



مطالعه آزمایشگاهی رفتار چرخه ای اتصالات خورجینی متداول و معیار های پذیرش آنها

حمیدرضا امیری هرمزکی^۱، علی اکبر آقاچوک^۲

(دریافت ۸۹/۱۱/۲۱، پذیرش ۹۱/۶/۲۵)

چکیده

در این مقاله که در راستای شناخت رفتار اتصال خورجینی تحت اثر بارهای چرخه ای است، از آزمایش بر روی شش نمونه متفاوت اتصال خورجینی بهره گرفته می شود. در ابتدا جزئیات هر یک از نمونه ها و همچنین پیکربندی و پروتکل بارگذاری استفاده شده در آزمایشات معرفی میشود. سپس مشاهدات حین آزمایش شامل محل و چگونگی ترک خوردگیهای اولیه و نهایی هر یک از نمونه ها مورد بررسی قرار گرفته و همچنین منحنی لنگر-چرخش آنها ارائه میگردد. پس از آن منحنی پشتواره مربوط به منحنی لنگر-چرخش هر یک از نمونه ها ترسیم و همچنین سطوح عملکرد آنها برحسب زاویه چرخش اتصال تعیین میگردد. در پایان نتایج آنالیز المان محدود این نمونه ها تحت اثر بارهای رفت و برگشتی، شامل منحنی های لنگر-چرخش، سختی اولیه و مقاومت نهایی با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه میگردد. مطابق آزمایشات انجام شده، عامل اصلی کاهش باربری لنگر در اتصالات خورجینی متداول تحت بارهای چرخه ای، شکست در جوشهای نبشی اتصال فوقانی به تیر و یا ستون است. بر این اساس در صورت حفظ مقاومت لازم برای تحمل بارهای ثقلی، اتصال به یک اتصال قیچی سان تبدیل شده و رفتار خمشی آن را میتوان کنترل شونده بر اساس تغییر شکل در نظر گرفت.

کلمات کلیدی

اتصال خورجینی، رفتار چرخه ای، ترک خوردگی، منحنی پشتواره، معیارهای پذیرش، روش المان محدود

Experimental Study Of Cyclic Behavior Of conventional Saddle Kike Connections and Their Acceptance Criteria

H.Amiri Hormozaki, A.A.Aghakouchak

ABSTRACT

In this paper, which is aimed to study the behavior of saddle like connections under cyclic loading, results of experiments on six different specimens are utilized. Initially details of each specimen and its setup and loading protocol are presented. Then observations during the tests consisting of position and situation of initial crack and final fracture are discussed and the moment-rotation curves are presented. Subsequently backbone curve of each specimen is provided and the performance levels are determined. Finally the results of finite element analysis consisting of moment-rotation curves, initial stiffness and ultimate strength are compared with those obtained from tests. Based on the tests conducted in this research, the main reason for reduction in moment capacity of the saddle like connections is fracture in the welds that connect top angle to column or beam. Therefore if the load bearing capacity of the connection for gravity loads is maintained, the connection behaves as a scissor like and moment carrying behavior of it can be considered as deformation control one.

Keywords

Saddle Connection, Cyclic Behavior, Fracture, Backbone Curve, Acceptance Criteria, Finite Element Method

^۱ دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس: h_amiri@modares.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس: a_gha@modares.ac.ir (نویسنده مسئول)



مطالعه بر روی این موضوع پرداختند. تحقیقات انجام شده در این زمینه را میتوان به سه دسته اصلی زیر تقسیم نمود:

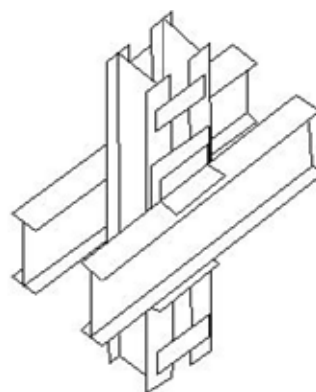
الف: تحقیقات انجام شده جهت شناخت رفتار اتصال خورجینی

