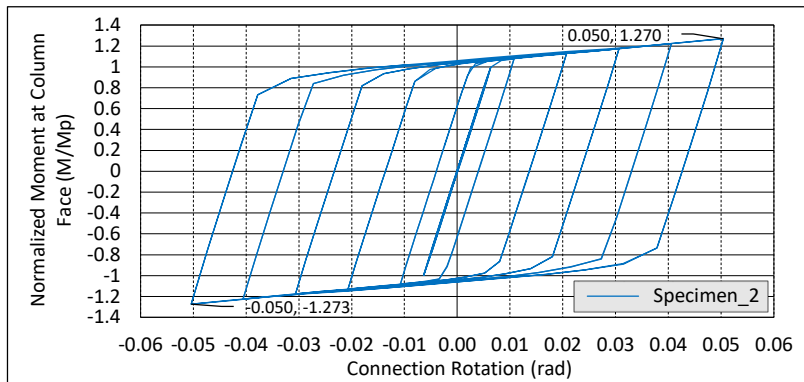
ویژگی‌های نمودار لنگر-چرخش نمونه‌های با اتصال SST این است که گستره‌ی کاهش مقاومت در چرخش‌هایی تا $0.06/0.04$ رادیان هم رخ نمی‌دهد. از آنجا که به‌طور معمول کاهش مقاومت در نمودارهای لنگر-چرخش در اتصال‌های فولادی در دوران‌های بالا مربوط به کماتش‌های گوناگون است (البته در مواردی این کاهش می‌تواند ناشی از موارد دیگر باشد، مواردی همچون لغزش‌های زیاد در بخش‌های پیچ‌شده و یا گسیختگی‌های محلی در بخش‌هایی که موجب فروپاشی کلی اتصال نمی‌شود)؛ و در اتصال SST بخش تسلیم‌شونده که مستعد کماتش است با سازوکار ویژه در برابر کماتش نگهداری می‌شود و دیگر بخش‌های اتصال هم دارای قابلیت کماتش ویژه‌ای نیستند؛ بنابراین عدم کاهش مقاومت که در هر ۵ نمونه‌ی بالا دیده‌می‌شود را می‌توان قابل پیش‌بینی دانست.

۲-۲-۵. رفتار لرزه‌ای اتصال SST در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

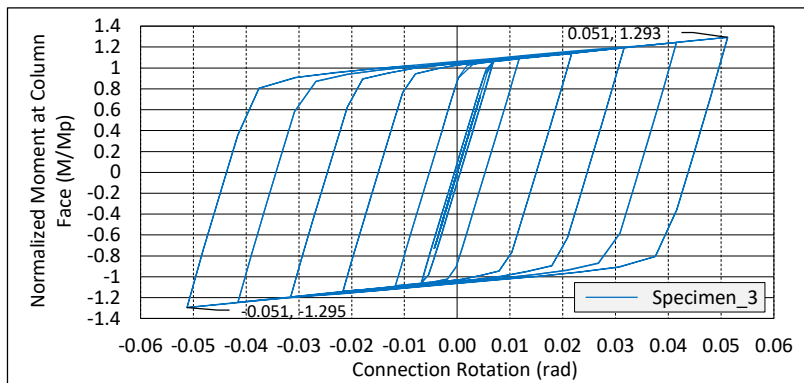
همان‌گونه که در بخش ۳-۹ به‌طور کامل توضیح داده‌شد، نمودارهای لنگر-چرخش ارائه‌شده در بخش پیشین ناشی از عملکرد کلی نمونه بوده و داوری بر روی رفتار اتصال، با این نمودارها به‌صورت فراگیر امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ از این رو همانند روش ارائه‌شده در بخش ۳-۹، نمودارهای لنگر-چرخش اتصال‌ها (حاصل از چرخش محدوده‌ی اتصال) برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست به‌دست آمده‌است که در شکل‌های ۵-۶ تا ۱۰-۵ ارائه شده‌است.



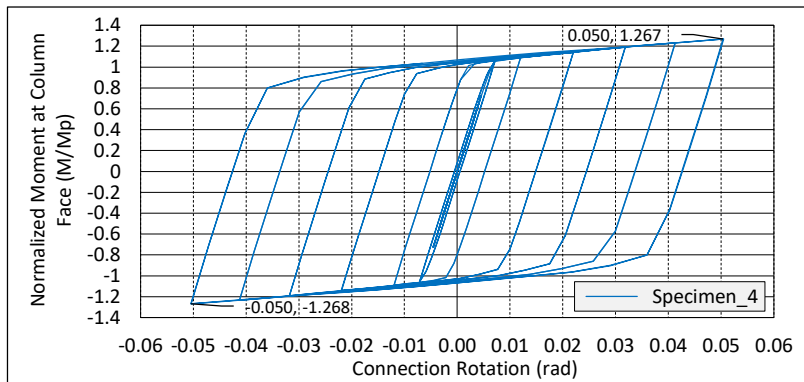
شکل ۵-۶. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی نخست



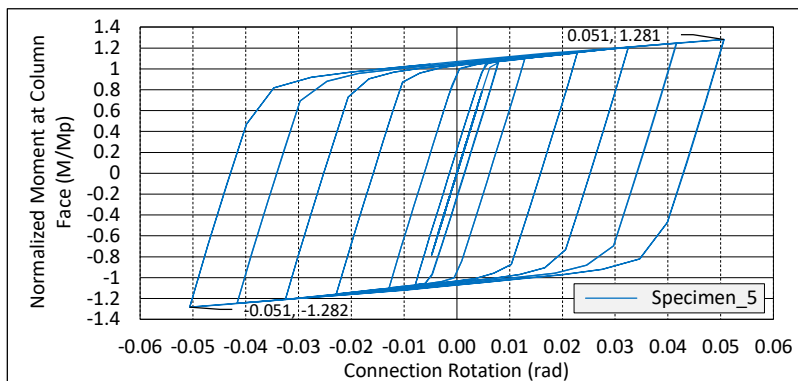
شکل ۵-۷. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی دوم



شکل ۵-۸. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی سوم



شکل ۵-۹. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی چهارم



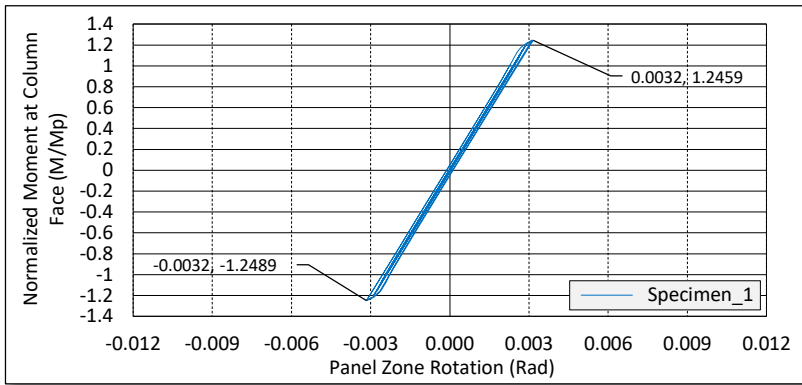
شکل ۵-۱۰. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی پنجم

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در نمودار شکل ۵-۶ بیشینه چرخش، $0/011$ رادیان کمتر از بیشینه چرخش نمودار شکل ۵-۱ بوده، این نشان می‌دهد که از $0/06$ رادیان، چرخش اعمال‌شده به نمونه، $0/049$ رادیان از آن به اتصال اعمال‌شده و بخش دیگر آن منجر به چرخش در طول تیر و ستون شده‌است.

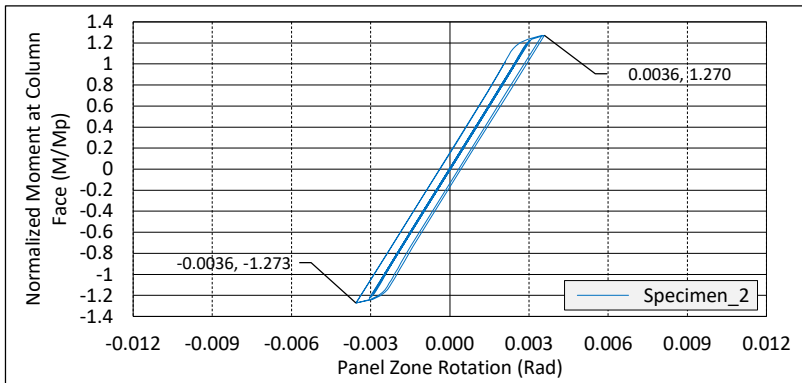
همانند مورد بیان شده برای شکل ۵-۶ می‌توان برای شکل ۴ دیگر هم همین نکته را گفت؛ در ۴ نمونه‌ی دیگر هم چیزی در حدود $0/01$ رادیان از چرخش در طول تیر و ستون رخ داده‌است.

۵-۲-۳. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

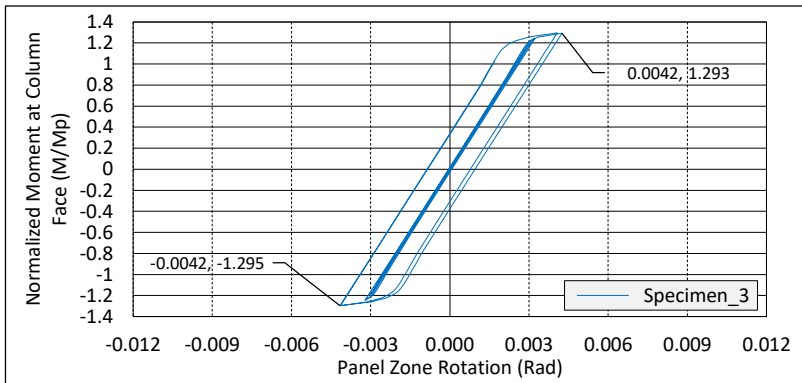
همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد یکی از بخش‌های مهم در رفتار لرزه‌ای اتصال و پیرو آن، رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی؛ چشمه‌ی اتصال است که چون در دل ستون قرار گرفته‌است رفتار مناسب آن برای پایداری سازه در دررفت‌های بالا مورد توجه‌است. از دیدگاه آرمانی، اتصالی رفتار لرزه‌ای خوبی دارد که چشمه‌ی اتصال در آن مقاومت تسلیم و سختی مناسبی داشته‌باشد. در ادامه نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست را از دیدگاه رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۵-۱۱ تا ۵-۱۵ نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نخست تا نمونه‌ی پنجم نشان داده شده‌است.



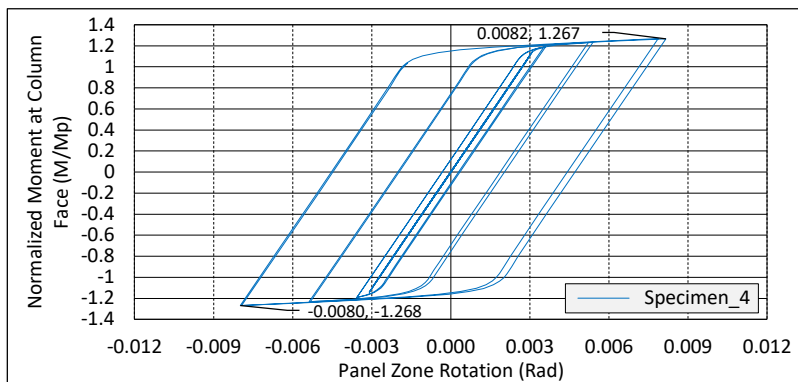
شکل ۵-۱۱. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نخست



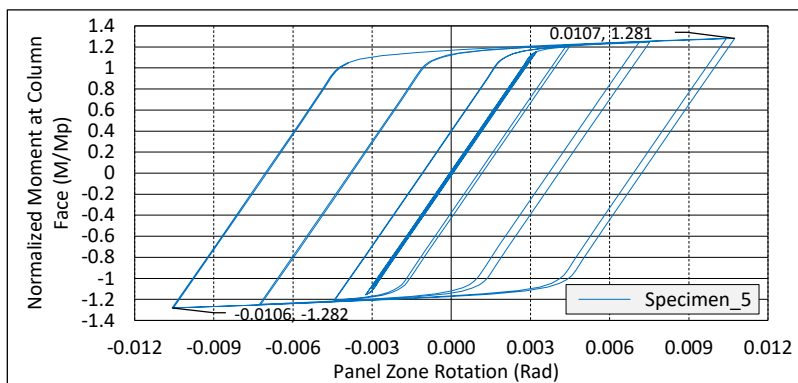
شکل ۵-۱۲. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی دوم



شکل ۵-۱۳. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی سوم



شکل ۵-۱۴. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی چهارم



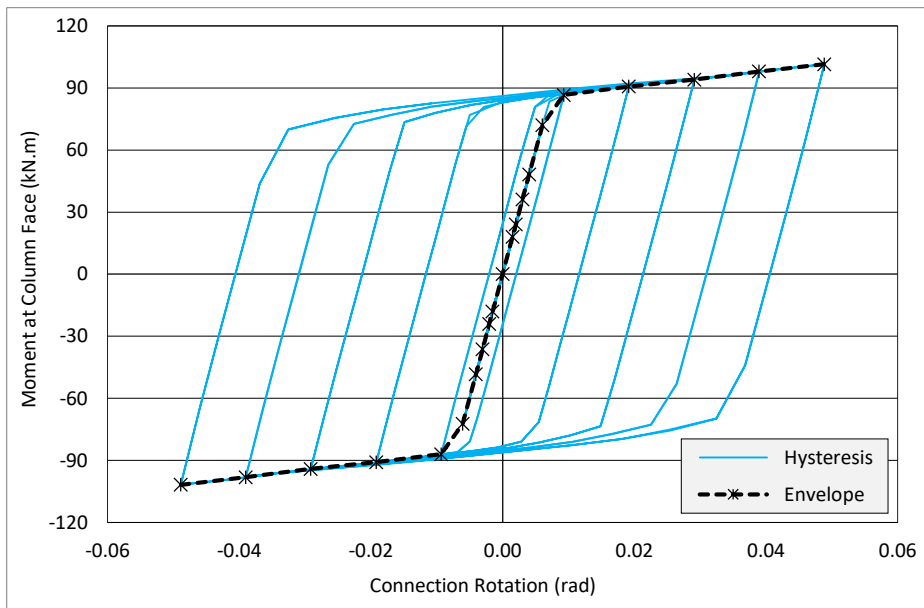
شکل ۵-۱۵. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی پنجم

همان گونه که در شکل‌های ۵-۱۱ تا ۵-۱۵ مشاهده می‌شود چشمه‌ی اتصال در نمونه‌ی نخست رفتار کمایش کشسانی داشته‌است و در نمونه‌ی دوم هم میزان تسلیم زیاد نبوده‌است. اما در نمونه‌های چهارم و پنجم چشمه‌ی اتصال تسلیم‌های قابل توجهی را تجربه می‌کند؛ البته در ۲ نمونه‌ی چهارم و پنجم هم شکل نمودار چرخه‌ی مناسب است.

۵-۲-۴. نمودار پوششی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

برای بررسی برخی از رفتارهای اتصال از جمله سختی و شکل‌پذیری اتصال نیاز است تا نمودار بارافزون و یا نمودار چرخه‌ای اتصال به نمودار دوخطی (که در بخش پسین توضیح داده شده‌است)

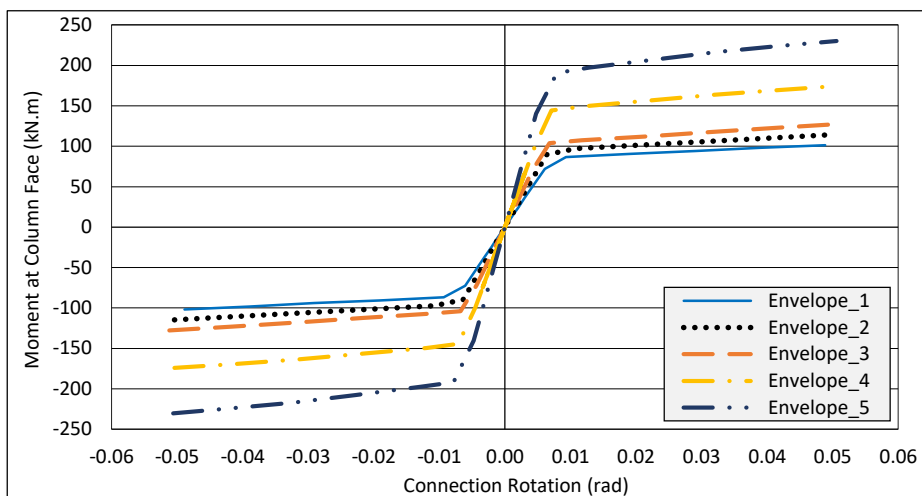
برگردانده‌شود. برای دوخطی‌سازی نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش، نخست باید نموداری همانند نمودار بارافزون را از آن به‌دست آورد؛ به این نمودار، نمودار پوشش^۱ گفته می‌شود. روش ساخت نمودار پوشش برگرفته از بخش 7.6.3 استاندارد ASCE/SEI 41-17 [33] می‌باشد (مشابه همین روش در دیگر استانداردها و گزارش‌ها نیز آمده‌است همانند بخش 14.2.4.4.6 استاندارد ASCE/SEI 7-16 [34] و در برخی از استانداردها و گزارش‌ها مانند بخش 2.2.2 گزارش FEMA P-795 [35] روش کمی متفاوت نسبت به روش مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده‌است که البته این روش‌ها برای کاربردهای خاص مورد استفاده در همان استاندارد ارائه شده‌است). برای نمایش شفاف روش ساخت نمودار پوشش، در شکل ۵-۱۶ نمودار پوشش همراه با نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌ی نخست آورده شده‌است.



شکل ۵-۱۶. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نخست

نمودار پوشش برای دیگر نمونه‌ها همانند نمونه‌ی نخست ساخته شده‌است؛ در شکل ۵-۱۷ می‌توان نمودارهای پوشش نمونه‌های ۵ گانه نخست را دید.

^۱ Envelope

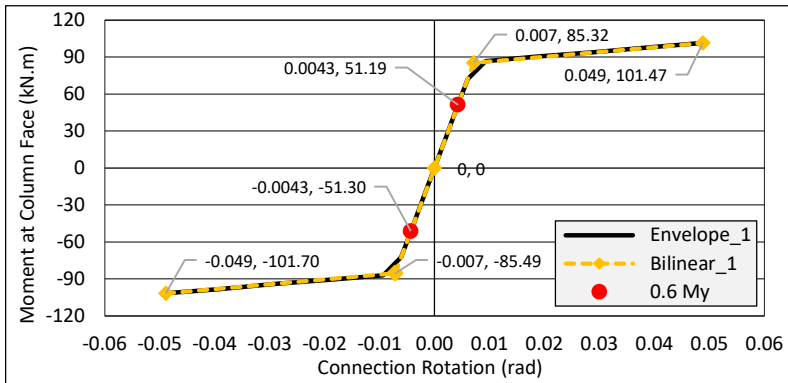


شکل ۵-۱۷. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

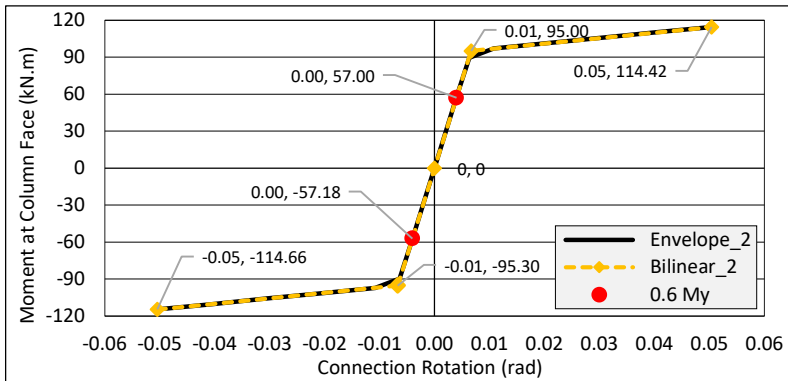
در شکل ۵-۱۷ ویژگی پُررنگ در مقایسه میان نمودارهای پوش ساختار همانند همه‌ی نمونه‌هاست که نشان می‌دهد همه‌ی نمونه‌ها تا چرخش 0.06 رادیان از رفتار استاندارد اتصال پیروی کرده‌اند و دچار هیچ گونه کماتش، ناپایداری و یا گسیختگی نشده‌اند.

۵-۲-۵. نمودار دوخطی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

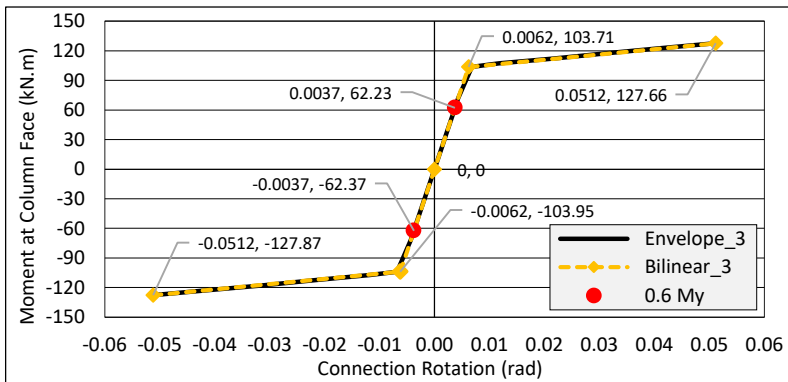
همان گونه که در بخش پیشین گفته شد برای ارزیابی‌های لرزه‌ای بیشتر بر روی رفتار اتصال نیاز است تا نمودار ایده‌آل‌سازی شده از رفتار اتصال در دست باشد. نمودار پوشش ساخته شده از نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال با روش برگرفته از بخش 3-3-2-4 گزارش FEMA 356 دوخطی‌سازی شده است. نمودار دوخطی ساخته شده برای اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست در شکل‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۲ آورده شده است. در این شکل‌ها نمودار دوخطی همراه با نمودار پوشش به کاررفته در ساخت نمودارهای دوخطی نشان داده شده است.



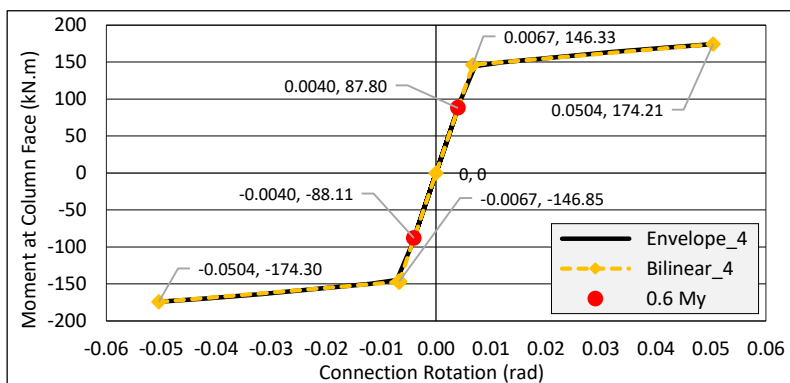
شکل ۵-۱۸. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی نخست



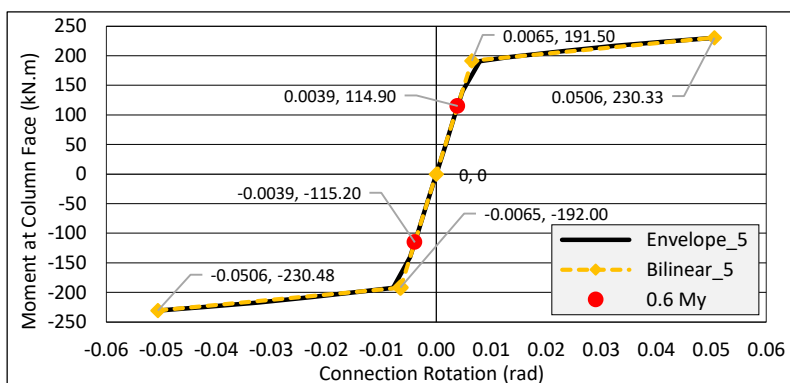
شکل ۵-۱۹. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی دوم



شکل ۵-۲۰. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی سوم



شکل ۵-۲۱. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی چهارم



شکل ۵-۲۲. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال نمونه‌ی پنجم

نکته‌ای که در مقایسه‌ی نمودار دوخطی با نمودار پوشش در هر ۵ شکل ۵-۱۸ تا ۵-۲۳ دیده می‌شود، رفتار کمابیش دوخطی در نمودار پوشش است که این باعث نزدیک شدن سختی نمودار پوشش به نمودار دوخطی خواهد شد.

۵-۲-۶. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

برای ارزیابی سختی اتصال در ۵ نمونه‌ی نخستین و رده‌بندی اتصال از دیدگاه آئین‌نامه‌ی الزامات عمومی AISC از ۳ گونه سختی استفاده شده است. سختی نمودار دوخطی به عنوان سختی مؤثر، سختی در آغاز نمودار پوشش به عنوان سختی آغازین (سختی اولیه) و سختی در نخستین تسلیم رخ داده در

نمودار پوشش به عنوان سختی تسلیم، در برآورد سختی اتصال به کار برده شده است. سختی اتصال برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست در جدول ۵-۲ آورده شده است.

در جدول ۵-۲ برای لنگر ماند^۱ از لنگر ماند بخش کاهش یافته‌ی پیوند تسلیمی استفاده شده است؛ همچنین مقدارهای سختی آغازین و مؤثر به ترتیب میانگین سختی‌های آغازین و مؤثر نمودارهای پوشش و دوخطی در بخش‌های مثبت و منفی (چرخش) در نمودارهای لنگر-چرخش است (برگرفته از راهنمائی‌های آئین‌نامه‌های بنام، هنگامی که نمودار در بخش مثبت و منفی چرخش نابرابری زیادی نداشته باشند می‌توان از میانگین داده‌های بخش مثبت و منفی برای برآوردها استفاده نمود، اما هنگامی که ویژگی‌های نمودار در بخش مثبت و منفی چرخش، بسیار ناهماهنگ و نابرابر باشند باید برآوردها را برای هر دو بخش مثبت و منفی چرخش به گونه‌ی جدا از هم انجام داد و نتایج را هم برای هر ۲ بخش ارائه داد).

در بخش ۳-۷ در مورد روش دسته‌بندی سختی اتصال در آئین‌نامه‌ی الزامات عمومی AISC به ۳ دسته‌ی (تمام) گیردار^۲، نیمه‌گیردار^۳ و ساده^۴ توضیحات کامل داده شده است. همان‌طور که در آنجا گفته شد آئین‌نامه‌ی AISC سختی اتصال را برپایه‌ی نقطه‌ی همسان با بارهای بهره‌برداری در نمودار لنگر-چرخش در نظر می‌گیرد. از آنجا که باتوجه به سطح بارگیر تیر می‌توان بارهای بهره‌برداری و برگرفته از آن لنگرهای بهره‌برداری گوناگونی را برای اتصال در نظر گرفت، و اینکه اتصال SST همانند دیگر اتصالات به گونه‌ای طراحی می‌شود که در گستره‌ی بارهای بهره‌برداری دارای رفتار کشسان باشد؛ می‌توان با اطمینان گفت که نقطه‌ی لنگر-چرخش همسان با بارهای بهره‌برداری در بین رو نقطه‌ی گزینش شده برای سختی آغازین و سختی تسلیم قرار دارد و سختی اتصال در بارهای بهره‌برداری در بین ۲ سختی آغازین و تسلیم خواهد بود.

در جدول ۵-۳ طول تیر برگرفته از نمونه‌های ساخته شده در نرم افزار است. در نمونه‌های ساخته شده فاصله‌ی انتها تا مرکز ستون ۴ متر است و از آنجا که انتهای تیر در نمونه‌های ساخته شده نقطه‌ی عطف

¹ Moment of inertia

² Fully Restrained (FR)

³ Partially Restrained (PR)

⁴ Simple

تیر در قاب است طول دهانه در قاب ۸ متر خواهد بود و برای برآورد طول تیر، فاصله‌ی محور مرکزی ستون تا بر ستون (نصف عمق نیم‌رخ ستون) از این مقدار کم می‌شود. همچنین ضریب برجهندگی برای همه‌ی نمونه‌ها ۲۰۰ گیگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۵-۲. دسته‌بندی سختی اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست با به کارگیری لنگر ماند جفت پیوند تسلیمی

	$I_{link} (cm^4)$	$L_{beam} (m)$	$K_i (kN.m)$	$K_y (kN.m)$	$K_e (kN.m)$	m_i	m_y	m_e	Category
Specimen_1	2969	7.82	11900	11896	11937	16.03	16.03	16.08	PR
Specimen_2	3632	7.82	14188	14079	14233	15.28	15.16	15.33	PR
Specimen_3	4361	7.82	16599	16663	16675	14.89	14.94	14.95	PR
Specimen_4	6604	7.80	21847	21894	21921	12.90	12.93	12.95	PR
Specimen_5	9538	7.78	29502	29520	29532	12.03	12.04	12.05	PR

در جدول ۵-۲ به‌طور کامل مشخص است که اتصال SST در هر ۵ نمونه‌ی نخست و با هر ۳ گونه‌ی سختی آغازین، تسلیم و مؤثر، از دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار m از نمونه‌ی نخست تا نمونه‌ی پنجم روند کاهشی داشته‌است که نشان می‌دهد اتصال SST برای نمونه‌های با ابعاد کوچک‌تر به یک اتصال گیردار بیشتر مشابه است.

همچنین مقدار سختی آغازین در همه‌ی نمونه‌ها از سختی تسلیم کمتر است که دلیل آن در بخش ۵-۳-۲ بیان شده‌است.

۵-۲-۷. ارزیابی مقاومتی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

در بخش ۳-۸ در مورد دسته‌بندی اتصال از دیدگاه مقاومتی به‌صورت گسترده گفته‌گو شده‌است. تنها نیاز است در این جا بیان شود که مقدار لنگر پلاستیک از ضرب تنش تسلیم اسمی در اساس مقطع پلاستیک بخش کاهش یافته‌ی جفت پیوندهای تسلیمی و ضریب R_y (نسبت تنش تسلیم مورد انتظار به کمینه تنش تسلیم مشخصه، چون نیم‌رخ‌های به کار رفته در این پژوهش در آئین‌نامه‌ی AISC وجود ندارد از مبحث دهم استفاده‌شده که مقدار ۱/۱۵ را ارائه می‌دهد) به‌دست می‌آید. مقدار تنش تسلیم اسمی ST37 برابر ۲۳۵/۳۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌است. به‌دلیلی که در بخش ۳-۸ گفته‌شد M_n در اتصال SST، لنگر همسان با چرخش ۰/۰۲ رادیان است.

در جدول ۳-۵ اتصال‌های نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست از دیدگاه مقاومتی برپایه‌ی معیارهای آئین‌نامه‌ی AISC مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. مقدار اساس مقطع پلاستیک بخش کاهش‌یافته‌ی جفت پیوندهای تسلیمی (Z_{Link}) به دلیل متفاوت بودن در نمونه‌ها، در جدول ۳-۵ آورده شده‌است.

جدول ۳-۵. دسته‌بندی مقاومتی اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

	$Z_{Link} (cm^3)$	$M_{p, Link} (kN.m)$	$M_n (kN.m)$	$M_n / M_{p, Link}$	Category
Specimen_1	209.70	81.44	86.81	1.07	Full-strength
Specimen_2	231.93	90.07	97.12	1.08	Full-strength
Specimen_3	254.16	98.70	107.34	1.09	Full-strength
Specimen_4	353.98	137.46	149.61	1.09	Full-strength
Specimen_5	461.73	179.31	197.33	1.10	Full-strength

هر ۵ نمونه‌ی نخست از دسته‌ی اتصال‌های تمام مقاوم است.

به دلیل این که برابر با آئین‌نامه‌ی AISC برای M_n از لنگر در چرخش 0.02 رادیان استفاده شده‌است در همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست اتصال با اندک اختلاف توانسته‌است از آستانه‌ی اتصال تمام مقام بگذرد. البته به طور کامل روشن است که ظرفیت نهائی مقاومت برای این اتصال بسیار بیشتر از مقدارهای M_n در جدول بالاست.

۵-۲-۸. ارزیابی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

درباره‌ی مفاهیم شکل‌پذیری در بخش ۳-۹ به شکل کامل بحث شد. در این بخش شکل‌پذیری ۵ نمونه‌ی نخست، برپایه‌ی رابطه‌ی ۳-۵ ارزیابی می‌شود. از آنجا که در نمودار پوشش همه‌ی نمونه‌ها نمودار همواره افزایشی بوده‌است و نمی‌توان کرنش نقطه‌ی برابر با 0.08 مقاومت نهائی را به عنوان کرنش نهائی برگزید، برای گزینش نقطه‌ی کرنش نهائی ۲ ویژگی باید بررسی شود؛ نخست کرنش نقطه‌ی جابجائی هدف و دوم کرنش نقطه‌ی گسیختگی نمونه. اگر گسیختگی پیش از جابجائی هدف رخ دهد، کرنش نمودار در این نقطه، کرنش نهائی برگزیده می‌شود، و گرنه کرنش نهائی همان کرنش جابجائی هدف است و می‌توان در ساخت نمودار دوخطی از آن استفاده نمود. در اینجا محور افقی

نمودارهای دوخطی مورد بررسی به جای کرنش، دارای چرخش است که همه‌ی ویژگی‌های گفته شده در بالا برای آن هم می‌تواند بیان شود و در رابطه‌ی ۳-۵ به جای کرنش می‌توان چرخش به کار برد.

از آنجا که چرخش نهائی نمودارهای دوخطی برپایه‌ی تغییر مکان هدف نبوده و در هیچ‌یک از نمونه‌ها گسیختگی (و یا توقف پردازش) تا دوران ۰/۰۶ رادیان رخ نداده است، در حقیقت نمی‌توان برگرفته از روش‌های استاندارد، شکل‌پذیری اتصال را برای نمونه‌ها گزارش کرد.

به هر روی برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست، شکل‌پذیری به دست آمده برای نمودارهای دوخطی آنها که در بخش ۵-۲-۵ نمایش داده شده است، در جدول ۵-۶ گزارش شده است. در این جدول برگرفته از رابطه‌ی ۳-۵، شکل‌پذیری از θ_u بخش بر θ_y برآورد شده است.

جدول ۵-۴. شکل‌پذیری نمودار دوخطی اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

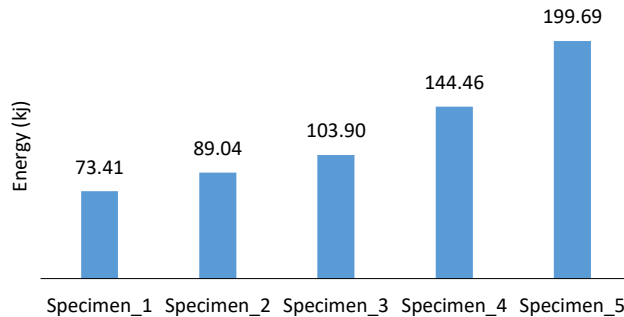
	$\theta_y (rad)$	$\theta_u (rad)$	μ
Specimen_1	0.0072	0.0489	6.80
Specimen_2	0.0067	0.0504	7.52
Specimen_3	0.0062	0.0512	8.26
Specimen_4	0.0067	0.0504	7.52
Specimen_5	0.0065	0.0506	7.78

همان گونه که گفته شد شکل‌پذیری‌های ارائه شده در جدول ۵-۴ نمی‌تواند پایه‌ی هیچ گونه داوری درباره‌ی مقایسه میان نمونه‌ها باشد. به عنوان مثال نمی‌توان با اطمینان گفت که چون مقدار گزارش شده برای شکل‌پذیری نمونه‌ی پنجم از نمونه‌ی دوم بیشتر است؛ شکل‌پذیری واقعی نمونه‌ی پنجم نسبت به نمونه‌ی دوم بیشتر است. زیرا احتمال دارد اگر مقدار جابجائی‌های نمونه‌ها بیشتر در نظر گرفته می‌شد، نمونه‌ی پنجم در جابجائی کمتر گسیخته می‌شد و در شکل‌پذیری جدید مقدار شکل‌پذیری نمونه‌ی دوم بیشتر از نمونه‌ی نخست به دست می‌آمد.

گرچه نمی‌توان به شکل عددی درباره‌ی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست، نظر داد؛ اما با بررسی نمودارهای چرخه‌ای لنگر چرخش اتصال در این نمونه‌ها می‌توان با آسودگی گفت که اتصال SST یکی از شکل‌پذیرترین اتصال‌های موجود است.

۵-۲-۹. ارزیابی اتلاف انرژی در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

در نمودار شکل ۵-۲۳ اتلاف انرژی در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست به‌نمایش درآمده‌است.



شکل ۵-۲۳. اتلاف انرژی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد اتلاف انرژی در نمونه‌های با پیوندهای تسلیمی بزرگ‌تر و نمونه‌های با فاصله‌ی بیشتر میان جفت پیوندهای تسلیمی که ظرفیت خمشی بالاتری از خود نشان می‌دهند؛ اتلاف انرژی بیشتری هم داشته‌اند.

۵-۳. بررسی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم

همان‌گونه که در بخش ۵-۲ دیده‌شد اتصال SST یک اتصال نیمه‌گیردار تمام‌مقاوم است. در پی به‌دست‌آمدن نتایج ارائه‌شده در بخش ۵-۲، جستجو برای یافتن روشی برای بالا بردن سختی اتصال انجام گردید؛ البته روش‌های مورد بررسی به‌گونه‌ای انتخاب گردید تا به ماهیت اتصال خدشه وارد نشود، ازجمله نکته‌هایی که در روش‌های مورد بررسی در نظر گرفته‌شد انتقال لنگر از تیر به ستون توسط جفت پیوندهای تسلیمی بوده‌است؛ به‌گونه‌ای که تلاش شد تا برای افزایش سختی اتصال، روش‌هایی به‌کار گرفته نشود که باعث انتقال لنگر از تیر به ستون، در اعضایی به‌جز پیوند تسلیمی شود. از این‌رو پیش‌تنیده کردن پیچ‌های ورق برشی از گردونه‌ی روش‌های افزایش سختی اتصال بیرون گذاشته‌شد. همچنین با بررسی لغزش‌های رخ‌داده میان ساق پیوند تسلیمی و بال تیر، مشخص شد که لغزش چشمگیری بین این ۲ سطح رخ‌نداده و میزان پیش‌تنیدگی کمینه و ضریب اصطکاک 0.33 برای پیوند مناسب میان این ۲ سطح کافی بوده‌است؛ البته لغزش‌های ناچیزی میان این ۲ سطح در چرخش‌های

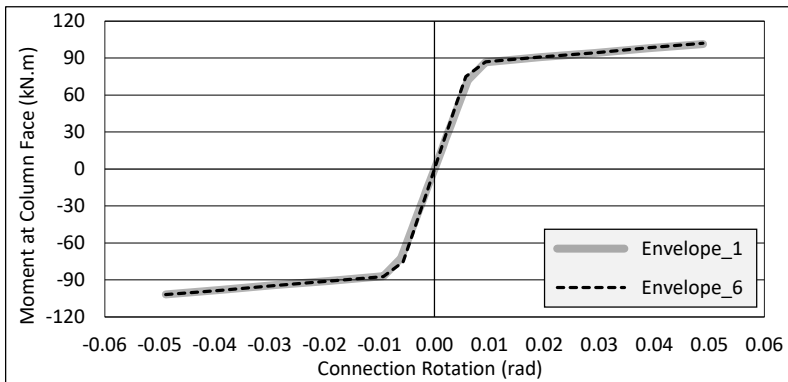
بالا رخ داده که چون در بخش پس از تسلیم نمودار لنگر-چرخش قرارداد، در سختی اتصال مؤثر نیست، به همین خاطر از پیش تنیدگی با تنش‌های بیشتر برای پیچ‌های ساق پیوند تسلیمی به عنوان روشی برای افزایش سختی چشم‌پوشی گردید؛ از آنجا که لغزش‌های رخ داده میان این ۲ سطح بسیار ناچیز است پیش تنیدگی با تنش‌های بالاتر برای این پیچ‌ها در دیگر رفتارهای اتصال هم تفاوت چندانی ایجاد نمی‌کند.

یکی از روش‌هایی که برای افزایش سختی برای اتصال به ذهن می‌رسید، پیش‌تنیده کردن پیچ‌های بال پیوند تسلیمی بود. برای پیدا کردن بیشینه اثر این کار در سختی اتصال، از پیش تنیدگی بیشینه (برابر با مقاومت کششی اسمی پیچ) برای پیچ‌های بال پیوند تسلیمی استفاده شده است.

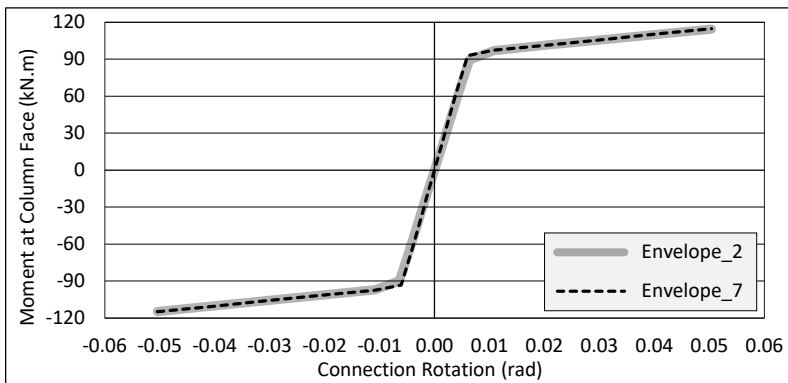
برای این کار از نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست، ۵ نمونه‌ی همانند در همه‌ی ویژگی‌ها ساخته شد که تنها نابرابری آنها، پیش‌تنیده کردن پیچ‌های بال پیوند تسلیمی بود. به این شکل که از نمونه‌ی نخست، نمونه‌ای همانند، با نشان «نمونه‌ی ششم» ساخته شد و به همین ترتیب تا نمونه‌ی پنجم که از آن نمونه‌ای همانند با نشان «نمونه‌ی دهم» ساخته شد.

۵-۳-۱. ارزیابی نمودار پوشش لنگر-چرخش اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم

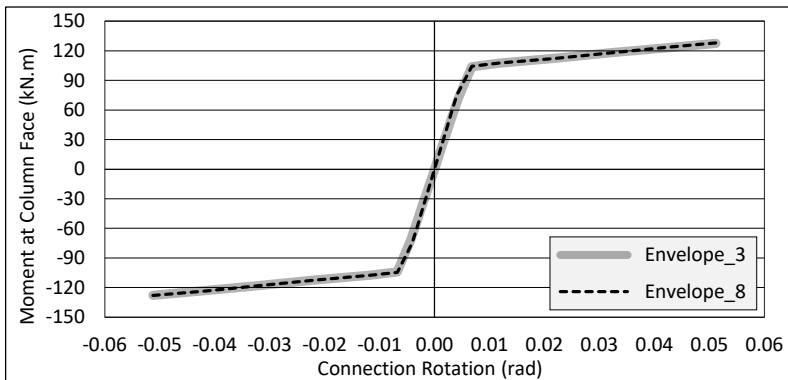
در شکل‌های ۵-۲۴ تا ۵-۲۸ نمودارهای پوشش برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم با نمودارهای ۵ گانه‌ی نخست مقایسه شده است. در مورد این شکل‌ها برای شفافیت بیشتر بیان دوباره‌ی نکته ضروری است. در هر شکل ۲ نمونه‌ی مورد مقایسه، تنها در پیش‌تنیدگی پیچ‌های بال پیوند تسلیمی تفاوت دارند. و نکته‌ی دوم این که نمودارهای پوشش در این تصویرها از نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال (همانند بخش ۵-۲-۲) به دست آمده است، که در آن تنها چرخش محدوده‌ی اتصال در نظر گرفته شده است. به عبارتی با ارائه‌ی نمودارهای پوشش برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم دیگر نیازی به گزارش نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش کلی نمونه و نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمی‌باشد و تا اندازه‌ی زیادی می‌توان داده‌های مهم این نمودارها را از این نمودار به دست آورد.



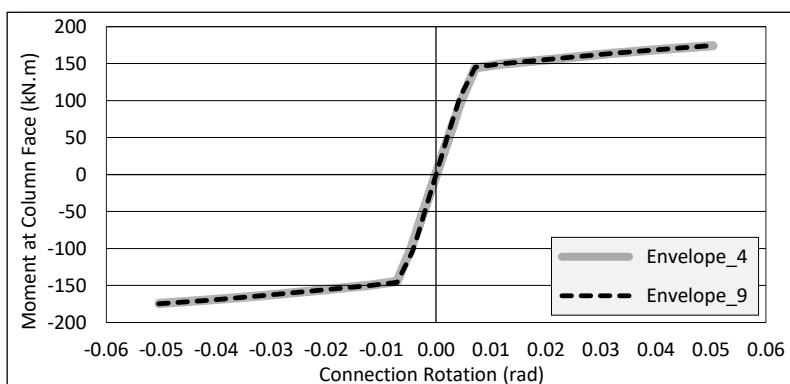
شکل ۵-۲۴. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های نخست و ششم



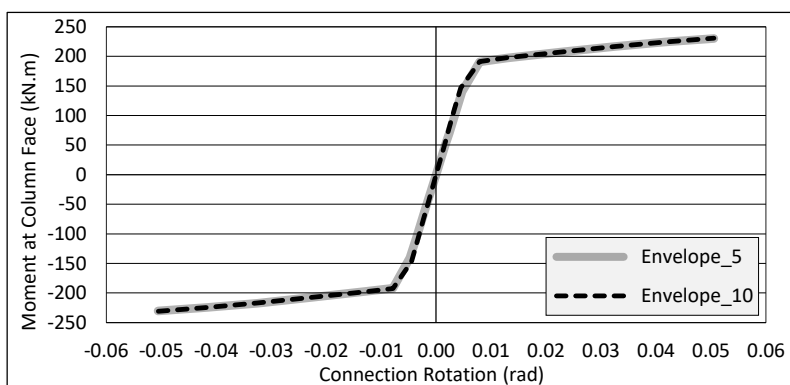
شکل ۵-۲۵. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های دوم و هفتم



شکل ۵-۲۶. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های سوم و هشتم



شکل ۵-۲۷. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های چهارم و نهم



شکل ۵-۲۸. نمودارهای پوشش اتصال نمونه‌های پنجم و دهم

۵-۳-۲. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های ۵-گانه‌ی دوم

در جدول ۵-۵ درصد افزایش سختی اتصال و مقدار m برای نمونه‌های ۵-گانه‌ی دوم (از نمونه‌ی ۶ تا نمونه‌ی ۱۰) نسبت به نمونه‌های ۵-گانه‌ی نخست (از نمونه‌ی ۱ تا نمونه‌ی ۵) در اثر پیش‌تندگی پیچ‌های بال پیوند تسلیمی آورده شده‌است.