ب: تحقیقات انجام شده جهت ارائه راهکارهای مناسب مقاوم سازی اتصال

ج: تحقیقات انجام شده بر روی رفتار قابهای دارای این نوع اتصال

با توجه به آنکه هدف اصلی در تحقیق حاضر، شناخت رفتار اتصال خورجینی است در اینجا مروری سریع بر تاریخچه تحقیقات دسته اول صورت خواهد گرفت. یکی از اولین آزمایشات انجام شده در این زمینه توسط مقدم و وکرمی [۱] در سال ۱۳۷۰ مرکز تحقیقات مسکن انجام شد. با انجام این آزمایش مواردی همچون سختی اولیه، منحنی لنگر-چرخش و چگونگی شکست نمونه ها تحت بار یکنوا مشخص گردید. پس از آن طاحونی و فرجودی [۲] در یک کار آزمایشگاهی با اعمال بارگذاری یکنوا بر روی ۵ نمونه، منحنی لنگر-چرخش و درجه گیرداری آنها را بدست آوردند. ایندو محقق درجه گیرداری اتصال را ۷۰ درصد بدست آوردند که قابل توجه بود. آفاکوچک و حسینخان [۳] با انجام آزمایشاتی در مرکز تحقیقات مسکن، سختی اولیه و مقاومت نهایی این اتصالات هنگامی که در ستونهای گوشه و میانی مورد استفاده قرار گیرند را تعیین نمودند. ایندو محقق همچنین رفتار این اتصالات تحت بارهای چرخه ای را، مورد بررسی قرار دادند. فلاح و برخورداری [۴] در سال ۱۳۷۳ با کالیبره نمودن رابطه کالسن بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات مقدم و وکرمی، رفتار غیر خطی اتصال را در قابهایی که قصد انجام آنالیز بر روی آنها را داشتند منظور نمودند. در همان سال طریقت و مالک [۵] به بررسی رفتار الاستیک اتصال و چگونگی تمرکز تنش تحت بارهای یکنوا پرداختند. در این سال یعقوبی و رازانی [۶] نیز به منظور تعیین درجه گیرداری، مقاومت نهایی و شکل پذیری این اتصال، آزمایشهایی را بر روی ۱۲ نمونه مختلف این اتصال انجام دادند. در این

امروزه سازه های فولادی یکی از انواع پرکاربرد سازه ها می باشد که در بیشتر نقاط دنیا مورد استفاده قرار می گیرند. در کشور ما نیز استفاده از این نوع سازه ها از چند دهه پیش رواج یافته است. متأسفانه در دهه های نخست استفاده از آنها، بدلیل کمبود امکانات و عدم وجود تکنولوژی مناسب و همچنین صرفه جویی اقتصادی، بعضی جزئیات در اتصالات مورد استفاده قرار گرفته اند که در نقاط دیگر دنیا سابقه ای ندارند. یکی از جزئیات مورد استفاده، اتصال خورجینی است که تنها در کشور ما بطور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این نوع اتصال، تیرها از کنار ستونها به صورت سرتاسری عبور کرده و توسط نبشی هایی در بالا و پایین تیر مطابق شکل (۱) به ستون متصل می گردد. برای پرهیز از جوش بالاسری نبشی بالایی و پایینی به ترتیب کوچکتر و بزرگتر از بال تیر در نظر گرفته می شوند. پس از زلزله ای که در شمال کشور (رودبار و منجیل) در سال ۶۹ اتفاق افتاد، محققان به رفتار لرزه ای نامناسب این نوع اتصالات در هنگام زلزله و اهمیت آن پی بردند. اهمیت رفتار لرزه ای این اتصال از آنجا ناشی میگردد که شکست در جوش نبشی پایینی، باعث عدم باربری ثقلی این اتصال و فروریزش سقف و در نتیجه تخریب سازه می شود.



شکل (۱): اتصال خورجینی متداول

از اینرو مطالعه رفتار این اتصال به یکی از موضوعات تحقیقاتی در کشور بدل شد و محققان بسیاری به تحقیق و