درصد نابرابری ارائه شده در جدول ۵-۵، از قیاس میان مقدارهای داده‌شده در جدول است. همچنین درصد‌های نابرابری به گونه‌ای گردسازی شده تا در آنها رقم اعشاری حذف شود. مقدار درصد نابرابری سختی هم به این دلیل که مقدارهای طول تیر، لنگر ماند جفت پیوند تسلیمی و مدول الاستیسیته

در نمونه‌های هم‌خانواده یکسان است، برابر با درصد نابرابری m می‌باشد؛ البته به‌خاطر گرد کردن عددهای ارائه‌شده در جدول در برخی از گزینه‌ها امکان خطای ناچیز وجود دارد.

جدول ۵-۵. درصد نابرابری سختی اتصال و مقدار m نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

	K_i (kN.m)	m_i		K_y (kN.m)	M_y		K_e (kN.m)	m_e		Category
Specimen_1	11900	15.67		11896	15.67		11937	15.72		
Specimen_6	13336	17.56	+12%	13165	17.34	+11%	13330	17.56	+12%	PR
Specimen_2	14188	15.28		14079	15.16		14233	15.33		
Specimen_7	15806	17.02	+11%	15418	17.02	+12%	15805	17.02	+11%	PR
Specimen_3	16599	14.89		16663	14.94		16675	14.95		
Specimen_8	18507	16.60	+11%	18449	16.54	+11%	18469	16.56	+11%	PR
Specimen_4	21847	12.90		21894	12.93		21921	12.95		
Specimen_9	24466	14.45	+12%	24211	14.30	+11%	24314	14.36	+11%	PR
Specimen_5	29502	12.03		29520	12.04		29532	12.05		
Specimen_10	33007	13.46	+12%	32640	13.31	+11%	32816	13.39	+11%	PR

همان‌گونه‌ی که در جدول ۵-۵ مشخص است همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم هم در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار هستند. همچنین درصد افزایش برای سختی‌های گوناگون کمایش یکسان است؛ هرچند با نگاه ریزینانه می‌توان گفت که درصد افزایش در سختی آغازین اندکی بیشتر است و هنگامی این تفاوت اندک مهم‌تر می‌شود که دیده‌می‌شود که در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست، سختی آغازین برخلاف انتظار در بیشتر موارد از دوسختی دیگر کمتر است (البته به میزان بسیار ناچیز)؛ اما در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم این مورد مشاهد نمی‌شود. چرائی این پدیده پس از بررسی دقیق نتایج گرافیکی نمونه‌ها این گونه حاصل شد که، در نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست در گام نخست پردازش پیش‌تندگی پیچ‌های ساق انجام می‌شود و در گام دوم پردازش، نمودار لنگر-چرخش برآورد می‌شود؛ به عبارتی پیش از آغاز نمودار چرخه‌ای مقداری ناچیز تنش‌های کششی میان پیوند تسلیمی و ستون ایجاد می‌شود که در آغاز پردازش باعث کاهش ناچیز در سختی آغازین می‌شود که این مورد برای نمونه‌های ۵ گانه دوم وجود ندارد.

۳-۳-۵. ارزیابی مقاومت اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم

در جدول ۶-۵ رفتار مقاومتی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست ارزیابی شده‌است.

از جدول ۶-۵ می‌توان نتیجه گرفت پیش‌تندگی پیچ‌های بال پیوند تسلیمی تأثیر چنانی در رفتار مقاومتی اتصال ندارد. همچنین همانند نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست، همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم هم در رده‌ی اتصال‌های تمام مقاوم قرار دارند.

جدول ۶-۵. درصد نابرابری مقاومت اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

	M_n (kN.m)	$M_n / M_{p, Link}$		Category
Specimen_1	86.81	1.066	+0.38%	full-strength
Specimen_6	87.10	1.070		full-strength
Specimen_2	97.12	1.078	+0.28%	full-strength
Specimen_7	97.38	1.081		full-strength
Specimen_3	107.34	1.088	+0.18%	full-strength
Specimen_8	107.58	1.090		full-strength
Specimen_4	149.61	1.088	+0.28%	full-strength
Specimen_9	150.04	1.091		full-strength
Specimen_5	197.33	1.100	+0.18%	full-strength
Specimen_10	197.57	1.102		full-strength

۴-۵. بررسی نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم

پس از بررسی تأثیر پیش‌تندگی پیچ‌های بال پیوند تسلیمی که اثر مثبت در افزایش سختی و مقاومت اتصال داشت، با توجه به بخش ۳-۲-۵ که نشان‌دهنده‌ی تسلیم در چشمه‌ی اتصال در بیشتر نمونه‌ها بوده‌است؛ مورد دیگری که برای بررسی در نظر گرفته‌شد، تقویت چشمه‌ی اتصال با ورق‌هایی به ضخامت ۵ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع ورق تقویتی برابر با پیشنهاد بایستگی‌های عمومی AISC ۱۵۰ میلی‌متر بیشتر از چشمه‌ی اتصال (روی ورق پیوستگی تا انتهای ورق تقویت چشمه‌ی اتصال) در هر ۲

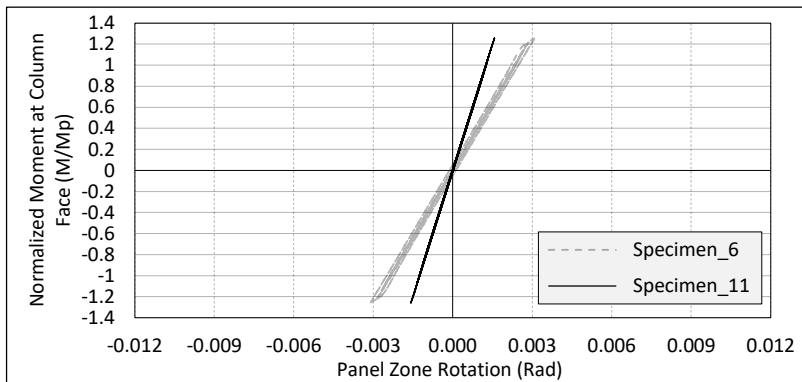
سمت بالا و پائین چشمه‌ی اتصال می‌باشد. همچنین ۲ ورق به صورت متقارن در دو سمت چشمه‌ی اتصال قرار گرفته‌اند.

در زیر به بررسی اثر تقویت چشمه‌ی اتصال در رفتار نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم پرداخته شده‌است. نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم از روی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم ساخته و سپس در بخش چشمه‌ی اتصال تقویت شده‌اند. به این معنا که نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم هم در پیچ‌های بال پیوند تسلیمی پیش تنیده‌اند و هم در بخش چشمه‌ی اتصال تقویت شده‌اند.

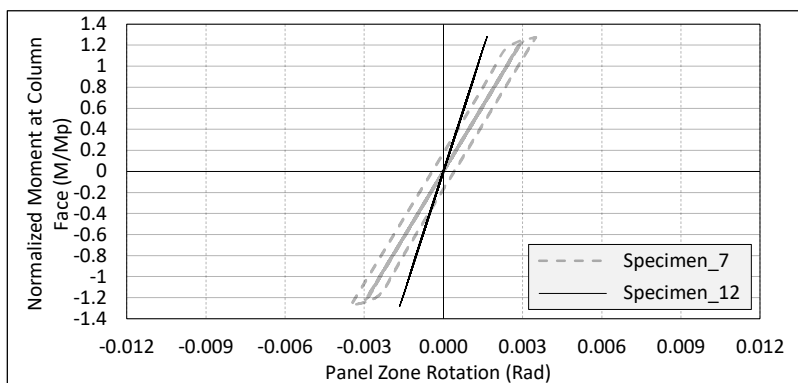
۵-۴-۱. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم

در شکل‌های ۵-۲۹ تا ۵-۳۳ نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم (از نمونه‌ی ۱۱ تا نمونه‌ی ۱۵) همراه با نمونه‌ی هم‌خانواده از نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم، نشان داده شده‌است.

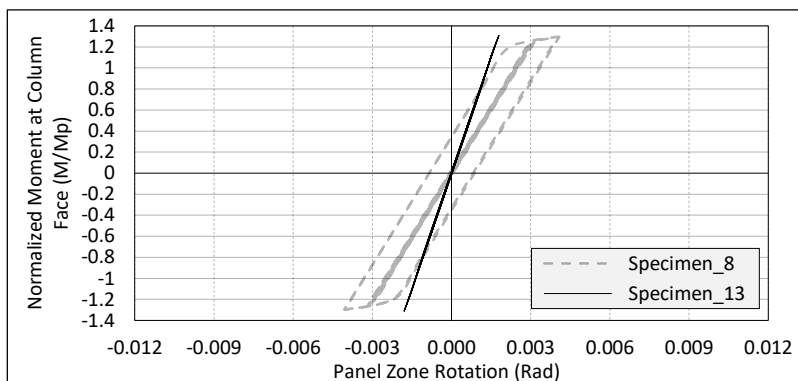
در شکل‌های ۵-۲۹ تا ۵-۳۳ به‌طور کامل مشخص است که نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال، سختی بیشتری را نشان می‌دهد و همچنین همه‌ی این نمونه‌های در بخش چشمه‌ی اتصال رفتار تمام کشسانی داشته‌اند.



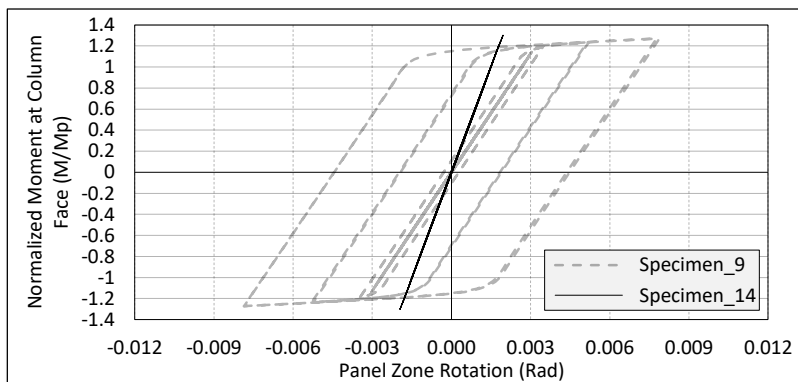
شکل ۵-۲۹. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی ششم و نمونه‌ی یازدهم



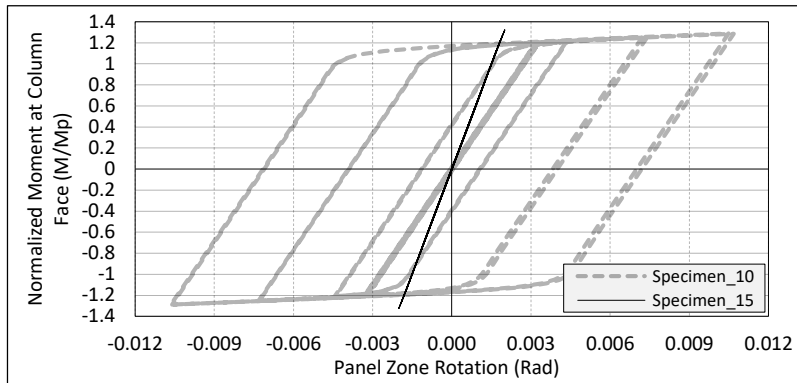
شکل ۵-۳۰. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی هفتم و نمونه‌ی دوازدهم



شکل ۵-۳۱. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی هشتم و نمونه‌ی سیزدهم



شکل ۵-۳۲. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی نهم و نمونه‌ی چهاردهم



شکل ۳۳-۵. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال نمونه‌ی دهم و نمونه‌ی پانزدهم

۵-۴-۲. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم

در جدول ۵-۷ درصد افزایش سختی اتصال و مقدار m برای نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم (از نمونه‌ی ۱۱ تا نمونه‌ی ۱۵) نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم (از نمونه‌ی ۶ تا نمونه‌ی ۱۰) در پی به کارگیری ورق مضاعف در چشمه‌ی اتصال، آورده شده‌است.

در جدول ۵-۷ همان افزایش سختی‌هایی که در شکل‌های ۵-۲۹ تا ۵-۳۳ مشاهده می‌شد را می‌توان با کمیت‌های عددی مشاهده نمود. دلیل این افزایش سختی به صورت طبیعی افزایش سختی چشمه‌ی

جدول ۵-۹. درصد نابرابری سختی اتصال و مقدار m نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم

	K_i (kN.m)	m_i		K_y (kN.m)	M_y		K_e (kN.m)	m_e		Category
Specimen_6	13336	17.56		13165	17.34		13330	17.56		
Specimen_11	14869	19.58	+12%	14540	19.15	+10%	14877	19.59	+12%	PR
Specimen_7	15806	17.02		15803	17.02		15805	17.02		
Specimen_12	17732	19.09	+12%	17713	19.07	+12%	17729	19.09	+12%	PR
Specimen_8	18507	16.60		18449	16.54		18469	16.56		
Specimen_13	20704	18.57	+12%	20558	18.45	+12%	20660	18.53	+12%	PR
Specimen_9	24466	14.45		24211	14.30		24314	14.36		
Specimen_14	27303	16.13	+12%	26843	15.85	+11%	27123	16.02	+12%	PR
Specimen_10	33007	13.46		32640	13.31		32816	13.39		
Specimen_15	37456	15.28	+14%	36757	14.99	+13%	37145	15.15	+13%	PR

در اثر افزایش ضخامت است. در جدول ۵-۹ می‌توان دید که این افزایش برای سختی‌های متفاوت و برای نمونه‌های گوناگون بین ۱۲ تا ۱۳ درصد است.

۵-۴-۳. ارزیابی مقاومت اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم

در جدول ۵-۸ خروجی‌های مقاومتی برای ارزیابی رفتار مقاومتی نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم ارائه شده است.

همان گونه که پیش‌بینی می‌شد تقویت چشمه‌ی اتصال در نمونه‌هایی که دچار تسلیم‌های بیشتری در چشمه‌ی اتصال شده بودند اثر بیشتری گذاشته است؛ البته به شکل کلی می‌توان گفت که تقویت چشمه‌ی اتصال هم مانند پیش‌تنیدگی پیچ‌های بال پیوند تسلیمی اثر چندانی بر رفتار مقاومتی اتصال ندارد.

جدول ۵-۸. درصد نابرابری مقاومت اتصال نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در برابر نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم

	M_n (kN.m)	$M_n / M_{p, Link}$		Category
Specimen_6	87.10	1.070	+0.47%	Partial-strength
Specimen_11	87.52	1.075		
Specimen_7	97.38	1.081	+0.46%	Partial-strength
Specimen_12	97.84	1.086		
Specimen_8	107.58	1.090	+0.46%	Partial-strength
Specimen_13	108.06	1.095		
Specimen_9	150.04	1.091	+0.55%	Partial-strength
Specimen_14	150.79	1.097		
Specimen_10	197.57	1.102	+0.54%	Partial-strength
Specimen_15	198.67	1.108		

۵-۵. مقایسه‌ی ۳ نمونه با اتصال‌های SST، SST اصلاح شده و RBS

در این بخش به بررسی میان ۳ نمونه‌ی تا حد امکان مشابه با ۳ اتصال متفاوت SST، SST اصلاح شده (SST_R) و RBS پرداخته شده است. نمونه‌ی با اتصال SST همان نمونه‌ی پانزده می‌باشد و اتصال SST اصلاح شده همان اتصال SST نمونه‌ی پانزده می‌باشد با این تفاوت که بال پیوند تسلیمی

حذف شده و ساق پیوند تسلیمی به صورت مستقیم به بال ستون جوش می‌شود. جدا از پیوند تسلیمی که در این نمونه اصلاح شده، همه‌ی بخش‌های دیگر همانند نمونه‌ی پانزده می‌باشد؛ توجه‌شود که پیچ‌ها و سوراخ‌های بال ستون هم در نمونه‌ی SST اصلاح شده حذف شده‌اند. همچنین نمونه‌ی با اتصال RBS به‌روشی که در ادامه گفته خواهد شد از روی نمونه‌ی پانزده ساخته شده‌است.

در ساخت نمونه‌ی همسان به این نکته‌ها توجه شده‌است؛ نخستین نکته، برابری محل تشکیل مفصل پلاستیک بوده‌است به این شکل که فاصله‌ی مرکز بخش کاهش یافته‌ی اتصال RBS تا برستون برابر است با فاصله‌ی مرکز بخش کاهش یافته‌ی اتصال SST تا برستون در نمونه‌ی پانزدهم.

دومین نکته برابر بودن ضخامت بال تیر با ضخامت ساق پیوند تسلیمی است؛ به این صورت که ضخامت بال تیر همسان‌سازی شده برابر با ۱۳ میلی‌متر (ضخامت ساق پیوند تسلیمی) می‌باشد.

سومین نکته برابری عرض مرکز بخش کاهش یافته RBS با عرض بخش کاهش یافته‌ی پیوند تسلیمی؛ برای تیر همسان‌سازی شده مقدار بریده شده در مقطع کاهش یافته، بیشینه مقدار (۲۵/۰ عرض بال تیر) در نظر گرفته شده‌است و عرض بال تیر هم به گونه‌ای گزینش شده تا عرض میانی بخش کاهش یافته برابر با عرض بخش کاهش یافته‌ی پیوند تسلیمی باشد.

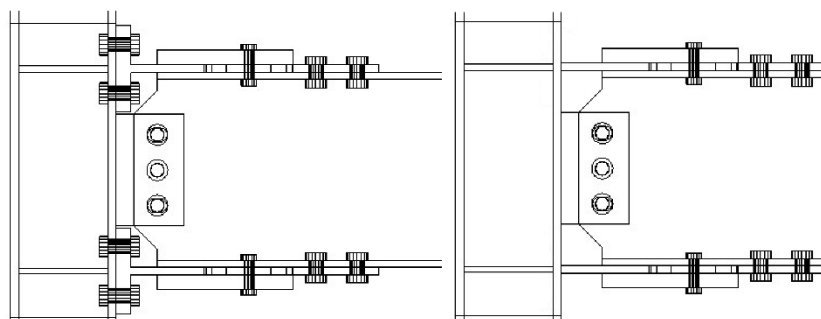
چهارمین نکته برابر بودن عمق تیر همسان‌سازی شده با فاصله‌ی زیر پیوند تسلیمی پائین تا روی پیوند تسلیمی بالاست. در اینجا در نمونه‌ی با اتصال SST عمق تیر ۴۰۰ میلی‌متر بوده و ضخامت ساق پیوند تسلیمی هم ۱۳ میلی‌متر می‌باشد، عمق تیر همسان‌سازی شده برابر با ۴۲۶ در نظر گرفته شده‌است.

پنجمی نکته برابر بودن مصالح در تیر نمونه‌ی RBS با پیوندهای تسلیمی اتصال SST و SST_R است. برای این کار فولاد رده‌ی ST52 برای تیر نمونه‌ی با اتصال RBS به کار گرفته شده‌است.

ستون نمونه‌ی همسان‌سازی شده همان ستون نمونه‌ی پانزدهم (با حذف سوراخ‌های ستون) می‌باشد.

البته با این روش همسان‌سازی مقدار لنگر پلاستیک مورد انتظار در ۲ نمونه نابرابر خواهد بود؛ زیرا در اتصال RBS جدا از بخش کاهش یافته جان تیر هم در جذب لنگر دخالت دارد، به همین دلیل مقایسه‌ای هم میان نمودارهای لنگر-چرخش نرمال‌سازی شده‌ی نمونه‌ها صورت گرفته‌است.

در شکل ۳۴-۵ نمائی از پیکربندی ۲ اتصال SST و SST_R (اتصال اصلاح شده) نشان داده شده است که می‌توان تفاوت‌های میان این ۲ نمونه را مشاهده نمود.



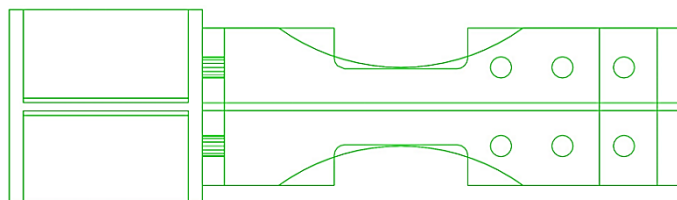
A. SST (Specimen_15)

B. SST_R

شکل ۳۴-۵. سنجش پیکربندی اتصال SST (نمونه‌ی پانزده) با اتصال SST_R

در شکل ۳۵-۵ بخش اتصال نمونه‌ی پانزده (SST) و نمونه‌ی با اتصال RBS بر روی هم نشان داده شده است تا نکته‌هایی که پیش‌تر گفته شد، قابل مشاهده باشد. توجه داشته باشید در شکل ۳۵-۵ برای نمونه‌ی پانزده تنها پیوند تسلیمی نشان داده شده است و از نمایش تیر (که کمی عرض آن بیشتر از تیر همسان‌سازی شده است)، ستون، پیچ‌ها و ورق کمانش‌گیر چشم‌پوشی شده است تا نکته‌های مهم شفاف‌تر دیده شود.

در نهایت تیر همسان‌سازی شده نسبت به تیر موجود در نمونه‌ی پانزده تفاوت‌های چشمگیری ندارد.



شکل ۳۵-۵. نمایش همسان‌سازی پیکربندی اتصال RBS با پیوند تسلیمی اتصال SST (نمونه‌ی پانزده)

در ادامه به ارزیابی رفتارهای لرزه‌ای ۳ نمونه پرداخته می‌شود.

۵-۱. رفتار لرزه‌ای نمونه‌های با اتصال SST، RBS و SST_R

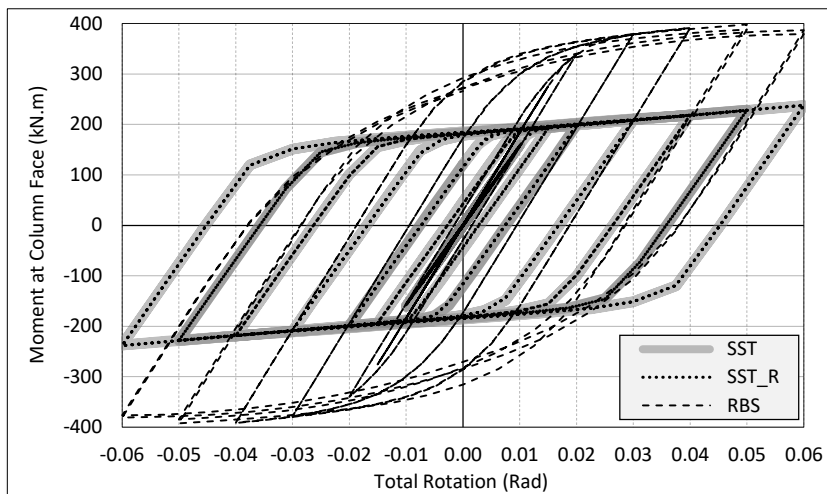
همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد برای همسان‌سازی اتصال RBS با اتصال SST در این پژوهش اولویت با هندسه‌ی همانند برای نمونه‌ها بوده است؛ از این رو مقدار ظرفیت اتصال RBS بیش از اتصال SST می‌باشد. برای مقایسه‌ی درست میان رفتار نمونه‌ها از دیدگاه مقاومت و فراز و فرودهای رفتار مقاومتی اتصال، نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش بر پایه‌ی لنگر تسلیم موردانتظار که در مورد آن پیش‌تر صحبت شده بود، نرمال‌سازی شده است. در جدول لنگر تسلیم موردانتظار برای ۳ اتصال مورد مقایسه ارائه شده است.