آزمایشها سه نمونه مختلف از اتصالات خورجینی شامل اتصالات متداول و تقویت شده مدنظر قرار گرفت. این دو محقق در محل اتصالات، تغییر شکلهای خمشی زیادی را در اتصالات خورجینی مشاهده نمودند که به جوش های کناری نبشی های اتصال مخصوصاً نبشی زیرین اتصالات خورجینی تنش های زیاد برشی وارد می ساخت و باعث ترک خوردگی و شکست زودرس از گوشه های اتصالات و بسط آنها در سراسر طول جوش می گردید. ملکی و تهرانی زاده [۷] با انجام تحلیل دینامیکی بر روی قابهای آزمایش شده، سختی اولیه این نوع از اتصالات را تعیین نمودند. در سال ۱۳۷۸ مزروعی و مصطفایی [۸] با انجام آزمایش بر روی نمونه هایی از اتصالات خورجینی به بررسی رفتار این نمونه ها تحت بار چرخه ای پرداختند. در نمونه های استفاده شده در این آزمایشات دور تا دور یک بال نبشی بالایی به تیر جوش گردید، در حالی که در اتصالات خورجینی متداول تنها لبه بال به تیر جوش می گردد. به دلیل هندسه جوش عنوان شده شکست واضحی در جوشها مشاهده نگردید.

در همان سال صادقان و مقدم [۹] با استفاده از نرم افزار ANSYS این اتصال را بصورت ساده و همچنین تقویت شده تحت بار یکنوا آنالیز نموده و رفتار آن را مورد بررسی قرار دادند. متعاقباً میرقادری و دهقانی [۱۰] آزمایشهایی بر روی اتصالات خورجینی انجام دادند که یک نمونه از آنها اتصال متداول و بقیه بصورت تقویت شده بودند. آنها جوش نبشها به تیر را آسیب پذیر دانستند. در همان سال مقدم و موید علایی [۱۱] با انجام آزمایش بر روی شش نمونه مختلف از این اتصال، چرخش و لنگر ترک خوردگی، سختی اولیه و چرخش نهایی آنها را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق برخلاف تحقیق انجام شده توسط میرقادری و دهقانی، جوشهای نبشی به ستون آسیب پذیر شناخته شد. در این تحقیق لنگر ترک خوردگی برای نمونه ها بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۵۵ رادیان بدست آمد. پس از آن مقدم و معاونی با مدلسازی و آنالیز المان محدود این نمونه ها تحت بارهای اعمالی در آزمایش به بررسی نتایج

حاصل از آزمایش پرداختند. کاوه و فاضل [۱۲] در سال ۱۳۷۸ با استفاده از آنالیزهای المان محدود و همچنین شبکه عصبی به پیش بینی منحنی لنگر - چرخش اتصال پرداختند. آقاچوچک و وشکینی [۱۳] نیز در سال ۱۳۸۰ با انجام آزمایشات بر روی قابهای دارای این اتصال، رفتار این اتصال را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۳۸۶ مقدم و پیرایه گر [۱۴] با استفاده از روشهای مایکرومکانیکال جهت پیش بینی شکست، به بررسی رفتار یکی از نمونه های استفاده شده در آزمایشات مقدم و موید علایی پرداختند و با استفاده از این روشها به پیش بینی دوران ترک خوردگی تحت بارگذاری یکنوا پرداختند و دورانی معادل با ۰/۰۰۹ رادیان را برای ترک خوردگی اولیه در نمونه بدست آوردند.

همانطور که ملاحظه میگردد تاکنون تحقیقات ارزشمندی در زمینه شناخت رفتار اتصال خورجینی انجام شده است و این تحقیقات زوایای زیادی را در این زمینه روشن ساخته است. یکی از مسائلی که اخیراً در کشور مورد توجه قرار گرفته است مقاوم سازی سازه های موجود از جمله سازه های فولادی همراه با اتصال خورجینی می باشد. ارزیابی میزان آسیب پذیری لرزه ای سازه ها و همچنین ارائه طرح مقاوم سازی آنها، نیازمند شناخت مناسب رفتار لرزه ای اعضا از جمله اتصالات است. متأسفانه در حال حاضر بدلیل عدم شناخت کافی از رفتار اتصالات خورجینی، در آیین نامه های مربوط از جمله دستورالعمل بهسازی ساختمانهای موجود [۱۵] ضوابطی برای کنترل این نوع از اتصالات ارائه نشده است.

راهکارهایی که جهت شناخت رفتار لرزه ای یک جزء سازه ای و ارائه معیار پذیرش برای آن وجود دارد در برخی از آیین نامه ها همچون آیین نامه FEMA [۱۶] ذکر شده است. در این روش نخست اتصال تحت اثر بارهای رفت و برگشتی مطابق پروتکل های ارائه شده در آیین نامه ها، قرار میگیرد و پس از آن با بررسی و مطالعه بر روی منحنی های لنگر- چرخش و همچنین چگونگی شکست اتصال به رفتار لرزه ای اتصال پی برده میشود. ازاینرو در

جدول (۱): مشخصات مربوط به نمونه ها

نمونه	مقطع تیر	مقطع نبشی بالایی	مقطع نبشی پایینی	طول نبشی (cm)
T1	IPE180	80*80*8	100*100*10	۱۰
T2	IPE180			۱۵
T3	IPE180			۲۰
T4	IPE220	100*100*10	120*120*12	۱۰
T5	IPE220			۱۵
T6	IPE220			۲۰

همچنین در جدول (۳) لنگر تسلیم و پلاستیک مربوط به هر یک از مقاطع IPE که در قسمتهای بعدی این مقاله مورد استفاده قرار می گیرد نیز ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات مربوط به جوش و فولاد

مقطع	σ_y (Mpa)	σ_u (Mpa)	ϵ_u (%)	E.L.(%)
L80*80*8	۳۱۰	۴۸۸/۵	۱۹	۲۷/۴
L100*100*10	۳۰۸	۴۸۶/۳	۱۶/۶	۲۵
L120*120*12	۲۵۳	۳۸۰/۷	۲۱	۳۲
IPE 180	۲۷۷	۴۰۵/۳	۱۹/۵	۲۹/۵
IPE 220	۲۵۸	۳۸۵	۲۱	۳۱/۶

جدول (۳) : لنگر تسلیم ویلاستیک مقاطع تیرها بر حسب

(ton.m) بر اساس تنش تسلیم واقعی

و تنش تسلیم اسمی 2400 kg/cm^2

تنش تسلیم واقعی		تنش تسلیم اسمی $F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$		مقطع IPE
M_p	M_v	M_p	M_v	
۸/۳	۷/۲	۹/۴	۸/۲	IPE 180
۱۳/۹	۱۲/۱	۱۴/۹۵	۱۳	IPE 220

۳- برپایی مجموعه آزمایشگاهی و روش بارگذاری

با توجه به تجربیات مطالعات گذشته و اهمیت رفتار نبشی ها در تعیین رفتار اتصال، مجموعه آزمایشگاهی مطابق شکل (۲) برپا گردید. در این پیکربندی دو تیر از کنار مقطعی قوطی شکل عبور کرده و توسط نبشی های بالا و پایین به آن متصل میگردد. مقطع جعبه ای شکل نیز به وسیله پیچهایی در سر تاسر طول خود به قاب اصلی متصل شده است تا از تغییر شکل در آن جلوگیری کند. به این

این تحقیق سعی می گردد تا بر اساس راهکار فوق الذکر تا حد ممکن از رفتار چرخه ای اتصالات خورجینی متداول شناخت حاصل

شود. منظور از اتصالات خورجینی متداول، اتصالاتی است که در شکل (۱) ارائه شده و اتصالاتی که با استفاده از راههای مختلف تقویت شده اند شامل مطالعه حاضر نمی شوند.

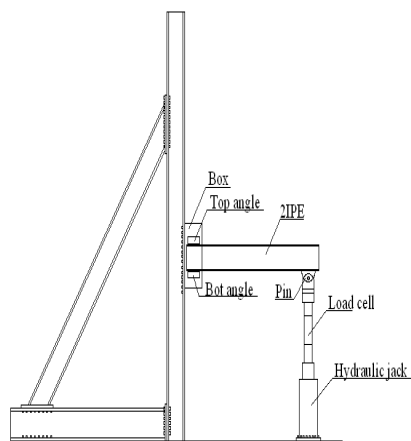
۲- آزمایشات انجام شده بر روی اتصال :

- نمونه ها:

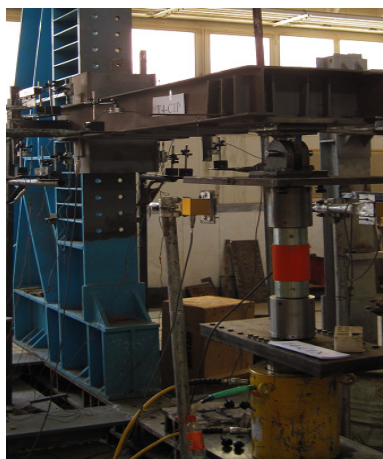
بر طبق تحقیقات انجام شده در گذشته، طول هر یک از نبشی های بالایی و پایینی و همچنین ارتفاع تیر می تواند تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی رفتار اتصال خورجینی داشته باشد. به همین جهت در این تحقیق از اتصالاتی با طول های متفاوت نبشی و همچنین تیرهایی با ارتفاع متفاوت جهت انجام آزمایشات استفاده گردید. در تعیین جزئیات نمونه ها، نتایج سونداژ های انجام شده در مدارس کشور نیز مدنظر قرار گرفت تا نمونه ها معرف نمونه های استفاده شده در ساختمانهای متداول کشور باشد. در این نمونه ها یکی از بالهای نبشی پایینی توسط یک جوش افقی و دو جوش قائم به ستون متصل شدند. همچنین بال دیگر این نبشیها تنها در لبه خود به تیر جوش گردیدند. در مورد نبشی های بالایی نیز به همین منوال عمل گردید. در این تحقیق جمعاً شش نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات هر یک شامل مقطع تیر، ابعاد و طول نبشی جدول (۱) آورده شده است. لازم بذکر است که فولاد مورد استفاده در انجام این آزمایش ST37 و الکتروود مورد استفاده جهت جوشکاری E6013 می باشد که مشخصات مربوط به هر یک از آنها (فولاد و جوش) که از تست کشش بدست آمده در جدول (۲) آورده شده است.



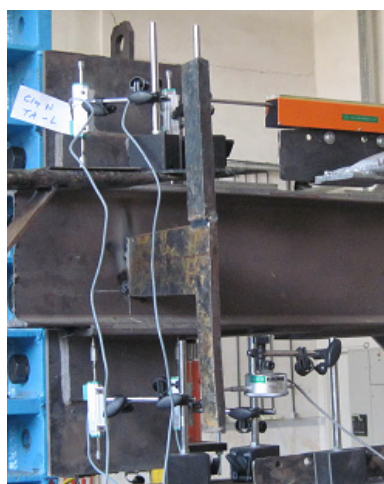
می‌نماید. در این نقطه تیر به وسیله ورق‌هایی تقویت شده و از صلبیت کافی برخوردار است. در این آزمایشها جابجایی انتهای تیر(در محل اعمال نیرو) با استفاده از دو جابجایی سنج در تیرهای سمت راست و چپ اندازه گیری می‌گردد و متوسط ایندو به عنوان جابجایی در این نقطه منظور می‌گردد. همچنین جابجایی خارج از صفحه نیز با استفاده از یک جابجایی سنج اندازه گیری می‌گردد.



ترتیب تغییر شکل ستون حذف شده و تغییر شکل‌ها تنها مربوط به تیر و اتصال است. (شکل (۲)). در این مجموعه، نیرو از طریق جک به انتهای تیر اعمال می‌شود. در بالای این جک، مابین جک و نقطه اعمال نیرو، از نیروسنج جهت اندازه گیری نیروی اعمالی استفاده شده است. به جهت جلوگیری از ایجاد هر گونه لنگر در نقطه اعمال نیرو، مفصلی مطابق شکل (۳-الف) نیرو را به تیر اعمال



شکل (۲): Setup استفاده شده در آزمایشات



ب: چگونگی اندازه گیری دوران در اتصال



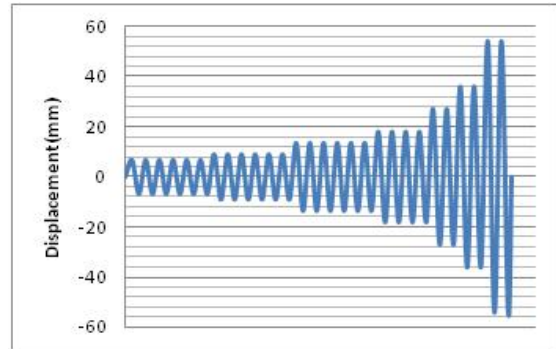
الف: مفصل استفاده شده در نقطه اعمال نیرو