جدول ۵-۹. لنگر تسلیم موردانتظار جفت پیوندهای تسلیمی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست

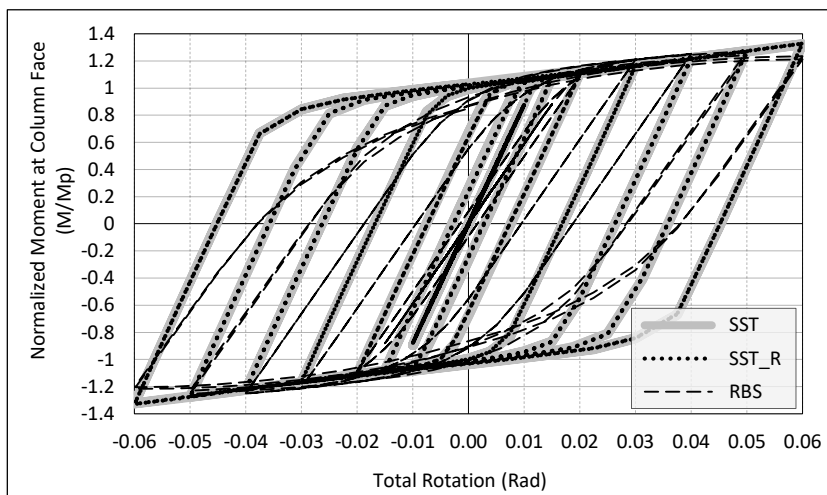
	R_y	$F_{y_link} (kN/m^2)$	$Z (m^3)$	$M_{ye} (kN.m)$
SST	1.1	353039.4	4.61E-04	179.31
SST_R	1.1	353039.4	4.61E-04	179.31
RBS	1.1	353039.4	8.06E-04	312.90

همان‌گونه که در جدول ۵-۹ دیده می‌شود ظرفیت لنگر تسلیم موردانتظار در اتصال RBS با تیر همانندسازی شده با اتصال SST، که ضخامت جان تیر در آن برابر با ضخامت جان تیر در نمونه‌ی با اتصال SST (نیم‌رخ IPE400) است، ۷۵٪ بیشتر از اتصال SST است؛ و این نکته نشان می‌دهد که یکی از کاستی‌های اتصال SST ظرفیت پائین مقاومتی آن در برابر اتصال‌هائی همچون RBS است.

در ادامه برای درک همه‌جانبه از تفاوت‌های رفتاری ۳ اتصال موردنظر هر ۲ نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اصلی و نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش نرمال‌سازی شده با لنگر تسلیم موردانتظار اتصال در شکل‌های ۵-۳۶ و ۵-۳۷ آورده شده است.



شکل ۵-۳۶. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS



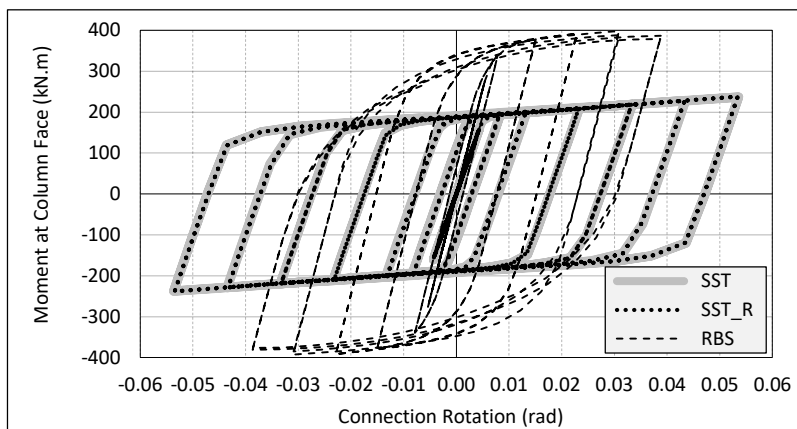
شکل ۵-۳۷. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نرمال‌سازی شده‌ی نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS

آنچه در مورد مقایسه میان نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌های مورد مقایسه می‌توان گفت، این است که در اتصال RBS ظرفیت خمشی بالاتری نسبت به اتصال‌های SST و SST_R مشاهده می‌شود که این در پی مشارکت جان تیر در مفصل پلاستیک است. اما نکته‌ی مهم در مورد نوع رفتار مقاومتی نمونه‌هاست که در بخش ۵-۷ به‌طور گسترده و با داده‌های عددی در مورد آن صحبت

خواهد شد. همچنین در هر دو شکل ۳۶-۵ و ۳۷-۵ نکته‌ی قابل مشاهده رفتار کمابیش یکسان نمونه‌های با ۲ اتصال SST و SST_R می‌باشد. در ادامه به بررسی موشکافانه‌ی ریزنکته‌های رفتاری در ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه پرداخته خواهد شد.

۵-۲-۵. رفتار لرزه‌ای اتصال نمونه‌های SST، SST_R و RBS

نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه همانند روش گفته‌شده در بخش ۵-۲-۲ به دست آمده است که در شکل ۳۸-۵ ارائه گردیده است.



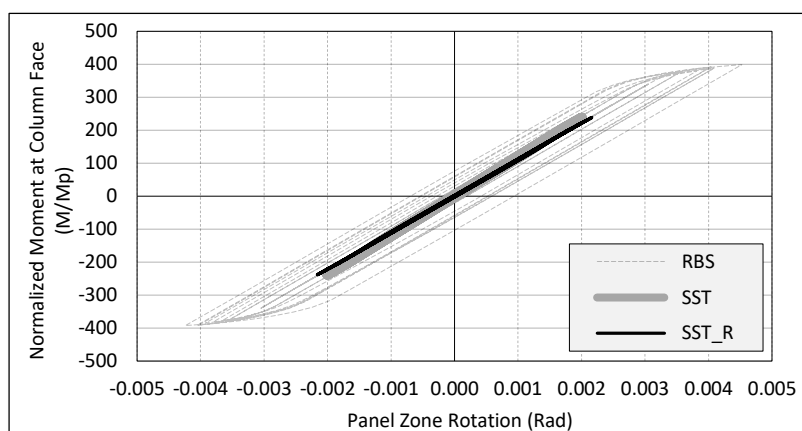
شکل ۳۸-۵. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال‌های SST، SST_R و RBS

در شکل ۳۸-۵ پُررنگ‌ترین ویژگی کمتر بودن چرخش اتصال RBS در برابر اتصال‌های SST و SST_R می‌باشد. به این معنا که در اتصال RBS تیر و ستون بیشتر دچار خمش شده‌اند به طوری که در چرخش ۰/۰۶ رادیان نمونه بیش از ۰/۰۲ رادیان آن توسط تیر و ستون خارج از محدوده‌ی اتصال جذب شده است. البته این موضوع به ۲ دلیل رخ داده است؛ مهم‌ترین دلیل ماهیت اتصال SST است که از آزادی دورانی بالائی حول پیچ میانی ورق برش گیر برخوردار است و بخش زیادی از چرخش نمونه در این قسمت رخ می‌دهد. دومین دلیل بالاتر بودن ظرفیت محدوده‌ی اتصال در نمونه‌ی با اتصال RBS است، به گونه‌ای که تیر و ستون در اتصال SST به دلیل ظرفیت پائین تر به نوعی صلب تر عمل می‌کنند.

در مورد مقایسه‌ی ۲ اتصال SST و SST_R در شکل ۵-۳۸ می‌توان گفت که در اتصال SST_R به‌خاطر حذف بال پیوند تسلیمی و در پی آن حذف عملکرد اهرمی ناشی از آن به مقدار بسیار ناچیزی چرخش محدوده‌ی اتصال در چرخه‌های بارگذاری بالا، کمتر از نمونه‌ی SST است؛ البته همین ناچیز بودن نابرابری این ۲ اتصال که در شکل ۵-۳۸ نمایان است، نشان می‌دهد که ضخامت بال پیوند تسلیمی و بال ستون در اتصال SST، مقدار مناسبی بوده است؛ به‌طوری که رفتار اهرمی در آن‌ها ناچیز بوده است.

۵-۳. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS

در شکل ۵-۳۹ نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال در ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه برابر با روش گفته‌شده در بخش ۳-۱۴ نشان داده شده است.



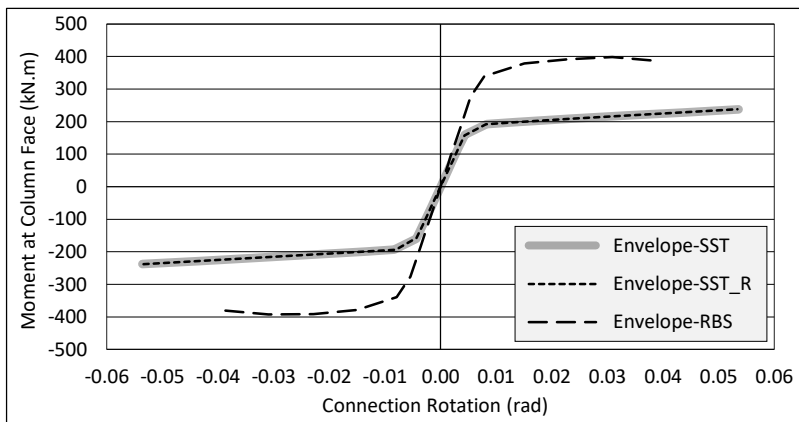
شکل ۵-۳۹. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال‌های SST، SST_R و RBS

در شکل ۵-۳۹ پس از تقویت چشمه‌ی اتصال در نمونه‌ی پانزدهم که همان اتصال SST مورد مقایسه در بالاست، رفتار چشمه‌ی اتصال به‌طور کامل کشسان شده است. در نمونه‌ی SST_R هم با اینکه اتصال مستقیم ساق پیوند تسلیمی به بال ستون (به نوعی اتصال مستقیم به گنج چشمه‌ی اتصال) سبب افزایش چرخش در چشمه‌ی اتصال شده است (در مورد این دگرگونی در سازوکار عملکردی چشمه‌ی اتصال در بخش ۵-۶-۳ توضیح کامل داده شده است)؛ اما نتوانسته است منجر به تسلیم در چشمه‌ی اتصال شود و عملکرد چشمه‌ی اتصال در اتصال SST_R هم به‌شکل کامل کشسان باقی مانده است.

نکته‌ی ویژه در شکل ۵-۳۹ تسلیم شدن چشمه‌ی اتصال در نمونه‌ی با اتصال RBS است که نشان می‌دهد تقویت انجام‌شده در چشمه‌ی اتصال برای اتصال RBS کافی نبوده است. البته در نمودار مربوط به اتصال RBS مشخص است که این تسلیم ناشی از ظرفیت بالاتر این اتصال است، به گونه‌ای که در لنگرهای در حدود (حتا بیشتر از) بیشینه لنگرهای اتصال SST، چشمه‌ی اتصال RBS کماکان در بازه‌ی کشسان قرار دارد و پس از آن با تحمل لنگرهای بیشتر، رفته‌رفته دچار تسلیم می‌شود.

۵-۴. نمودار پوشش نمونه‌های SST، SST_R و RBS

در شکل ۵-۴۰ نمودارهای پوشش ساخته‌شده از نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال برای ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه ارائه گردیده است.



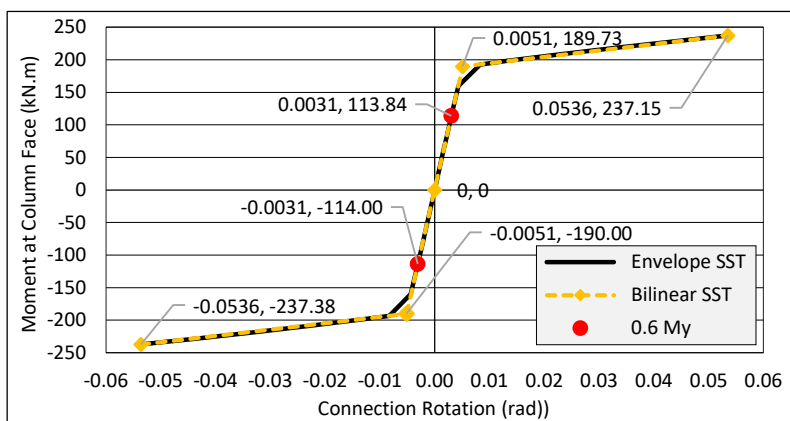
شکل ۵-۴۰. نمودارهای پوشش اتصال SST، SST_R و RBS

در نمودارهای پوشش نمایش داده‌شده در شکل ۵-۴۰ می‌توان، رفتار ۳ نمونه را از دیدگاه مقاومت، سختی و شکل‌پذیری مورد ارزیابی کلی قرار داد. به عنوان مثال از مقایسه‌ی نمودارهای پوشش این ۳ نمونه، مشخص است که سختی اتصال RBS بیشتر از ۲ نمونه‌ی دیگر است. همچنین اتصال RBS از ظرفیت مقاوتی بالاتر نسبت به ۲ نمونه‌ی دیگر برخوردار است (به دلیل بیشتر بودن اساس مقطع پلاستیک بخش کاهش یافته) و در مقابل ظرفیت چرخش در این اتصال نسبت به ۲ نمونه‌ی دیگر کمتر است.

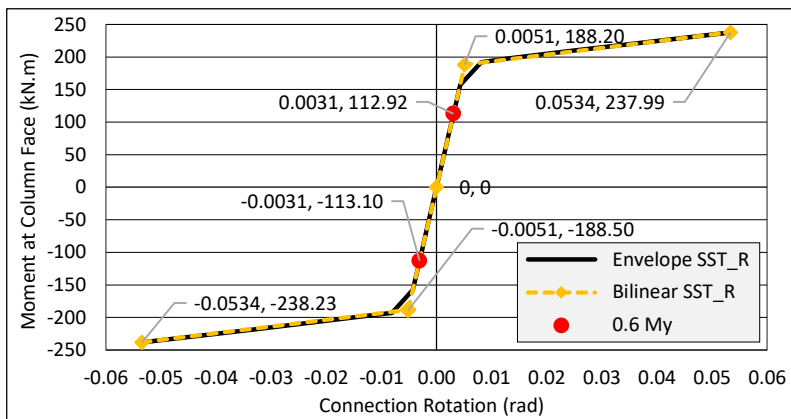
در مورد نمودار پوشش ۲ اتصال SST و SST_R از روی شکل ۵-۴۰ فقط می‌توان گفت که این اتصال تا اندازه‌ی زیادی رفتار لرزه‌ای همانندی دارند و برای مقایسه‌ی دقیق میان این ۲ نیاز به بررسی پارامتری است که در ادامه میان هر ۳ نمونه برای عملکرهای گوناگون، انجام خواهد شد.

۵-۵-۵. نمودار دوطبقی نمونه‌های SST، SST_R و RBS

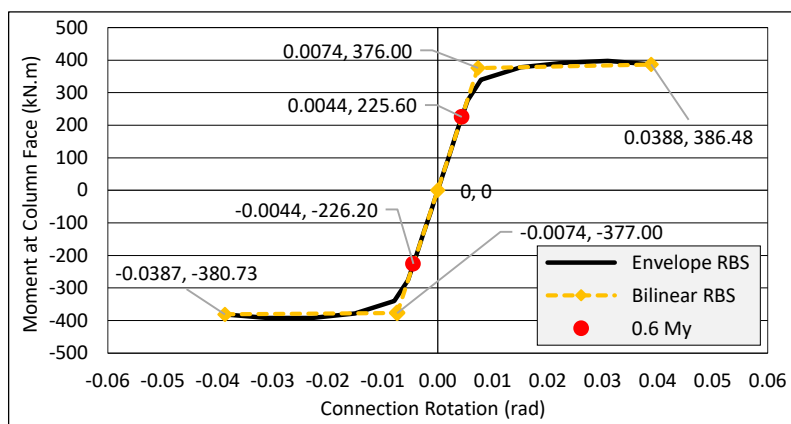
در شکل‌های ۵-۴۱ تا ۵-۴۳ نمودارهای دوطبقی ساخته‌شده از نمودارهای پوشش برای ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه ارائه شده‌است.



شکل ۵-۴۱. نمودار پوشش و نمودار دوطبقی لنگر-چرخش اتصال SST



شکل ۵-۴۲. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال SST_R



شکل ۵-۴۳. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال RBS

در ادامه از نمودارهای دوخطی ارائه‌شده برای ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، برای برآورد سختی و شکل‌پذیری استفاده خواهد شد.

۵-۶. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS

در جدول ۵-۱۰ سختی‌های آغازین، تسلیم و مؤثر و همچنین مقدار m برگرفته از سختی‌های گفته‌شده، ارائه شده‌است. همچنین در این جدول دسته‌بندی اتصال‌ها با توجه به بخش ۳-۷ صورت گرفته‌است.

جدول ۵- ۱۰. دسته‌بندی سختی در اتصال‌های SST، SST_R و RBS

	$I_{link, RBS}$ (cm ⁴)	K_i (kN.m)	K_y (kN.m)	K_e (kN.m)	m_i	m_y	m_e	Category
SST	9538	37456	36757	37145	15.28	14.99	15.15	PR
SST_R	9538	36691	36481	36730	14.97	14.88	14.98	PR
RBS	14120	51299	51107	51190	14.17	14.12	14.14	PR

نخستین نکته‌ی مهم در جدول ۵- ۱۰، بالاتر بودن سختی اتصال RBS نسبت به ۲ اتصال دیگر است که نشان می‌دهد اتصال SST در ماهیت نسبت به اتصال RBS، اتصالی با سختی کمتر است. البته نکته‌ی مهم دیگر این است که اتصال RBS با وجود سختی بالاتر نسبت به ۲ اتصال دیگر فاصله‌ی بیشتری تا آستانه‌ی اتصال‌های گیردار دارد که به‌خاطر داشتن لنگر ماند بیشتر این اتصال می‌باشد.

به‌طور معمول اتصال RBS را یک اتصال گیردار می‌شناسند در صورتی که پژوهش‌ها نشان داده این اتصال می‌تواند یک اتصال نیمه‌گیردار هم باشد؛ اما در جدول ۵- ۱۰ مقدار فاصله‌ی m اتصال RBS تا آستانه‌ی گیرداری (۲۰) کمایش زیاد است؛ یکی از دلیل‌های این فاصله‌ی زیاد ستون نه‌چندان قوی اتصال در این پژوهش است که برای یکسان بودن شرایط مقایسه، از آن استفاده شده است (البته این ستون همه‌ی بایستگی‌های آئین‌نامه‌ی AISC 360 را داراست)؛ و دلیل دیگر هم این است که اتصال RBS به دلیل ساختار پیکربندی خود به‌سمت یک اتصال نیمه‌گیردار متمایل است تا یک اتصال گیردار؛ کمالین که آئین‌نامه‌های بنام برای کنترل دریفت قاب‌های با اتصال RBS مقدار دریفت سازه با اتصال گیردار در نرم‌افزاری را در ۱/۱ ضرب می‌کنند تا اثر این اختلاف سختی را جبران نمایند. ضریب گفته‌شده برای اتصال SST در آئین‌نامه‌ی اتصال‌های پیش‌پذیرفته‌ی آمریکا ۱/۲ آورده شده است، که نشان می‌دهد اتصال SST نسبت به اتصال RBS اتصالی با سختی چرخشی کمتر پنداشته شده است.

در مورد اختلاف ناچیز سختی میان ۲ نمونه‌ی SST و SST_R که نشان می‌دهد حذف بال پیوند تسلیمی باعث کاهش ناچیز در سختی اتصال می‌شود. هرچند پیش‌بینی می‌شود با حذف بال پیوند تسلیمی که خود دارای رفتار اهرمی است که باعث کاهش سختی می‌شود، سختی اتصال افزایش یابد اما در اینجا سختی کاهش یافته است که برای یافتن علت آن پس از بررسی دقیق خروجی‌های گرافیکی ۲ نمونه مشاهده شد که با حذف بال پیوند تسلیمی طول قسمت آزاد ساق پیوند تسلیمی (ساق پیوند

تسلیمی از برستون تا آغاز ورق کانش گیر) که در اثر دوران اتصال دچار خمش می‌شود افزایش یافته و سختی خمشی این بخش کاسته شده‌است که البته اثر آن در سختی اتصال چندان بالا نیست. در مجموع می‌توان گفت که با اتصال مستقیم ساق پیوند تسلیمی به بال تیر، اثر کاهش سختی ناشی از افزایش طول آزاد ساق در برستون بیشتر از افزایش سختی ناشی از حذف عملکرد اهرمی بال پیوند تسلیمی‌است. البته اگر برش‌های صورت گرفته در تیر حذف شود و ورق کمانش گیر نیز تا انتهای تیر (بدون برش) امتداد یابد می‌توان این طول آزاد را کم کرد.

۵-۷. ارزیابی مقاومتی اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS

در جدول ۵-۱۱ می‌توان خروجی‌های مقاومتی ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه را دید. در این جدول مقدار Mn برای اتصال SST و SST_R برابر با بخش ۳-۸ از چرخش ۰/۰۲ رادیان و برای اتصال RBS از بیشینه لنگر که در چرخش ۰/۰۵ رادیان رخ داده‌است برداشت شده‌است.

جدول ۵-۱۱. دسته‌بندی مقاومتی اتصال‌های SST، SST_R و RBS

	$Z_{(Link, RBS)} (cm^3)$	$M_{p, (Link, RBS)} (kN.m)$	$M_n (kN.m)$	$M_n/M_{p, (Link, RBS)}$	Category
SST	461.7	179.31	198.67	1.108	Full-strength
SST_R	461.7	179.31	197.97	1.104	Full-strength
RBS	805.7	312.90	395.30	1.263	Full-strength

برابر با آئین‌نامه الزامات عمومی AISC هر ۳ اتصال بالا تمام مقاوم قلمداد می‌شوند. همچنین حذف بال پیوند تسلیمی هم اثر بسیار کمی بر عملکرد مقاومتی اتصال دارد.

۵-۸. ارزیابی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های SST، SST_R و RBS

شکل‌پذیری ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه در جدول ۵-۱۲ آورده شده‌است.

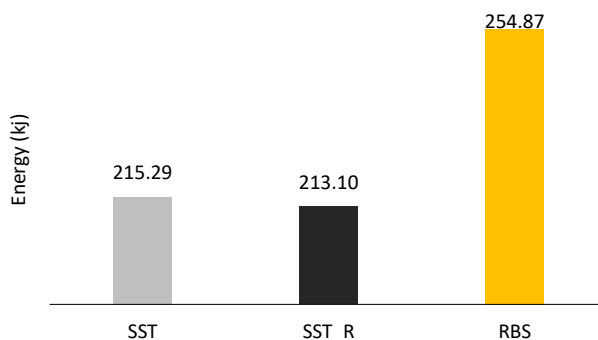
جدول ۵-۱۲. شکل‌پذیری نمودار دوطولی اتصال‌های SST، SST_R و RBS

	$\theta_y (rad)$	$\theta_u (rad)$	μ
SST	0.0051	0.0536	10.48
SST_R	0.0051	0.0534	10.42
RBS	0.0074	0.0387	5.27

همان‌گونه که در بخش ۵-۲-۸ گفته شد عددهای ارائه شده در این بخش به عنوان شکل پذیری، تنها عددهای حاصل از نمودارهای موجود است و از روش استاندارد برای محاسبه‌ی شکل پذیری استفاده نشده است. اما می‌توان گفت این برداشت از جدول ۵-۱۲ که شکل پذیری اتصال SST نسبت به اتصال RBS بیشتر است، برداشت درستی است؛ زیرا در اتصال SST اگر چرخش‌های بالاتری تجربه شود، با توجه به روند نمودار، θ_{II} افزایش خوبی خواهد داشت؛ در صورتی که این افزایش برای اتصال RBS به دلیل روند نزولی نمودار، زیاد نخواهد بود (توجه شود که θ_{II} در قسمت نزولی در نقطه‌ی ۸/۰ بیشینه لنگر خواهد بود) و می‌توان گفت گرچه شکل پذیری گزارش شده به روش استاندارد برآورد نشده است اما اگر شکل پذیری به روش استاندارد برآورد شود میزان اختلاف شکل پذیری اتصال SST با اتصال RBS بیشتر خواهد بود. هر چند همین میزان اختلاف (حدود ۲ برابر) در شکل پذیری که در جدول ۵-۱۴ گزارش شده است هم نشان‌دهنده‌ی میزان شکل پذیری چشمگیر اتصال SST است.

۵-۵-۹. ارزیابی اتلاف انرژی در نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS

در شکل ۵-۳۵ اتلاف انرژی ۳ نمونه‌ی با اتصال SST، SST_R و RBS گزارش شده است.



شکل ۵-۳۵. اتلاف انرژی نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS

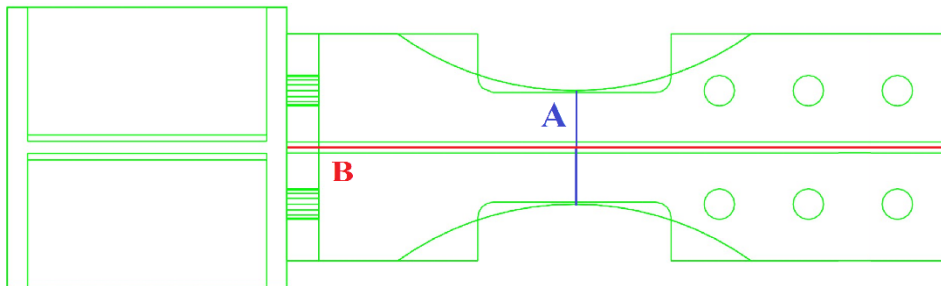
از آنجا که ظرفیت اتصال RBS نسبت به ۲ اتصال دیگر بیشتر است نمی‌توان در مورد اتلاف انرژی این اتصال در مقایسه با ۲ اتصال دیگر، سخنی گفت. اما در مورد ۲ اتصال دیگر می‌توان گفت اتلاف انرژی کمتر در اتصال SST نسبت به اتصال SST نشان می‌دهد که اتصال مستقیم ساق پیوند تسلیمی

به بال ستون (بدون حذف برش‌های صورت گرفته در تیر) از دیدگاه اتلاف انرژی، سبب کاهش استهلاک انرژی می‌شود.

۵-۱۰. ارزیابی شناسه‌ی گسیختگی در نمونه‌های SST_R، RBS و

در بخش ۳-۱۵ در مورد معیاری سخن به میان آمد که می‌تواند شاخصی برای یافتن نمونه‌های با احتمال گسیختگی زودرس تر باشد. این شاخص با «شناسه‌ی گسیختگی» شناخته می‌شود از نسبتی میان «شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل» و «شناسه‌ی سه‌محوری» به دست می‌آید که رابطه‌های آن در رابطه‌های ۳-۸ تا ۳-۱۰ آمده است.

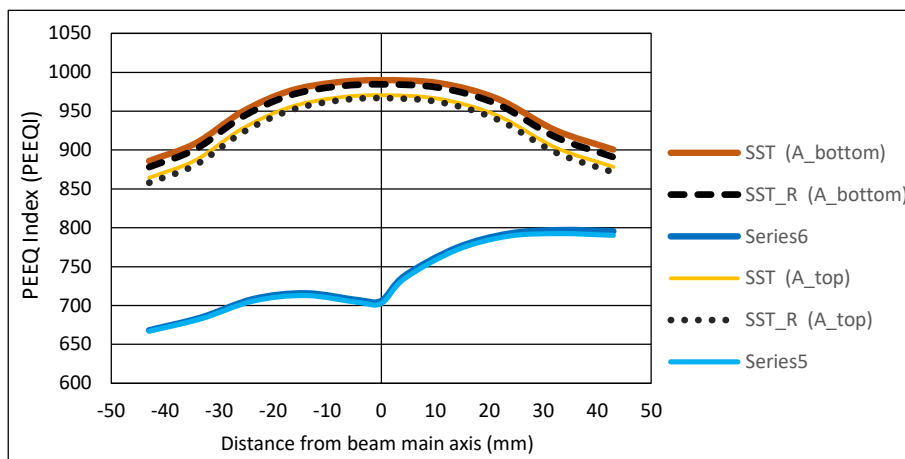
در ادامه به بررسی این شناسه‌ها بر روی ۲ خط نشان داده شده در شکل ۵-۳۶ در وسط ضخامت ساق پیوند تسلیمی و میانه‌ی ضخامت بال تیر در نمونه‌ی RBS پرداخته خواهد شد. خط‌های نشان داده شده برای خروجی از هردو پیوندهای تسلیمی بالا و پائین و همچنین بال بالا و پائین تیر RBS به کار برده شده است.



شکل ۵-۳۶. خط‌های به کار گرفته شده در ترسیم نمودارهای شناسه‌ی گسیختگی

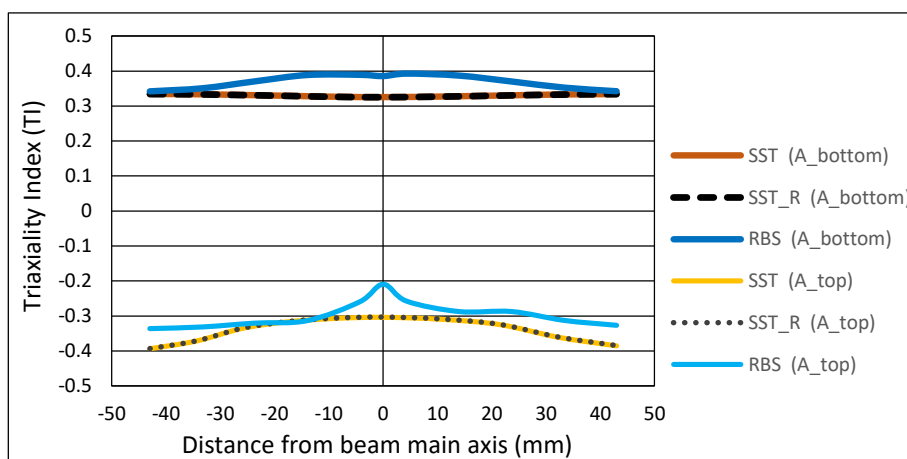
نمودارهای که در ادامه ارائه خواهد شد، در هنگام پیشینه جابجائی مثبت در چرخه‌ی پایانی بارگذاری است؛ به عبارتی نمودارهای همه‌ی نمودارهای گزارش شده از خروجی‌های گرافیکی نرم افزار در چرخه‌ی دوم دوران ۰/۰۶ رادیان مثبت (پیوند تسلیمی بالا در فشار و پیوند تسلیمی پائین در کشش) انجام شده است.

در شکل ۳۷-۵ نمودارهای شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای هر ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، نمایش داده شده‌است.



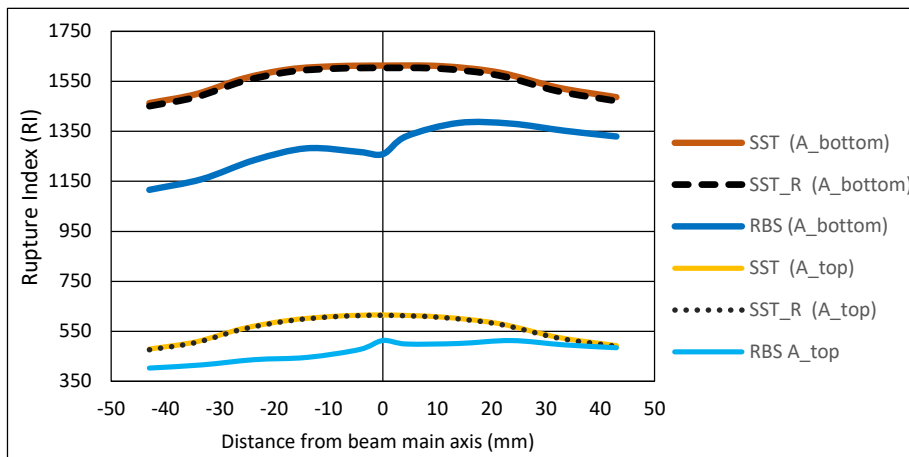
شکل ۳۷-۵. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط A

در شکل ۳۸-۵ نمودارهای شناسه‌ی سه‌محوری برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای هر ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، نمایش داده شده‌است.



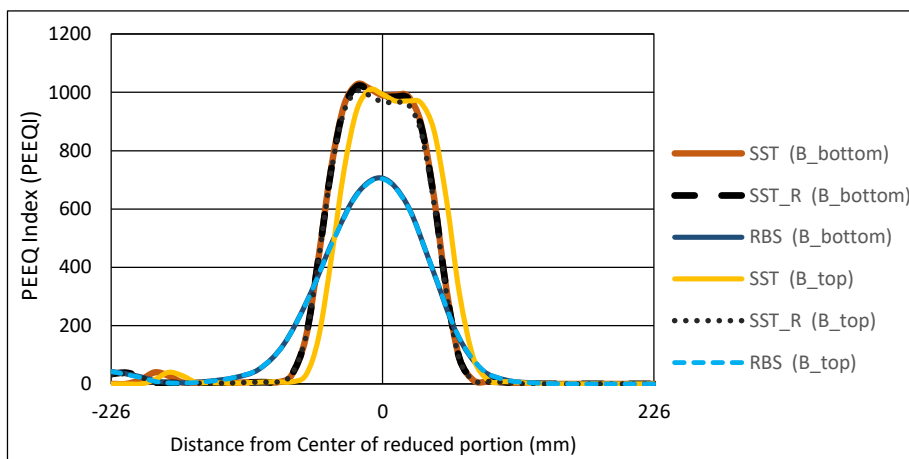
شکل ۳۸-۵. نمودار شناسه‌ی سه‌محوری برای خط A

در شکل ۳۹-۵ نمودارهای شناسه‌ی گسیختگی برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای هر ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، نمایش داده شده‌است.



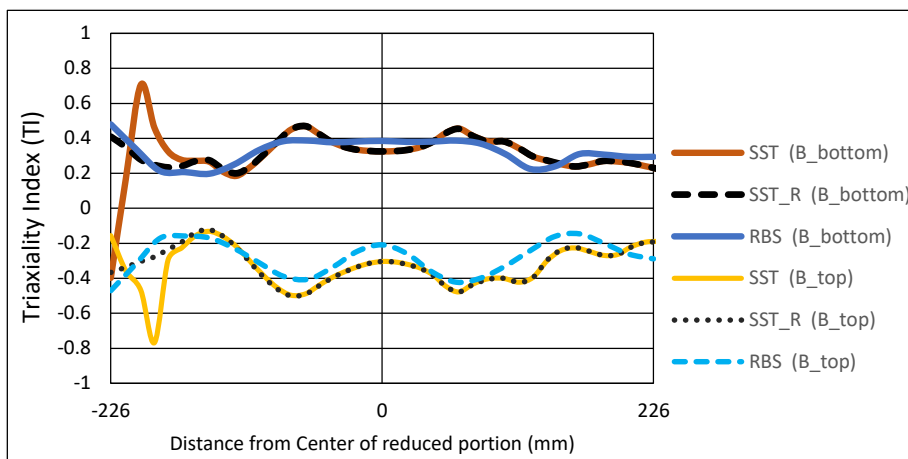
شکل ۳۹-۵. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط A

در شکل ۴۰-۵ نمودارهای شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای هر ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، نمایش داده شده‌است.



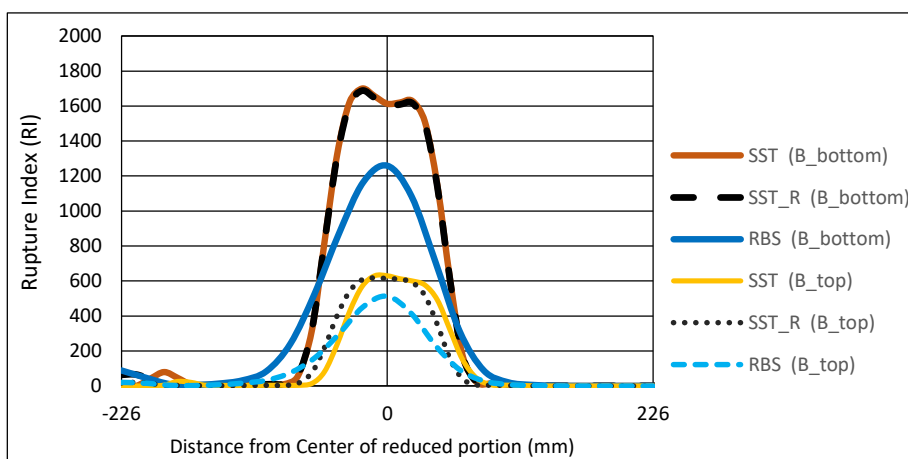
شکل ۴۰-۵. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B

در شکل ۴۱-۵ نمودارهای شناسه‌ی سه‌محوری برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای هر ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، نمایش داده شده‌است.



شکل ۴۱-۵. نمودار شناسه‌ی سه‌محوری برای خط B

در شکل ۴۲-۵ نمودارهای شناسه‌ی گسیختگی برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای هر ۳ نمونه‌ی مورد مقایسه، نمایش داده شده‌است.



شکل ۴۲-۵. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط B

در نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۵-۳۷ تا ۵-۴۲ نکته‌های جالب زیادی نهفته است که همه‌ی آنها را می‌توان با توجه به هندسه، تنش‌ها، کرنش‌ها و کمانش‌های رخ داده در چرخه‌ی دوم دوران ۰/۰۶+ رادیان برای اتصال‌ها تفسیر نمود. البته باید توجه داشت نمودارهای مربوط به اتصال RBS به خاطر نابرابری ظرفیت اتصال نمی‌تواند به صورت مستقیم با ۲ اتصال دیگر مورد مقایسه قرار گیرد، و تنها می‌توان در رفتار با نمودارهای مربوط به ۲ اتصال دیگر مقایسه شود.

بارزترین نکته در نمودارهای شاخص گسیختگی بیشتر بودن این شاخص در بخش‌های با عملکرد کششی است که این نکته در رابطه‌ی ۳-۸ هم نمایان است.

یکی دیگر از نکته‌های نمودارهای خط A برای اتصال RBS نامتقارن بودن این نمودارهاست که به خاطر رخ دادن کمانش موضعی در بال تیر در وسط بخش کاهش یافته‌ی اتصال است.

در شکل ۵-۴۰ می‌توان دید که تسلیم رخ داده برای اتصال SST و SST_R به طور کامل در داخل بخش کاهش یافته قرار دارد و این نشان می‌دهد که یکی از مهمترین اهداف این اتصال به دست آمده است. البته این نکته در مورد نمودار مربوط به اتصال RBS هم می‌تواند بیان شود با این تفاوت که در بخشی از جان تیر هم تسلیم رخ داده است که در خط B قابل نمایش نیست.

در شکل ۵-۴۱ تنش‌های زیاد سه محوره‌ی رخ داده در انتهای بخش‌های کاهش یافته‌ی اتصال SST و SST_R را می‌توان دید. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین تنش‌های سه محوره‌ی رخ داده مربوط به نقطه‌های اتصال ساق پیوند تسلیمی به بال پیوند تسلیمی در اتصال SST می‌باشد.

۵-۶. مقایسه‌ی ۲ نمونه با اتصال SST، و اتصال RBS_R

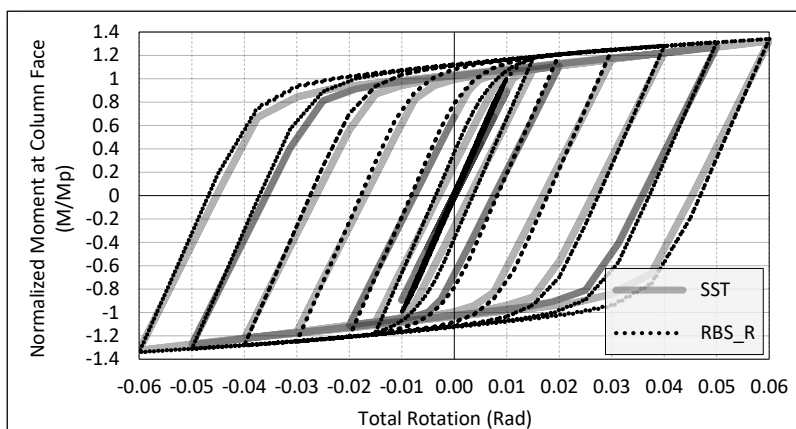
در مقایسه‌ی صورت گرفته در بخش پیشین دیده شد که ظرفیت مقاومتی اتصال RBS بیشتر از ۲ اتصال دیگر است؛ دلیل این موضوع بیشتر بودن اساس مقطع پلاستیک در اتصال RBS بوده که ناشی از جان نیم‌رخ است (در قسمت بال تیر در میانه‌ی بخش کاهش یافته همه‌ی ویژگی‌های هندسی همانند است). در بخش قبل با نرمال سازی نمودار لنگر-چرخش به مقایسه‌ی مقاومتی میان نمونه‌ها پرداخته شد و در نمودارهای نرمال سازی شده سختی اتصال‌ها را نمی‌توان مقایسه نمود و برای این کار نمودارهای

اصلی را باید با هم سنجید. در فرجامین بخش این پژوهش کوشیده شد تا با یکسان‌سازی اساس مقطع پلاستیک برای ۲ نمونه‌ی با اتصال SST و RBS از زاویه‌ی متفاوت به قیاس این ۲ نمونه نسبت به هم پرداخته‌شود و بتوان همه‌ی ویژگی‌های رفتاری گفته‌شده و همچنین ویژگی‌های دیگر را در یک شکل با هم سنجید. برای این مهم مقاومت مصالح تیر اتصال RBS_R (که در بخش پیشین از فولاد رده‌ی ST52 بود) در مقدار، اساس مقطع پلاستیک SST بخش بر اساس مقطع پلاستیک RBS، ضرب گردیده تا لنگر تسلیم برای ۲ نمونه در میانه‌ی بخش کاهش یافته برابر باشد.

دیگر ویژگی‌های نمونه‌ی RBS_R (جدا از نمودار تنش-کرنش فولاد تیر)، با نمونه‌ی اتصال RBS به کار گرفته‌شده در بخش پیشین برابر است. و نمونه‌ی به کار برده‌شده در این بخش برای سنجش با اتصال RBS همان نمونه‌ی SST بخش پیشین است (نمونه‌ی پانزده).

۵-۶-۱. رفتار لرزه‌ای نمونه‌های با اتصال SST و RBS_R

در شکل ۵-۴۳ می‌توان نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌های با اتصال SST و RBS_R ارائه شده است.



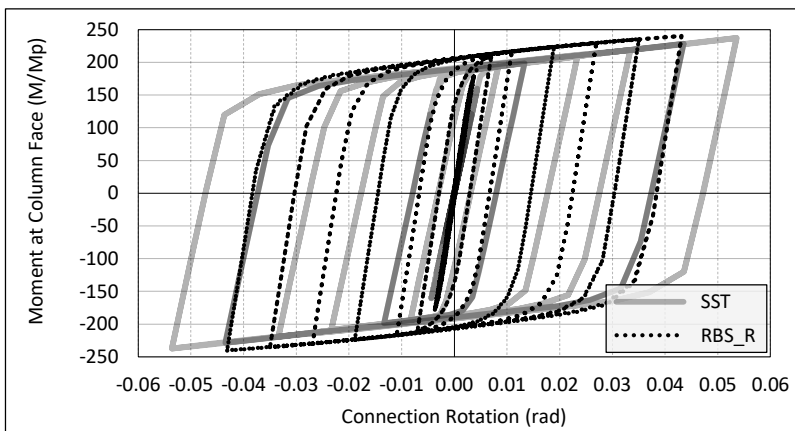
شکل ۵-۴۳. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش نمونه‌های با اتصال SST، RBS_R و RBS

سنجش نمودارهای شکل ۵-۴۳ نشان می‌دهد که اتصال RBS_R با در نظر گرفتن همه‌ی ویژگی‌ها به اتصال SST نزدیک است؛ اما نابرابری‌هایی مانند سختی نمونه‌ها و ظرفیت تسلیم نمونه‌ها هم در

نمودارها دیده می‌شود، که برای بررسی این نابرابری‌ها در اتصال، در ادامه نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال آورده شده‌است تا به ارزیابی ویژگی‌های رفتاری بر روی آن پرداخته‌شود.

۲-۶-۵. رفتار لرزه‌ای اتصال نمونه‌های SST و RBS_R

نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال‌های SST و RBS_R در شکل ۴۴-۵ آورده شده‌است. این نمودارها همانند روش گفته‌شده در بخش ۲-۲-۵ به دست آمده‌است.



شکل ۴۴-۵. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال‌های SST، RBS_R و RBS

در شکل ۴۴-۵ مهم‌ترین ویژگی کمتر بودن چرخش اتصال RBS_R در برابر اتصال‌های SST می‌باشد. در مورد دلیل‌های بیشتر بودن سختی در اتصال‌های RBS در برابر اتصال SST پیش‌تر (بخش ۲-۵-۵) سخن گفته‌شد.

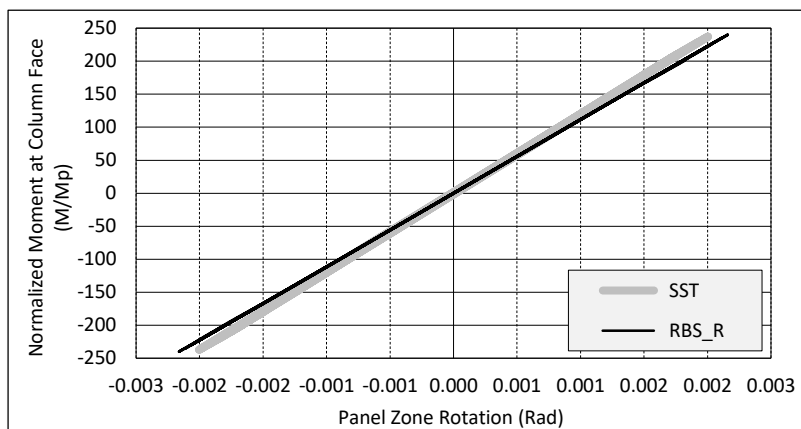
درباره‌ی نابرابری مقاوتی نچندان زیاد که در نمودارهای شکل ۳۹-۵ دیده می‌شود؛ می‌توان گفت که تسلیم در اتصال SST در بخش کاهش یافته‌ای رخ می‌دهد که، در طول خود مقطع یکسانی دارد؛ اما در اتصال RBS تسلیم در بخش کاهش یافته‌ای رخ می‌دهد که مقطع آن در طول تیر یکسان نیست؛ همسان‌سازی اتصال RBS_R با اتصال SST برپایه‌ی مساحت در میانه‌ی بخش کاهش یافته‌است؛ درحالی که تسلیم رخ داده در بخش کاهش یافته‌ی RBS_R در گستره‌ای رخ می‌دهد که میانگین

مساحت آن از مساحت بخش کاهش‌یافته‌ی اتصال SST اندکی بیشتر است و این باعث می‌شود تا در این مقایسه هم ظرفیت اتصال RBS_R اندکی بیشتر از اتصال SST باشد.

در مورد رفتار اتصال RBS_R در چرخه‌های بالا در بررسی خروجی‌های گرافیکی مشخص شد که بال تیر در بخش کاهش‌یافته‌ی دچار کماتش اندکی شده‌است، همان گونه که در شکل ۵-۴۳ می‌توان دید شیب مثبت نمودار مربوط به اتصال RBS_R در چرخه‌های پایانی کاهش‌یافته ولی هنوز منفی نشده‌است و این نشان می‌دهد که کماتش‌های رخ داده ناچیز هستند. مقایسه نمودارهای مربوط به اتصال RBS (مربوط به مقایسه‌ی صورت گرفته در بخش ۵-۵) و RBS_R نشان می‌دهد که در نمونه‌ی با ظرفیت مقاومتی بالاتر، کماتش‌های بیشتری در چرخش‌های یکسان رخ می‌دهد. دلیل این امر هم بیشتر بودن نیروهای فشاری بال در نمونه‌ی RBS نسبت به نمونه‌ی RBS_R در چرخش‌های یکسان است.

۵-۶-۳. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R

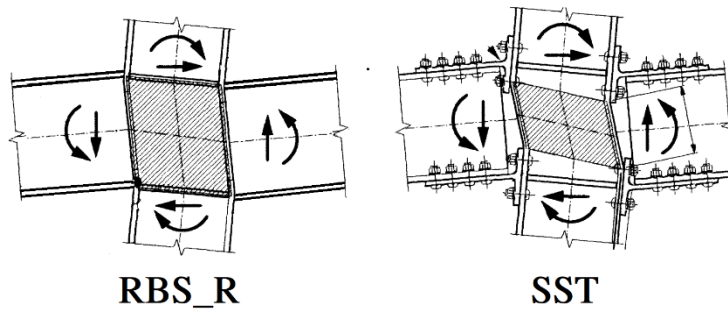
در شکل ۵-۴۵ نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R برابر با روش گفته‌شده در بخش ۳-۱۴ ارائه شده‌است.



شکل ۵-۴۵. نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش چشمه‌ی اتصال‌های SST، SST_R و RBS

در شکل ۵-۴۵ دیده می‌شود که چشمه‌ی اتصال در هر ۲ نمونه همواره کشسان بوده و هیچ گونه تسلیمی در چشمه‌ی اتصال رخ نداده‌است. از دیدگاه سختی، با وجود یکسان بودن تمام ویژگی‌های

هندسی در هر ۲ چشمه‌ی اتصال، سختی گزارش شده برای چشمه‌ی اتصال SST بیشتر از چشمه‌ی اتصال RBS_R می‌باشد. دلیل این نابرابری در سختی، به سازوکار ناهمسان در رفتار این ۲ چشمه‌ی اتصال برمی‌گردد. در شکل ۴۶-۵ می‌توان سازوکار رفتار تغییرشکل در ۲ اتصال SST و RBS_R مشاهده نمود. روشن است که سختی در سازوکار تغییرشکل چشمه‌ی اتصال SST بالاتر خواهد بود.



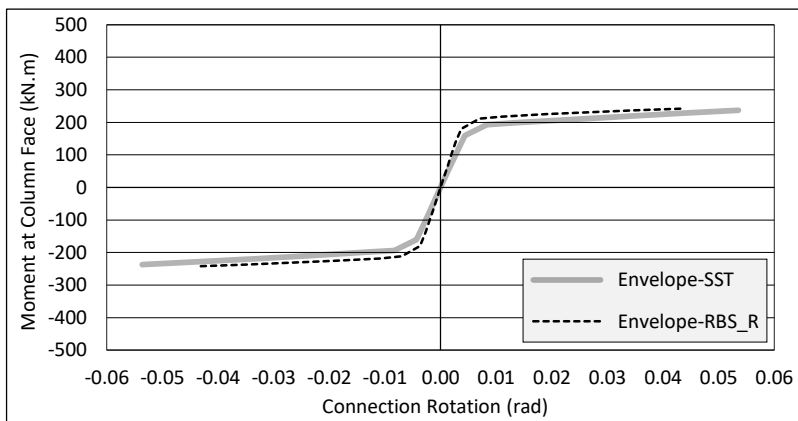
RBS_R

SST

شکل ۴۶-۵. سازوکار تغییرشکل چشمه‌ی اتصال‌های SST و RBS_R

۴-۶-۵. نمودار پوشش نمونه‌های SST و RBS_R

در شکل ۴۷-۵ نمودارهای پوشش ساخته‌شده از نمودارهای چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال نمونه‌های SST و RBS_R ارائه گردیده‌است.

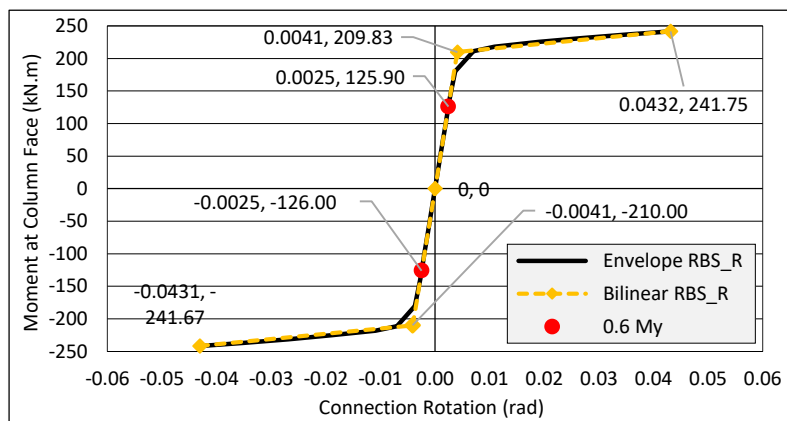


شکل ۴۷-۵. نمودارهای پوشش اتصال SST و RBS_R

همه‌ی نکته‌های گفته‌شده در مورد شکل‌های ۴۳-۵ و ۴۴-۵ را می‌توان در شکل ۴۷-۵ دید.

۵-۶-۵. نمودار دوخطی نمونه‌های SST و RBS_R

در شکل‌های ۴۸-۵ نمودار دوخطی ساخته‌شده از نمودارهای پوشش برای اتصال RBS_R آورده شده‌است. نمودار دوخطی ساخته‌شده از نمودارهای پوشش برای اتصال SST پیش‌تر در شکل ۴۱-۵ ارائه شده‌است.



شکل ۴۸-۵. نمودار پوشش و نمودار دوخطی لنگر-چرخش اتصال RBS_R

در ادامه از نمودار دوخطی ارائه‌شده برای برآورد سختی و شکل‌پذیری استفاده خواهد شد.

۵-۶-۶. ارزیابی سختی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R

در جدول ۱۳-۵ سختی‌های آغازین، تسلیم و مؤثر و همچنین مقدار m برگرفته از سختی‌های گفته‌شده، ارائه شده‌است. همچنین در این جدول دسته‌بندی اتصال‌ها با توجه به بخش ۳-۷ انجام گرفته‌است.

جدول ۱۳-۵. دسته‌بندی سختی در اتصال‌های SST و RBS_R

	$I_{(Link, RBS)}$ (cm ⁴)	K_i (kN.m)	K_y (kN.m)	K_e (kN.m)	m_i	M_y	m_e	Category
SST	9538	37456	36757	37145	15.28	14.99	15.15	PR
RBS_R	14120	51282	48263	51273	14.21	13.37	14.13	PR

همان‌گونه که پیش‌تر گفته‌شد دلیل بالاتر بودن سختی اتصال RBS_R در جدول ۱۲-۵ نسبت به اتصال SST این است که اتصال SST در ماهیت نسبت به اتصال RBS اتصالی با سختی کمتر است.

همچنین به‌خاطر بیشتر بودن لنگر ماند مقطع کاهش یافته در اتصال RBS_R، با وجود بیشتر بودن سختی‌ها، مقدار m برای این اتصال کمتر از اتصال SST به‌دست آمده‌است.

۵-۶-۷. ارزیابی مقاومتی اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R

جدول ۵-۱۴. دسته‌بندی مقاومتی اتصال‌های SST و RBS_R

	$Z_{(Link, RBS)} (cm^3)$	$M_p, (Link, RBS) (kN.m)$	$M_n (kN.m)$	$M_n / M_p, (Link, RBS)$	Category
SST	461.73	179.31	198.67	1.108	Full-strength
RBS_R	805.73	179.31	217.88	1.215	Full-strength

در جدول ۵-۱۴ مقدار M_n برای اتصال SST و RBS_R برابر بخش ۳-۸ از چرخش ۰/۰۲ رادیان (چون نمودار پوشش هر ۲ نمونه همواره افزایشی هستند) برداشت شده‌است. برابر با آئین‌نامه الزامات عمومی AISC هر ۲ اتصال بالا تمام‌مقاوم قلمداد می‌شوند.

۵-۶-۸. ارزیابی شکل‌پذیری اتصال در نمونه‌های SST و RBS_R

شکل‌پذیری ۲ نمونه‌ی با اتصال‌های SST و RBS_R در جدول ۵-۱۵ آورده شده‌است.

جدول ۵-۱۵. شکل‌پذیری نمودار دوخطی اتصال‌های SST و RBS_R

	$\theta_y (rad)$	$\theta_u (rad)$	μ
SST	0.0051	0.0536	10.48
RBS_R	0.0041	0.0431	10.53

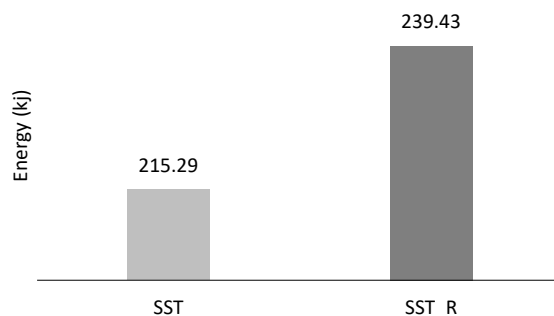
پیش‌تر هم بیان شد که شکل‌پذیری‌های ارائه شده در این پژوهش، شکل‌پذیری استاندارد نمونه‌ها نمی‌باشد.

با ارزیابی جدول ۵-۱۵ و همچنین نگاهی به نتایج جدول ۵-۱۲ می‌توان گفت که برای ۲ اتصال RBS با هندسه‌ی یکسان، نمونه‌ی با فولاد کم مقاومت‌تر برای تیر، شکل‌پذیری بهتری دارد. این رخ‌داد به ۲ دلیل می‌باشد؛ نخست اینکه مقدار θ_y در نمونه‌ی با مقاومت پائین، کمتر خواهد بود، و دوم این‌که به دلیل نیروهای فشاری کمتر در بال مقطع RBS و یکسان بودن ابعاد، کمانش‌ها در چرخه‌های بالاتر رخ می‌دهد؛ و می‌توان انتظار داشت که مقدار کرنش نهایی برای اتصال RBS-R از اتصال RBS بیشتر باشد.

شکل‌پذیری نمونه‌های SST و RBS_R، بسیار مناسب است.

۹-۶-۵. ارزیابی اتلاف انرژی در نمونه‌های با اتصال SST و RBS_R

در شکل ۴۹-۵ اتلاف انرژی ۲ نمونه‌ی با اتصال SST و RBS_R گزارش شده‌است.



شکل ۴۹-۵. اتلاف انرژی نمونه‌های با اتصال SST، SST_R و RBS

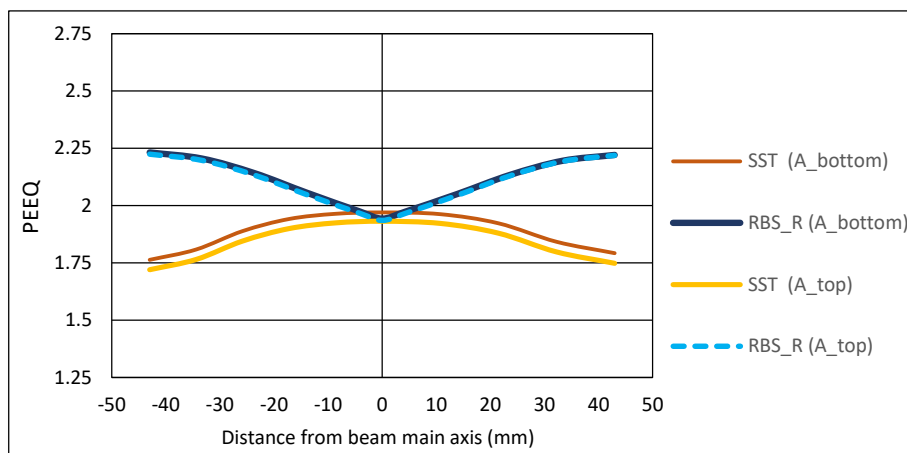
نمونه‌ی با اتصال RBS_R نسبت به نمونه‌ی با اتصال SST بیش از ۱۱٪ اتلاف انرژی بیشتری دارد. همچنین با توجه به شکل‌های ۳۸-۵ و ۴۹-۵ می‌توان گفت که نمونه‌ی با اتصال RBS_R نسبت به نمونه‌ی RBS بیش از ۶٪ کاهش اتلاف انرژی دارد. از آن‌جا که اتلاف انرژی برابر است با سطح زیر نمودار لنگر-چرخش همه‌ی نکته‌های گفته‌شده را می‌توان با مقایسه‌ی نمودارهای لنگر-چرخش هم مشاهده نمود.

۱۰-۶-۵. ارزیابی شناسه‌ی گسیختگی در نمونه‌های SST و RBS_R

برابر با بخش ۳-۱۵ در ادامه به مقایسه‌ی شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل، شناسه‌ی سه‌محوری و شناسه‌ی گسیختگی بر روی ۲ خط نشان داده‌شده در شکل ۳۶-۵ در میانه‌ی ضخامت ساق پیوند تسلیمی بالا و پائین در نمونه‌ی با اتصال SST و میانه‌ی ضخامت بال بالا و پائین تیر در نمونه‌ی با اتصال RBS پرداخته شده‌است. همچنین در این بخش به دلیل نابرابری در ویژگی‌های مصالح برای روشن‌تر شدن مقایسه پیش از ارائه‌ی شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل، مقدار کرنش پلاستیک معادل ارائه

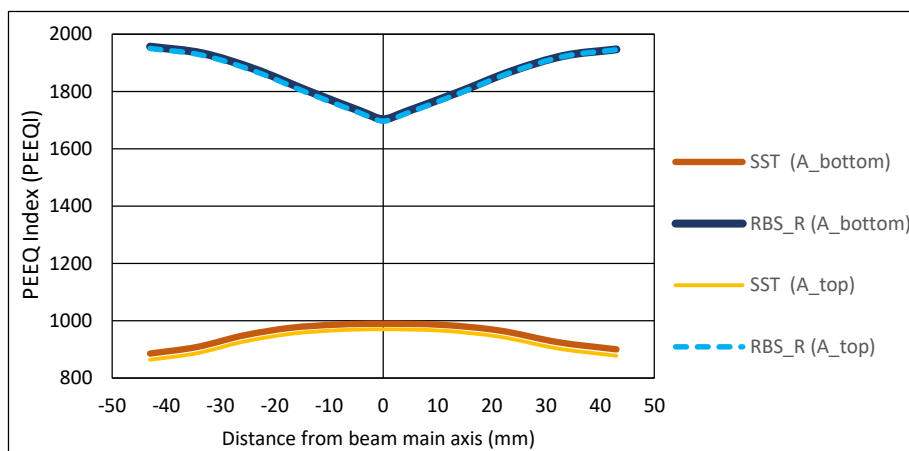
گردیده‌است. بایستی دوباره گفته‌شود که تمامی نمودارهای ارائه‌شده در این بخش مربوط به پیشینه چرخش مثبت در چرخه‌ی دوم دامنه‌ی پایانی بارگذاری است.

در شکل ۵-۵۰ نمودارهای کرنش پلاستیک معادل برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



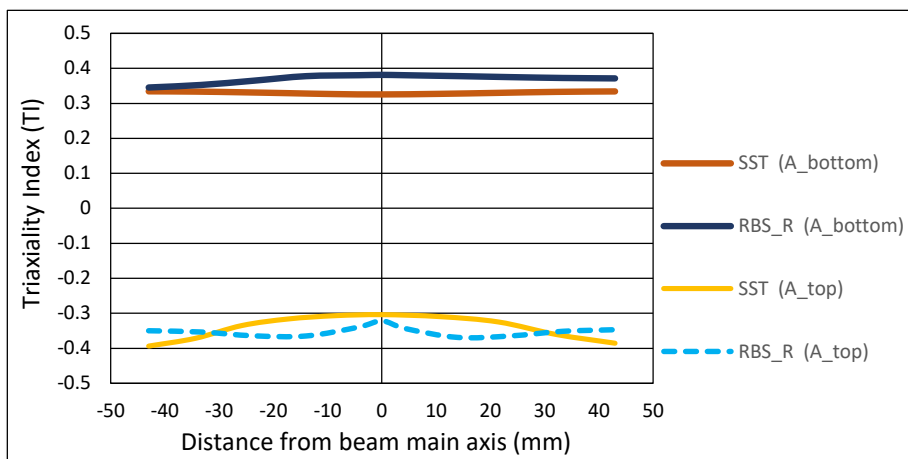
شکل ۵-۵۰. نمودار کرنش پلاستیک معادل برای خط A

در شکل ۵-۵۱ نمودارهای شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



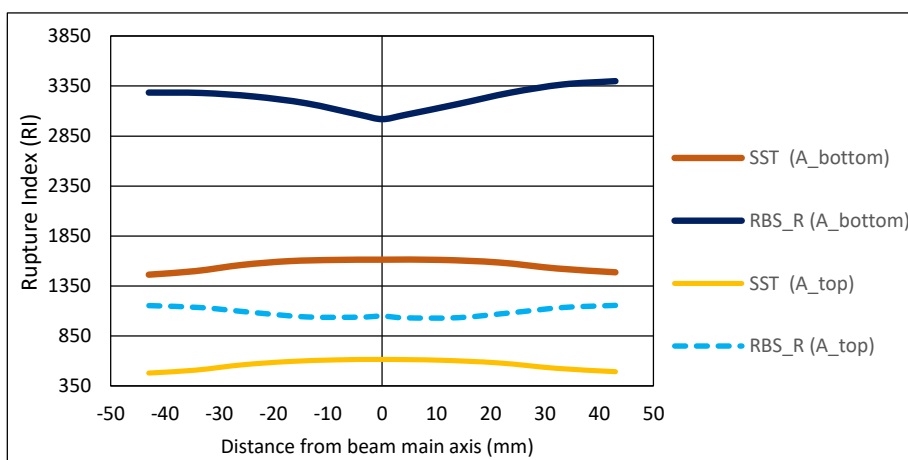
شکل ۵-۵۱. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط A

در شکل ۵-۵۲ نمودارهای شناسه‌ی سه‌محوری برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



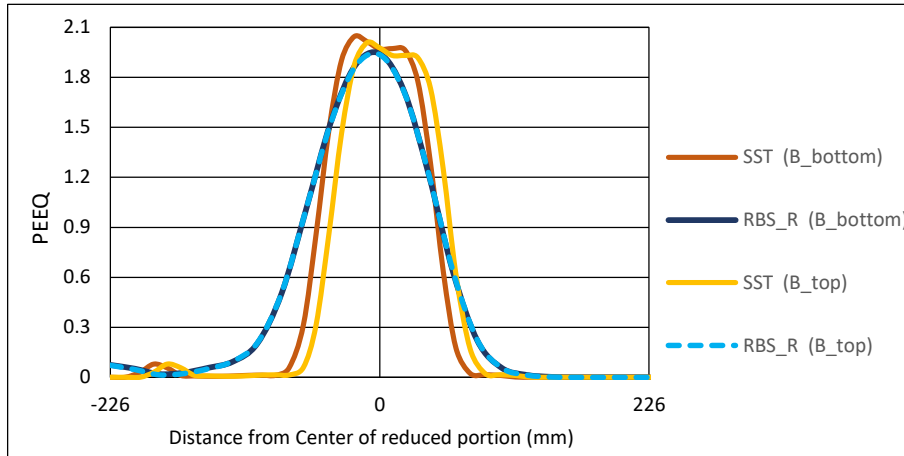
شکل ۵-۵۲. نمودار شناسه‌ی سه‌محوری برای خط A

در شکل ۵-۵۳ نمودارهای شناسه‌ی گسیختگی برای خط A در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



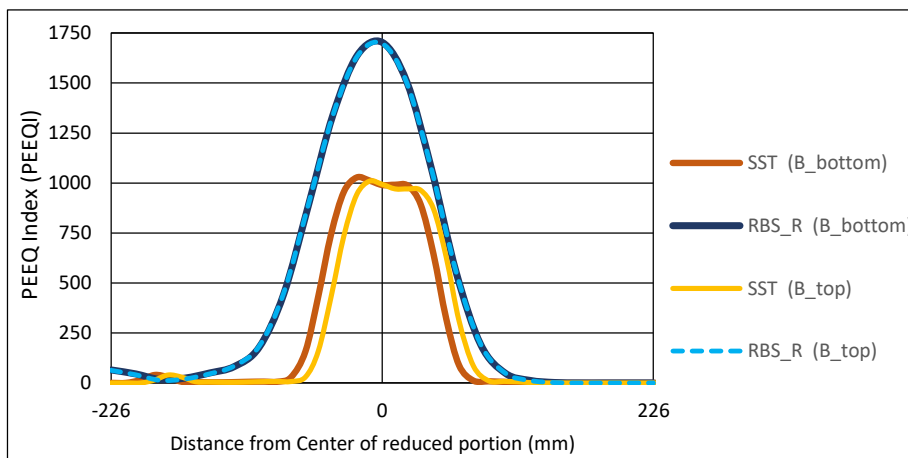
شکل ۵-۵۳. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط A

در شکل ۵-۵۴ نمودارهای کرنش پلاستیک معادل برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



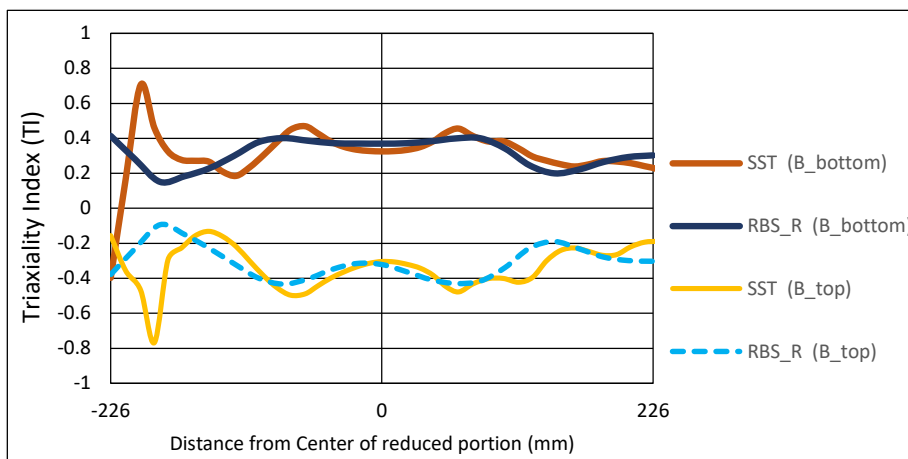
شکل ۵-۵۴. نمودار کرنش پلاستیک معادل برای خط B

در شکل ۵-۵۵ نمودارهای شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



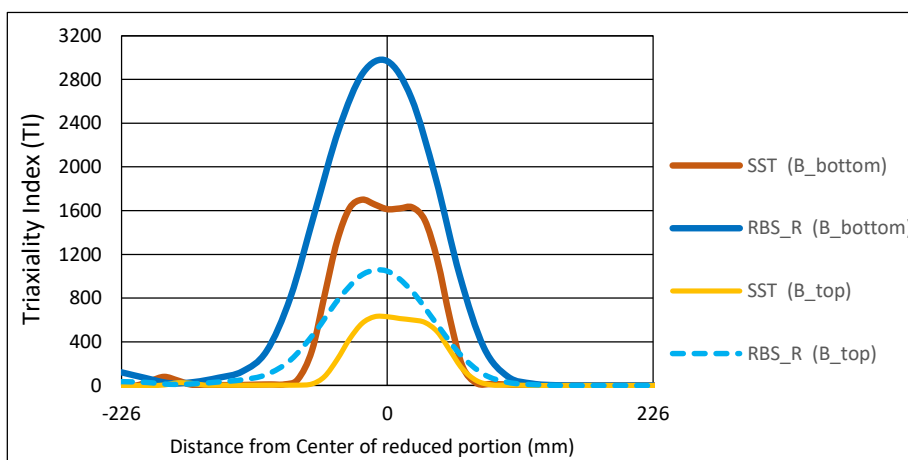
شکل ۵-۵۵. نمودار شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B

در شکل ۵۶-۵ نمودارهای شناسه‌ی سه‌محوری برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



شکل ۵-۵۶. نمودار شناسه‌ی سه‌محوری برای خط B

در شکل ۵۷-۵ نمودارهای شناسه‌ی گسیختگی برای خط B در هر ۲ بخش فشاری و کششی برای نمونه‌های SST و RBS_R، نمایش داده شده‌است.



شکل ۵-۵۷. نمودار شناسه‌ی گسیختگی برای خط B

در شکل‌های ۵-۵۰ و ۵-۵۱ مشاهده می‌شود که سازوکار رفتار کرنشی ۲ اتصال RBS_R و SST بروی خط A به‌طور کامل باهم متفاوت است به‌گونه‌ای که در اتصال SST بیشترین کرنش‌ها (و شناسه‌ی کرنش) در میانه‌ی مقطع عرضی رخ می‌دهد در صورتی که در اتصال RBS_R این اتفاق در کناره‌های مقطع عرضی بخش کاهش یافته (به دلیل کمانش‌های موضعی) رخ می‌دهد. نکته‌ی دیگر که در شکل ۵-۵۰ و ۵-۵۱ دیده می‌شود این است که با وجود اینکه مقدار کرنش‌های پلاستیک معادل در ۲ نمونه باهم اختلاف بسیار زیادی ندارند ولی به دلیل مقاومت تسلیم و در پی آن کرنش تسلیم کمتر در اتصال RBS_R، میزان اختلاف نمودارهای شناسه‌ی کرنش معادل در ۲ نمونه، نابرابری زیادی پیدا کرده‌اند.

در مجموع به‌طور کلی در مورد مقایسه میان ۲ نمونه‌ی RBS_R و SST می‌توان گفت که بیشترین شاخص گسیختگی مربوط به کناره‌های بال فشاری مقطع RBS_R می‌باشد همچنین بیشترین شناسه‌ی گسیختگی اتصال SST در میانه‌ی بخش کاهش یافته رخ می‌دهد و مهم‌ترین نکته بالاتر بودن ۵۳٪ شناسه‌ی گسیختگی در اتصال RBS-R نسبت به اتصال SST می‌باشد.

۶. نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۶. پیش گفتار

در فرجام این پایان نامه و پس از ارائه دست آوردهای پژوهش در فصل پیشین و بحث، کنکاش و تفسیر این دست آوردها؛ اکنون در این فصل به ارائه دست آوردهای این پژوهش به صورت فشرده و تیتروار پرداخته خواهد شد.

۲-۶. نتایج رفتار لرزه ای نمونه های ۵ گانه ی نخست

۱. همه ی نمونه های ۵ گانه ی نخست توانسته اند بایستگی های عمومی پیش پذیرفتگی برای سازه های ویژه و متوسط را برآورده سازند؛
۲. در همه ی نمونه های ۵ گانه ی نخست بین ۰/۰۴۹ تا ۰/۰۵۱ رادیان از ۰/۰۶ رادیان چرخش داده شده به نمونه، در محدوده ی اتصال رخ داده است و بقیه ی چرخش در تیر و ستون خارج از محدوده ی اتصال اتفاق افتاده است؛
۳. در نمونه های ۵ گانه ی نخست تنها نمونه ی نخست رفتار کمابیش کشسانی در چشمه ی اتصال از خود نشان داده است و دیگر نمونه ها به ویژه نمونه های چهارم و پنجم تسلیم های قابل ملاحظه ای را در چشمه ی اتصال تجربه کرده اند؛
۴. نمودار پوشش در همه ی نمونه های ۵ گانه ی نخست نشان می دهد که هیچ کدام از نمونه ها دچار زوال مقاومت نشده اند و نمودار پوشش همواره روند فزاینده ای داشته است؛

۵. نمودار پوشش در همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست تا اندازه‌ی زیادی به نمودار ایده‌آل دوخطی همانند هستند. که نشان‌دهنده‌ی این ویژگی اتصال است که کاهش سختی اتصال به‌طور کامل ناشی از تسلیم بخش تسلیم‌شونده‌ی پیوند تسلیمی است؛

۶. همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار قرار دارند؛

۷. در همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست سختی‌های آغازین، تسلیم و مؤثر، کمایش یکسان هستند؛ و

۸. همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست در دسته‌ی اتصال‌های تمام‌مقاوم قرار می‌گیرند.

۳-۶. نتایج رفتار لرزه‌ای نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم

در نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم که تفاوت‌شان نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست در پیش‌تندگی بیشینه در پیچ‌های بال پیوند تسلیمی است، یافته‌های زیر به‌دست آمده‌است:

۱. پیش‌تندگی بیشینه، در پیچ‌های بال پیوند تسلیمی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم، باعث افزایش ۱۱ تا ۱۲ درصدی انواع مختلف سختی نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست شده‌است؛

۲. همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار هستند؛

۳. پیش‌تندگی بیشینه، در پیچ‌های بال پیوند تسلیمی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم، اثر ناچیزی (کمتر از ۱ درصد) در افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی نخست دارد؛ و

۴. همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در دسته‌ی اتصال‌های تمام‌مقاوم هستند.

۴-۶. نتایج رفتار لرزه‌ای نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم

در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم که تفاوت‌شان نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم در استفاده از ورق مضاعف برای تقویت چشمه‌ی اتصال است، نتایج زیر به‌دست آمده‌است:

۱. رفتار چشمه‌ی اتصال همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم به‌طور کامل کشسان است؛

۲. به کارگیری ورق مضاعف برای تقویت چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم، باعث افزایش ۱۰ تا ۱۴ درصدی انواع گوناگون سختی نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم شده‌است؛
۳. همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار هستند. گرچه اتصال نمونه‌های یازدهم و دوازدهم به آستانه‌ی اتصال گیردار بسیار نزدیک شده‌اند؛
۴. به کارگیری ورق مضاعف برای تقویت چشمه‌ی اتصال در نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم، اثر ناچیزی (کمتر از ۱ درصد) در افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های ۵ گانه‌ی دوم دارد؛ و
۵. همه‌ی نمونه‌های ۵ گانه‌ی سوم در دسته‌ی اتصال‌های تمام‌مقاوم هستند.

۵-۶. نتایج مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ای اتصال‌های SST، SST_R و RBS

در مقایسه‌ی این بخش یک اتصال RBS همسان‌سازی شده از دیدگاه هندسه‌ی مقطع کاهش یافته (بال تیر) با اتصال SST (نمونه‌ی پانزده) و یک اتصال SST اصلاح شده (SST_R) که در آن بال پیوند تسلیمی حذف شده و ساق پیوند تسلیمی به صورت مستقیم به بال ستون وصل شده‌است، نسبت به هم ارزیابی شده‌اند که نتایج آن به این شکل است:

۱. میزان ظرفیت مقاومتی اتصال RBS نسبت به ۲ اتصال SST و SST_R بالاتر بوده و در مقابل ظرفیت چرخشی آن کمتر از ۲ اتصال SST و SST_R می‌باشد؛
۲. نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش ۲ اتصال SST و SST_R هیچ گونه کاهشی را تجربه نکرده و همواره روند فزاینده داشته‌اند. در مقابل نمودار چرخه‌ای لنگر-چرخش اتصال RBS در ۳ چرخه‌ی پایانی خود روند نزولی را طی کرده‌است؛
۳. رفتار لرزه‌ای چشمه‌ی اتصال در اتصال SST و SST_R به طور کامل کشسان است، در صورتی که چشمه‌ی اتصال در اتصال RBS تسلیم را تجربه کرده‌است؛
۴. سختی اتصال RBS نسبت به ۲ اتصال SST و SST_R بیشتر است؛
۵. هر ۳ اتصال SST، SST_R و RBS در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار قرار دارند؛

۶. هر ۳ اتصال SST، SST_R و RBS در دسته‌ی اتصال‌های تمام‌مقاوم قرار دارند؛
۷. نمودارهای شناسه‌ی کرنش پلاستیک معادل برای خط B نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر کرنش پلاستیک در بخش کاهش‌یافته‌ی اتصال SST، SST_R و RBS رخ می‌دهد؛ و
۸. نمودارهای شناسه‌ی سه‌محوری برای خط B نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش سه‌محوره در قسمت اتصال ساق پیوند تسلیمی به بال آن روی می‌دهد.

۶-۶. نتایج مقایسه‌ی رفتار لرزه‌ای اتصال‌های SST و RBS_R

در این بخش مقایسه‌ای میان اتصال SST (نمونه‌ی پانزدهم) و اتصال RBS اصلاح‌شده نسبت به مقایسه‌ی پیشین (RBS_R) انجام شده است. اصلاح اتصال RBS به این شکل انجام گرفته که لنگر پلاستیک مقطع کاهش‌یافته‌ی اتصال RBS_R با کاهش مقاومت مصالح با لنگر پلاستیک اتصال SST برابر شود و همچنین ابعاد مقطع کاهش‌یافته هم همانند مقایسه‌ی پیشین همسان هستند. نتایج این مقایسه در ادامه آورده شده است:

۱. عملکرد کلی نمونه‌ی با اتصال RBS_R به نمونه‌ی با اتصال SST همانندی‌های زیادی دارد اما اندکی از دیدگاه سختی و مقاومت عملکرد بالاتری از خود نشان داده است؛
۲. نمودار پوشش هر ۲ اتصال RBS_R و SST همواره افزایشی بوده و هیچ‌گونه کاهشی در آنها رخ نداده است؛
۳. چشمه‌ی اتصال در هر ۲ اتصال RBS_R و SST رفتار همواره کشسان داشته‌اند؛
۴. سختی چشمه‌ی اتصال در اتصال SST بیشتر از اتصال RBS_R است؛
۵. سختی اتصال RBS_R نسبت به اتصال SST بیشتر است در صورتی که مقدار m آن نسبت به اتصال SST کمتر است؛
۶. اتصال RBS_R در دسته‌ی اتصال‌های نیمه‌گیردار است؛
۷. اتصال RBS_R در دسته‌ی اتصال‌های تمام‌مقاوم است؛
۸. اتلاف انرژی در نمونه‌ی با اتصال RBS_R، ۱۱٪ بیشتر از نمونه‌ی با اتصال SST است؛ و

۹. بیشینه شناسه‌ی گسیختگی بر روی خط‌های A و B در ۲ اتصال RBS_R و SST در کناره‌ی بال فشاری اتصال RBS رخ می‌دهد.

۶-۷. پیشنهادها

پس از انجام این پژوهش و آشنائی با ریز نکته‌های اتصال SST برای پژوهش‌های آینده پیشنهادهایی ارائه می‌شود:

۱. بررسی رفتار کُلی سازه‌های با اتصال SST همراه با نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در ایران، برابر با FEMA P-795 و FEMA P-350 برای درک فراگیر از رفتار این اتصال در سازه‌ای با نیم‌رخ‌های پُر کاربرد در ایران.
۲. بررسی رفتار اتصال تیر به ستون با تیرهای زاویه‌دار در صفحه و خارج از صفحه برای اتصال SST؛
۳. بررسی رفتار اتصال SST با ستون‌های قوطی شکل با بهره‌گیری از Beam_Stub؛
۴. بررسی پارامترهای هندسی اتصال SST به‌ویژه پیوند تسلیمی و سیستم کمانش گیر در آن؛ و
۵. مقایسه‌ی فراگیر میان اتصال SST و RBS.
۶. توسعه‌ی ایده‌ی پیوند تسلیمی و سازوکار کمانش گیر به کار رفته در اتصال SST در اتصال‌های نو با پیکربندی‌های خلاقانه در راستای رسیدن به اتصالی با همین شکل‌پذیری بالا به همراه ظرفیت مقاومتی و سختی بالاتر.

مرجع‌ها

- [1] R. H.-C. 2016: S. E. and P. and U. 2016, "Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-16," ascelibrary.org.
- [2] T. Paulay and M. Priestley, "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings", 1992.
- [۳] آیین‌نامه اتصالات در سازه‌های فولادی، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور پشتیبانی، مرکز مدارک علمی و انتشارات، ۱۳۸۴.
- [۴] "آشنایی با مفهوم سخت‌شوندگی: شناخت انواع آن و نحوه مدل‌سازی در آباکوس" [Online]. Available: <https://www.3ds.ir/hardening-definition-and-applying-in-abaqus/>. [Accessed: 28-Aug-2019].
- [۵] علیرضا رضائیان و نیلوفر بهبود، اتصالات پیش‌پذیرفته: برای قاب‌های فولادی ویژه و متوسط در کاربردهای لرزه‌ای، سروش دانش، ۱۳۹۶.
- [6] D. M.-E. Structures and undefined 1998, "Lessons learned from the Northridge earthquake," Elsevier.
- [7] S. M.-E. structures and undefined 1998, "Lessons from damage to steel buildings during the Northridge earthquake," Elsevier.
- [8] R. Tremblay, A. Filiatrault, ... P. T.-C. J. of, and undefined 1995, "Performance of steel structures during the 1994 Northridge earthquake," NRC Res. Press.
- [9] N. F. G. Youssef and J. L. Gross, "A survey of steel moment-resisting frame buildings affected by the 1994 Northridge Earthquake," Gaithersburg, MD, 1995.
- [10] S. Venture and G. D. Committee, Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings. 2000.

- [11] K. Tsai and E. P. Popov, "Cyclic Behavior of End-Plate Moment Connections," J. Struct. Eng., vol. 116, no. 11, pp. 2917–2930, Nov. 1990.
- [12] H. Seradj, "Ductile end-plate connections utilizing plate yielding," 1997.
- [13] B. T. Adey, G. Y. Grondin, and J. J. Cheng, "Cyclic loading of end plate moment connections," Can. J. Civ. Eng., vol. 27, no. 4, pp. 683–701, Aug. 2000.
- [14] G. Shi, Y. Shi, Y. Wang, M. B.-E. Structures, and undefined 2008, "Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details," Elsevier.
- [15] Y. Chen, S. W.-J. of C. S. Research, and undefined 2009, "Research on end-plate connection with non-completely penetrated welds," Elsevier.
- [16] N. Kishi, A. Ahmed, N. Yabuki, and W. F. Chen, "Nonlinear finite element analysis of top-and seat-angle with double web-angle connections," Struct. Eng. Mech., vol. 12, no. 2, pp. 201–214, Aug. 2001.
- [17] M. Gerami, H. Saberi, V. Saberi, A. D.-J. of C. Steel, and undefined 2011, "Cyclic behavior of bolted connections with different arrangement of bolts," Elsevier.
- [18] K. Kasai, I. Hodgson, D. B.-E. structures, and undefined 1998, "Rigid-bolted repair method for damaged moment connections," Elsevier.
- [19] S. E. Pryor and T. M. Murray, "Next Generation Partial Strength Steel Moment Frame Connections for Seismic Resistance," in 1st Australasia and South East Asia Conference in Structural Engineering and Construction, 2012.
- [۲۰] ا. گریوانی, "بررسی و بهبود عملکرد لرزه ای اتصال صلب خمشی کایزر, برای مقاطع فولادی رایج در ایران," دولتی - وزارت علوم, تحقیقات, و فناوری - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی عمران, ۱۳۹۴.
- [۲۱] م. مقیمی, "بررسی و بهبود عملکرد لرزه ای اتصال صلب خمشی کان ایکس ال, برای مقاطع فولادی رایج در ایران," دولتی - وزارت علوم, تحقیقات, و فناوری - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی عمران, ۱۳۹۴.
- [22] J. Kiani and M. G.-5th W. C. on S. C. and, "Assessment Cyclic Behavior and Determine the RBS Connection Flexibility," researchgate.net.
- [23] V. Bertero, H. Krawinkler, and E. Popov, "Further studies on seismic behavior of steel beam-to-column subassemblages, Rep ", 1973.

- [24] "Abaqus 6.14 Documentation." [Online]. Available: <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/texis/search/?query=wetting&submit.x=0&submit.y=0&group=bk&CDB=v6.14>. [Accessed: 28-Aug-2019].
- [25] I. ABAQUS, "Abaqus documentation," Version, vol. 6, pp. 1–5, 2014.
- [26] A. Khalifeh, A. Banaraki, ... H. M.-M. S. and, and undefined 2018, "Investigating of the tensile mechanical properties of structural steels at high strain rates," Elsevier.
- [27] A. Hedayat, E. Afzadi, A. I.- Structures, and undefined 2017, "Prediction of the bolt fracture in shear using finite element method," Elsevier.
- [28] A. ANSI, "360–16.(2016)," Specif. Struct. steel Build.
- [29] F. Danesh, E. M.-I. J. of Steel, and undefined 2018, "Experimental Investigation of T-Stub Link-to-Column Connections in Eccentrically Braced Frames," Springer.
- [30] T. Okazaki, "Seismic performanc of link-to-column connections in steel eccentrically braced frames",.
- [31] P. Arasaratnam, K. S. Sivakumaran, and M. J. Tait, "True Stress-True Strain Models for Structural Steel Elements," ISRN Civ. Eng., vol. 2011, pp. 1–11, Aug. 2011.
- [32] FEMA, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (Fema 356)," Washington DC, 2000.
- [33] A. S. of C. Engineers, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings: ASCE/SEI, 41-17," 2017.
- [34] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [35] FEMA, "Quantification of building seismic performance factors: Component equivalency methodology," 2011.
- [36] Nakamura H, Maeda Y, Sasaki T. Fatigue properties of practical-scale unbonded braces. Architectural Institute of Japan; 2000. Miner MA. Cumulative damage in fatigue. J Appl Mech 1945;12:159–64.
- [37] Mirtaheri M, Gheidi A, Zandi AP, Alanjari P, Samani HR. Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces. J Constr Steel Res 2011;67:1244–53

پیوست

برای آشنائی بیشتر با روند و بندهای آئین نامه ای اتصال های پیش پذیرفته، در پیوست این پژوهش به صورت فراگیر به بررسی روند پیش پذیرفتگی اتصال، حدود و بایستگی های آن پرداخته خواهد شد.

پ-۱. روش های طراحی اتصال های گیردار

قاب خمشی یکی از سیستم های سازه ای فولادی بوده که کم ترین محدودیت را برای هماهنگی با نقشه های معماری از خود نشان داده و شکل پذیری سازه ای چشمگیری دارد. گسترش شکل پذیری این سیستم، به عنوان ابزاری مناسب برای استهلاک انرژی زمین لرزه، به رفتار و عملکرد اتصال های تیر به ستون وابسته است. سابقه ای آسیب های شدید این اتصال در زمین لرزه های نرث ریج و کوبه^۱ در سال های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵، منجر به تغییرات گسترده در طراحی این اتصال ها شد.

در حال حاضر برای طراحی لرزه ای یک اتصال گیردار در قاب های خمشی ویژه و متوسط، یکی از ۳ انتخاب زیر، بدون توجه به جزئیات اتصال، در ضوابط لرزه ای AISC ارائه شده است.

۱. استفاده از اتصالاتی که برابر با "اتصال های پیش پذیرفته، برای قاب های خمشی ویژه و متوسط برای کاربردهای لرزه ای- استاندارد ۳۵۸"^۲ طراحی شده اند؛

۲. استفاده از اتصال های پیش پذیرفته مطابق با بخش K1 از ضوابط لرزه ای AISC و

¹ Kobe

² Prequalified Connections for Special and Intermediate Moment Frames for Seismic Application, ANSI/AISC 358-16

۳. آزمایش چرخه‌ای پذیرش^۱ برابر با بخش K2 از ضوابط لرزه‌ای AISC. برای این منظور نتایج حداقل ۲ آزمایش چرخه‌ای اتصال باید تهیه شود که می‌تواند بر پایه‌ی یکی از حالت‌های زیر باشد:

آ. آزمایش‌های گزارش شده در نشریات تحقیقاتی یا آزمایش‌های ثبت و اجرا شده‌ی دیگر با پروژه‌ها که شرایط پروژه‌ی مورد بررسی را مطابق با محدودیت‌های تعیین شده در بخش K2 از ضوابط لرزه‌ای AISC دارد.

ب. آزمایش‌هایی که به طور ویژه برای یک پروژه با محدودیت‌های تعیین شده در بخش K2 ضوابط لرزه‌ای AISC انجام شده‌اند و نشان دهنده‌ی ابعاد عضوها، مقاومت‌های مصالح، پیکربندی‌های اتصال پروژه هستند و با عملکردهای اتصال هم‌خوانی دارند. اگر این گمان وجود داشته باشد که آزمایشی ویژه‌ی یک پروژه ممکن است بهره‌وری اقتصادی داشته باشد، این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد (یا هنگامی که هیچ کدام از حالت‌های پیش‌پذیرفته برای پروژه، کاربردی نباشد).

فصل K از ضوابط لرزه‌ای AISC به ارائه‌ی شرایط پیش‌پذیرفتگی اتصال‌های تیربه‌ستون (K1) و آزمایش‌های چرخه‌ای برای پذیرش این اتصال‌ها (K2) می‌پردازد.

پ-۱-۱. پیش‌پذیرفتگی اتصال‌های تیربه‌ستون (ضوابط لرزه‌ای AISC بخش K1)

پ-۱-۱-۱. حدود کاربرد (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.1)

این بخش الزامات حداقلی برای پیش‌پذیرفتگی اتصال‌های تیربه‌ستون در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط را شامل می‌شود. استفاده از اتصال‌های پیش‌پذیرفته در صورت رعایت محدودیت‌های کاربردی پیش‌پذیرفتگی، بدون نیاز به انجام آزمایش‌های چرخه‌ای پذیرش بیشتر، مجاز است. در مواردی که محدودیت‌های پیش‌پذیرفتگی یا الزامات طراحی برای اتصال‌های پیش‌پذیرفته با الزامات

¹ Qualifying Cyclic Test

ضوابط لرزه‌ای AISC تداخلی داشته باشد، محدودیت‌های پیش‌پذیرفتگی و الزامات طراحی اتصال‌های پیش‌پذیرفته شده حاکم خواهد بود.

پ-۱-۲. الزامات عمومی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.2)

پ-۱-۲-۱. اصول پیش‌پذیرفتگی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.2.2a)

اتصال‌ها باید بر مبنای نتایج آزمایشی که بتوانند شرایط بند "الزامات آزمایشی" (K1.3) را برآورده نمایند، به پشتوانه‌ی مطالعات تحلیلی و مدل‌های طراحی، پیش‌پذیرفته شوند. فرآیند ترکیبی اثبات پیش‌پذیرفتگی، باید برای اطمینان از این که اتصال می‌تواند براساس مبانی مستحکم و قابل اطمینان، مطابق با محدودیتهای تعیین شده‌ی پیش‌پذیرفتگی، زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه‌ی لازم را برای قاب‌های خمشی ویژه و متوسط تأمین نماید، کافی باشد. همه‌ی حالت‌های حدی کاربردی برای اتصال‌ها که سختی، مقاومت و ظرفیت تغییرشکل اتصال و سیستم مقاوم در برابر نیروهای لرزه‌ای (SFRS)^۱ را تحت تأثیر قرار می‌دهد، باید تعیین شوند. این حالت‌های حدی، حالت‌های حدی مرتبط با گسیختگی، حالت‌های حدی مربوط با پایداری و حالت حدی دیگر مربوط به اتصال مورد نظر را شامل می‌شود. برای پیش‌پذیرفتگی اتصال باید به تأثیر مقادیر طراحی مندرج در بند K1.4 توجه گردد.

پ-۱-۲-۲. صلاحیت برای پیش‌پذیرفتگی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.2.2b)

پیش‌پذیرفتگی اتصال و محدودیت‌های مربوط به پیش‌پذیرفتگی باید توسط کمیته‌ی بررسی پیش‌پذیرفتگی اتصال "CPRP"^۲، که مرجع دارای صلاحیت^۳ آن را تأیید نموده است، تصویب گردد.^۴

پ-۱-۳. الزامات آزمایش (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.3)

اطلاعاتی که برای اثبات پیش‌پذیرفتگی اتصال استفاده می‌شود، باید بر مبنای آزمایش‌های انجام شده بر اساس بخش K2 باشند. CPRP باید تعداد آزمایش‌ها و متغیرهای مفروض در آزمایش‌ها را

^۱ Seismic Force Resisting System (SFRS)

^۲ Connection Prequalification Review Panel (CPRP)

^۳ Authority Having Jurisdiction

^۴ تا کنون چنین مرجعی در ایران تعریف نشده است.

برای پیش پذیرفتگی اتصال تعیین نماید. همچنین هنگامی که محدودیت‌های یک اتصال پیش‌پذیرفته‌ی پیشین، تغییر می‌کنند، CPRP باید اطلاعات مشابهی را تأمین نماید. به منظور احراز توانایی و قابلیت تحمل زاویه‌ی تغییر شکل نسبی در اتصال طبقه برای قاب‌های خمشی ویژه و متوسط، باید تعداد کافی آزمایش بر روی تعداد کافی نمونه‌ی غیر یکسان انجام شود.

پ-۱-۴. متغیرهای پیش‌پذیرفتگی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.4)

برای پیش‌پذیرفتگی، تأثیر متغیرهای زیر بر عملکرد اتصال باید در نظر گرفته شود. در اتصال پیش‌پذیرفته، محدودیت‌های مقادیر مجاز برای هر متغیر باید توسط CPRP تصویب گردد.

پ-۱-۴-۱. پارامترهای تیر (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.4a)

۱. شکل سطح مقطع: بال پهن، قوطی یا سایر موارد ممکن؛

۲. روش ساخت سطح مقطع: شکل نوردشده، شکل جوشی یا سایر موارد ممکن؛

۳. عمق؛

۴. وزن واحد طول؛

۵. ضخامت بال؛

۶. مشخصات مصالح؛

۷. نسبت دهانه به عمق (برای قاب خمشی ویژه یا متوسط)؛

۸. نسبت عرض به ضخامت برای المان‌های سطح مقطع؛

۹. مهار جانبی؛ و

۱۰. سایر پارامترهای مربوط به اتصال مورد بررسی.

پ-۱-۴-۲. پارامترهای ستون (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.4b)

۱. شکل سطح مقطع: بال پهن، قوطی یا سایر موارد ممکن؛

۲. روش ساخت سطح مقطع: شکل نوردشده، شکل جوشی یا سایر موارد ممکن؛

۳. جهت‌گیری ستون در مقایسه با تیر: تیر به بال ستون متصل است، تیر به جان ستون متصل است، تیرها به بال و جان ستون متصل شده‌اند، یا سایر موارد ممکن؛
 ۴. عمق؛
 ۵. وزن واحد طول؛
 ۶. ضخامت بال؛
 ۷. مشخصات مصالح؛
 ۸. نسبت عرضی به ضخامت برای المان‌های سطح مقطع؛
 ۹. مهار جانبی؛ و
 ۱۰. سایر پارامترهای مربوط به اتصال مورد بررسی.
- پ-۱-۴-۳. ارتباط تیر به ستون (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K14.4c)
۱. مقاومت چشمه‌ی اتصالی؛
 ۲. جزئیات اتصال ورق مضاعفه؛ و
 ۳. نسبت لنگر ستون به تیر.
- پ-۱-۴-۴. ورق‌های پیوستگی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K14.4d)
۱. تعیین شرایطی که تحت آنها به ورق‌های پیوستگی نیاز است؛
 ۲. ضخامت، عرض و عمق؛ و
 ۳. جزئیات اتصال.
- پ-۱-۴-۵. جوش‌ها (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K14.4e)
۱. محل قرارگیری، اندازه (شامل برگشت‌ها)، نوع (شیاری با نفوذ کامل، شیاری با نفوذ گوشه، غیره) و هرگونه الزام تقویت و طراحی؛
 ۲. مقاومت رده‌بندی فلز پرکننده و طاق زخم؛

۳. جزئیات و عملکرد پشت‌بندهای جوش و ناودانی‌های انتهایی جوشی؛
۴. سوراخهای دسترسی جوشی؛ و
۵. کنترل کیفیت و تضمین کیفیت جوشکاری فراتر از آنچه در فصل J آمده است، روش‌های غیرمخرب، فرکانس بررسی، معیارهای پذیرش و الزامات مدارک.

پ-۱-۴-۶. پیچ‌ها (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.4.4f)

۱. قطر پیچ؛
۲. رده‌ی پیچ: A325، A325M، A490، A490M یا سایر موارد ممکن؛
۳. الزامات نصب: پیش‌تیدگی، "سفت‌شدگی اولیه" و سایر موارد ممکن؛
۴. نوع سوراخ: استاندارد، بزرگ‌شده، لوبیائی کوتاه، لوبیائی بلند یا سایر موارد ممکن؛
۵. روش ساخت سوراخ: مته‌کاری، منگنه کردن، ایجاد منگنه‌های فرعی و گشاد کردن (برق‌زدن) یا سایر موارد ممکن؛ و
۶. سایر پارامترهای مربوط به اتصال مورد بررسی.

پ-۱-۴-۷. روش اجرا (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.4.4g)

تمام پارامترهای اجرا که از الزامات RCSC، AISC و AWS تجاوز می‌کند، مربوط به اتصال مورد بررسی، مطابق زیر:

۱. زبری سطح لبه‌های برش حرارتی یا سنگ‌زنی شده؛
۲. رواداری‌های برش؛ و
۳. وجود سوراخ‌ها، بست‌ها یا جوش‌ها برای اتصال.

پ-۱-۴-۸. جزئیات اضافی اتصال (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.4.4h)

تمام متغیرهای مربوط به اتصال مورد بررسی که توسط CPRP تصویب شده‌اند.

¹ Snugtight

پ-۱-۵. فرآیند طراحی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.5)

باید برای اتصال پیش‌پذیرفته، فرآیند طراحی قابل درک موجود باشد. فرآیند طراحی باید به تمام حالت‌های حدی کاربردی مطابق با محدودیت‌های پیش‌پذیرفتگی اشاره داشته باشد.

پ-۱-۶. گواهی پیش‌پذیرفتگی (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K1.6)

یک اتصال پیش‌پذیرفته باید گواهی مکتوب پیش‌پذیرفتگی با اطلاعات زیر داشته باشد:

۱. تشریح عمومی اتصال پیش‌پذیرفته و نقشه‌هایی که به وضوح خصوصیات کلیدی و اجزای اتصال را معرفی نماید؛
۲. تشریح رفتار قابل انتظار اتصال در دامنه‌های رفتار کشسان و غیرکشسان، محل (های) مورد انتظار به عمل غیرکشسان و تشریح حالت‌های حدی کنترل‌کننده مقاومت و ظرفیت تغییر شکل اتصال؛
۳. فهرست سیستم‌هایی که اتصال برای آن‌ها پیش‌پذیرفته شده است: قاب خمشی ویژه، متوسط یا قاب مهاربندی‌شده‌ی واگرا؛
۴. فهرست محدودیت‌های تمامی متغیرهای پیش‌پذیرفتگی فهرست‌شده در بند K1.4؛
۵. فهرست جوش‌های نیاز بحرانی^۱؛
۶. تعریف ناحیه‌ای از اتصال که ناحیه‌ای محافظت‌شده تلقی می‌شود؛
۷. تشریح کامل فرآیند طراحی اتصال، مطابق آنچه در بند K1.5 خواسته شده است؛
۸. فهرست مراجع گزارش‌های آزمایش، گزارش‌های پژوهش‌ها و سایر نشریاتی که اساس پیش‌پذیرفتگی را تأمین می‌کند؛ و
۹. خلاصه‌ی فرایند کنترل کیفیت و تضمین کیفیت.

¹ Demand Critical Welds

پ-۲. آزمایش چرخه‌ای برای پذیرش اتصال‌های تیربه‌ستون (ضوابط لرزه‌ای AISC بخش K2)

پ-۲-۱. حدود کاربرد (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.1)

این بند الزامات آزمایش‌های چرخه‌ای پذیرش اتصال‌های تیربه‌ستون در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط را شامل می‌شود. هدف از آزمایش‌های تشریح شده در این بند، تهیه‌ی یک گواهی به منظور تأیید آن است که الزامات آئین‌نامه‌ای مقاومت و زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه در اتصال تیربه‌ستون تأمین می‌شود. الزامات جایگزین آزمایش در صورتی که توسط "EOR"^۱ و مرجع دارای صلاحیت تأیید شوند، مجاز هستند.

این بخش پیشنهاد‌های حداقلی برای ساده سازی شرایط آزمایش را ارائه می‌نماید.

پ-۲-۲. الزامات زیرمجموعه‌ی آزمایش^۲ (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.2)

مجموعه‌ی آزمایش باید تا حد ممکن شرایطی را که تحت بارگذاری زمین لرزه در نمونه‌ی اصلی رخ می‌دهد، شبیه‌سازی کند. نمونه‌ی آزمایش از دست‌کم یک ستون و تیرهایی از یک یا دوطرف به آن متصل شده‌اند، تشکیل می‌شود و باید الزام مشابه بودن نقطه‌های عطف^۳ و شرایط مهارجانبی در نمونه‌ی اصلی و آزمایشگاهی را تأمین نماید.

پ-۲-۳. متغیرهای اساسی آزمایش (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.3)

از آن‌جا که نمونه‌ی آزمایشگاهی باید تا حد ممکن طراحی، جزئیات، خصوصیات ساخت و مشخصات مصالح نمونه‌ی اصلی را داشته باشد، الزامات انتخاب متغیرهای صفحه‌ی بعد باید در نمونه‌ی آزمایشگاهی در نظر گرفته شود:

۱. منبع چرخش غیرکشسان؛
۲. ابعاد عضوها؛
۳. جزئیات اتصال؛

¹ Engineer of Record (EOR)

² Test Subassembly Requirements

³ Points of Inflection

۴. ورق‌های پیوستگی؛

۵. مقاومت فولاد؛

۶. اتصال‌های جوشی؛ و

۷. اتصال‌های پیچی.

پ-۲-۴. تاریخچه‌ی بارگذاری (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.4)

نمونه‌های آزمایشگاهی باید تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای مطابق با الزامات تشریح‌شده در این بخش قرار بگیرند. آزمایش‌های چرخه‌ای پذیرش اتصال‌های خمشی تیربه‌ستون در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط باید با کنترل زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه، θ ، وارده بر نمونه‌ی آزمایشگاهی، مطابق زیر انجام شود:

۱. ۶ چرخه با θ برابر ۰/۰۰۳۷۵ رادیان؛

۲. ۶ چرخه با θ برابر ۰/۰۰۵ رادیان؛

۳. ۶ چرخه با θ برابر ۰/۰۰۷۵ رادیان؛

۴. ۴ چرخه با θ برابر ۰/۰۱ رادیان؛

۵. ۲ چرخه با θ برابر ۰/۰۱۵ رادیان؛

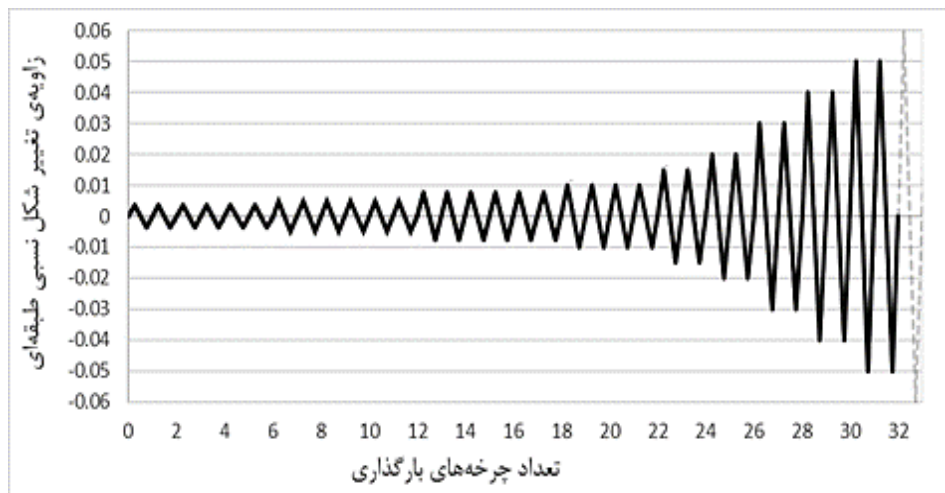
۶/ ۲ چرخه با θ برابر ۰/۰۲ رادیان؛

۷. ۲ چرخه با θ برابر ۰/۰۳ رادیان؛ و

۸. ۲ چرخه با θ برابر ۰/۰۴ رادیان.

ادامه‌ی بارگذاری با افزایش گام‌های برابر ۰/۰۱ رادیان، با ۲ چرخه‌ی بارگذاری در هر گام، در

شکل ۱-۲ نمودار اعمال زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه آورده شده است.



شکل ۲-۱. تاریخچه‌ی بارگذاری

پ-۲-۵. تجهیزات و دستگاه‌ها (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.5)

تجهیزات کافی باید در نمونه آزمایشگاهی تأمین شود تا امکان اندازه‌گیری یا محاسبه‌ی مقادیر و پارامترهای بند K2.7 فراهم شود.

پ-۲-۶. الزامات آزمایش برای نمونه‌های مصالح (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.6)

۱. الزامات آزمایش کششی برای نمونه‌های مصالح فولاد سازه‌ای؛
۲. روش‌های آزمایش کششی برای نمونه‌های مصالح فولاد سازه‌ای؛ و
۳. الزامات آزمایش برای نمونه‌های مصالح فلز جوش.

پ-۲-۷. الزامات گزارش آزمایش (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.7)

برای هر نمونه‌ی آزمایش، یک گزارش نوشته‌شده مطابق با الزامات مرجع دارای صلاحیت و الزامات این بخش تهیه شود. گزارش تمام مشخصات و نتایج آزمایش باید مستند شود. گزارش باید اطلاعات صفحه‌ی بعد را شامل شود:

۱. تشریح کامل یا ارائه‌ی نقشه‌ی نمونه‌ی آزمایش، شامل ابعاد اصلی، شرایط مرزی نقاط بارگذاری و عکس‌العمل و محل مهارهای جانبی؛

۲. جزئیات اتصال از جمله ابعاد اعضا، رده‌ی فولاد، اندازه‌ی تمامی المان‌های اتصال، جزئیات جوش کاری شامل فلز پرکننده، بُعد و محل سوراخ‌های پیچ، بُعد و رده‌ی پیچ‌ها و سایر جزئیات مهم اتصال؛
۳. فهرست متغیرهای اساسی برای نمونه‌ی آزمایش که در بند K2.3 ارائه شده است؛
۴. فهرست یا نموداری که تاریخچه‌ی بار یا تغییر مکان نمونه را نمایش دهد؛
۵. فهرست جوش‌هایی که باید "نیاز بحرانی" اجرا شوند؛
۶. تعریف ناحیه‌ی بحرانی؛
۷. نمودار بار بر حسب تغییر مکان نمونه. محل‌های اعمال بار و اندازه‌گیری تغییر مکان باید مشخصی باشد؛
۸. نمودار لنگر بر حسب زاویه‌ی تغییر شکل نسبی طبقه برای اتصال تیر به ستون که نسبت به خط مرکزی ستون محاسبه شده‌اند؛
۹. زاویه‌ی تغییر شکل نسبی طبقه و چرخش غیر کشسان کلی تأمین شده توسط نمونه تعیین گردد. مؤلفه‌های نمونه که در چرخش غیر کشسان کلی با تسلیم یا لغزش مشارکت می‌کنند باید مشخص شوند؛
۱۰. فهرست کامل مشاهدات آزمایش، شامل تسلیم، لغزش و گسیختگی هر کدام از بخش‌های نمونه؛
۱۱. مُد خرابی کنترل کننده‌ی نمونه، اگر آزمایش نمونه قبل از خرابی متوقف شده است، علت توقف نمونه باید تشریح شود؛
۱۲. نتایج آزمایش مصالح نمونه؛ و
۱۳. دستورالعمل جوشکاری (WPS)^۱ و گزارش بازرسی جوش.

¹ Welding Procedure Specification (WPS)

پ-۲-۸. معیارهای پذیرش (ضوابط لرزه‌ای AISC بند K2.8)

نمونه‌ی آزمایشگاهی باید مقاومت و زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه را در قاب‌های خمشی ویژه و متوسط برآورده نماید. نمونه باید زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه‌ی مورد نیاز را برای حداقل ۱ چرخه‌ی بارگذاری کامل تحمل کند.

بند E2.6b از ضوابط لرزه‌ای AISC برای اتصال‌های تیربه‌ستون قاب‌های خمشی متوسط الزامات زیر را مقرر می‌کند:

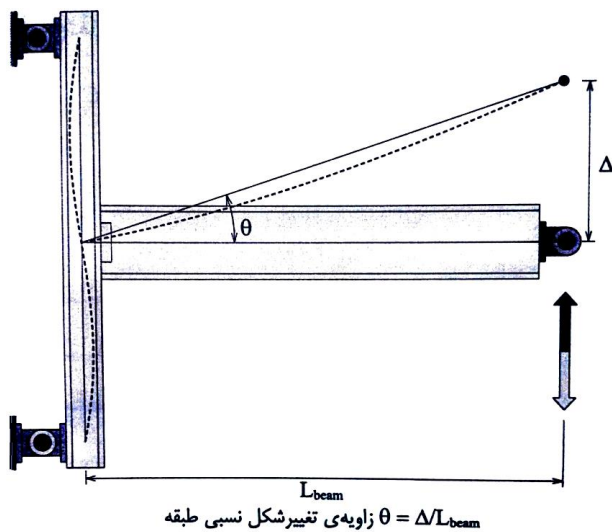
۱. اتصال باید توانائی تحمل حداقل 0.02 رادیان، زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه را داشته باشد.
۲. مقاومت خمشی اندازه‌گیری شده‌ی اتصال که در "بر" ستون تعیین می‌شود، باید حداقل برابر با 80 درصد " M_p " تیر متصل شده در زاویه‌ی تغییرشکل، نسبی 0.02 رادیان باشد.

بند E3.6b از ضوابط لرزه‌ای AISC برای اتصال‌های تیربه‌ستون قاب‌های خمشی ویژه، بیان می‌دارد که الزامات زیر باید برآورده شوند:

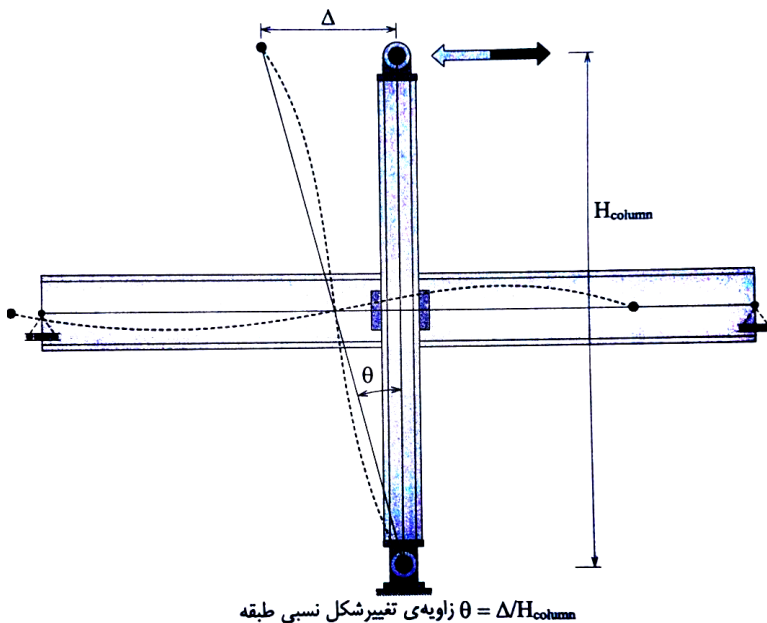
۱. اتصال باید توانائی تحمل حداقل 0.04 رادیان زاویه‌ی تغییرشکل نسبی طبقه را داشته باشد.
۲. مقاومت خمشی اندازه‌گیری شده‌ی اتصال که در بر ستون تعیین می‌شود، باید حداقل برابر با 80 درصد M_p تیر متصل شده در زاویه‌ی تغییرشکل نسبی 0.04 رادیان باشد.

در شکل ۲-۲ و ۳-۲ دو نمونه مدل آزمایشگاهی اتصال‌های پیش‌پذیرفته نشان داده شده‌است.

^۱ مقاومت خمشی پلاستیک اسمی مقطع



شکل ۲-۲. نمونه‌ی قاب آزمایشگاهی، با اتصال یک‌طرفه، به منظور بررسی پیش‌پذیرفتگی اتصال تیر به ستون [۵]



شکل ۲-۳. نمونه‌ی قاب آزمایشگاهی، با اتصال دوطرفه، به منظور بررسی پیش‌پذیرفتگی اتصال تیر به ستون [۵]

Abstract

The "SST" connection is the first prequalified partially restrained connection. In this study, numerical evaluation of the behavior of this connection with commonly used profiles in Iran with some comparisons in Abacus software has been investigated. In this study, five specimens in accordance with AISC 358 to investigate the acceptability of SST connection with commonly used profiles in Iran. The results of the present study show that all five specimens made in accordance with the requirements of AISC 358 have been able to satisfy the general requirements of prequalified. In addition, the five specimens were able to show good seismic behavior, so that up to 0.06 radians, none of the specimens had any decrease in resistance and their moment-rotation curve has always been increasing. Maximum pre-tensioning in the five specimens yield-link flange bolts increased the stiffness connection by 11% to 12%, but was less than 1% more effective in improving the moment resistance behavior of the connection. Also, the maximum pre-tensioning of the yield-link flange bolts and the strengthening of panel zone the doubler plate for the five plate specimens resulted in an 11% to 14% increase in stiffness compared to with doubler plate specimens, while its effect on the moment the capacity connection was less than 1%. All fifteen SST connections in this study are classified as a partially restrained and full-strength connection. A comparison of the three samples with SST, SST_R and RBS connections showed that the RBS connection decreased with 0.06 radians of rotation. Whereas, the other two connections have not experienced any resistance reduction. Also, the RBS connection stiffness is greater than the two. The panel zone at the RBS connection enters the plastic interval, while the other two samples always exhibit elastic behavior. The hardness stiffness of the panel zone is equal to the SST_R and RBS connection, and the hardness stiffness of the SST connection is slightly higher than the two samples. In another comparison between the two SST and RBS_R connections, the results showed that the RBS_R connection hardness was higher than the SST connection, and its resistance was slightly higher. The panel zone behavior is elastic in both models and the stiffness of the SST connection is slightly higher. Examples of graphical results and equivalent plastic strain diagrams show that yields on the SST connection occur only in the reduced section. SST_R, RBS, and RBS_R connections are categorized in the partially restrained connections and full-strength connections.

Keywords: SST Partially restrained Connection; Seismic behavior; Panel zone; Cyclic loading; Finite element method



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in: Structural Engineering

Evaluation of Seismic Performance of “SST” Partially restrained Connection for Iranian Steel Section's

by

Mohammad Irvani

Supervisor

Dr. Vahidreza Kalatjari

Adviser

Dr. Pouyan Boroumand

September, 2019