شکل (۳): جزئیات استفاده شده در Setup آزمایشگاهی

فاصله بین دو محل اندازه گیری، مقدار دوران هر سمت از اتصال محاسبه می‌گردد و با متوسط گیری از این دو دوران(در تیر سمت چپ و راست) مقدار دوران کل تعیین می‌گردد. از جابجایی سنج‌هایی نیز جهت اندازه گیری

برای اندازه گیری چرخش در اتصال از اجزای T شکل متصل به جان مطابق شکل (۳-ب) استفاده شده است. در طول انجام آزمایش، با اندازه گیری میزان جابجایی افقی در بالا و پائین این T شکل و تقسیم مجموع جابجایی‌ها به

جابجایی در راستای قائم بال های نشیها به تیر استفاده گردید که در شکل (۳) آورده شده است. برای بارگذاری نمونه از پروتکل بارگذاری ارائه شده در مرجع [۱۵]، استفاده گردید. اندازه جابجایی اعمالی به انتهای تیر در سیکلهای مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): جابجایی اعمال شده به سر تیر

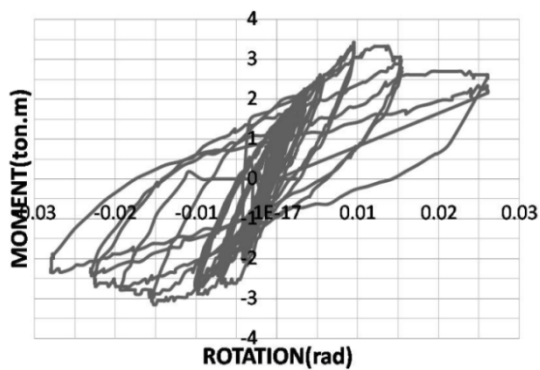
طبق پروتکل بارگذاری

۴- مشاهدات آزمایش:

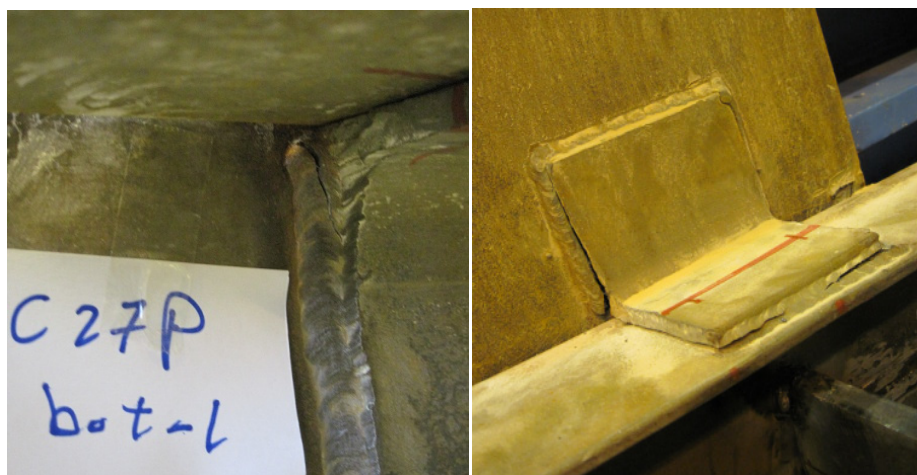
در این بخش مشاهدات صورت گرفته در آزمایشات برای هر یک از نمونه ها به تفکیک مورد بررسی قرار می گیرد. به جهت اختصار شماره سیکل های شروع ترک خوردگی در نمونه ها و نوع و میزان شکست های موجود در آنها پس از پایان آزمایشات به ترتیب در جداول (۵) و (۴) آورده شده است و از بیان آنها در توضیحات ذیل خودداری می گردد.

نمونه T1 :

منحنی لنگر- چرخش ایجاد شده در اتصال در طول آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است. در این آزمایش، نخست ترک خوردگی در یکی از جوشهای قائم نشی بالایی به ستون در تیر سمت راست اتفاق افتاد. پس از آن به ترتیب ترک خوردگی در جوش نشی بالایی به تیر در تیر سمت چپ، جوش نشی پایینی به تیر در تیر سمت راست و جوش دیگر نشی بالایی به ستون در همین تیر اتفاق افتاد. در نهایت جوش نشی های بالا به تیرها و ستونها دچار ترک خوردگی زیادی در طول خود شدند و به همین دلیل اتصال ظرفیت لنگر گیری خود را از دست داد (شکل (۶)).



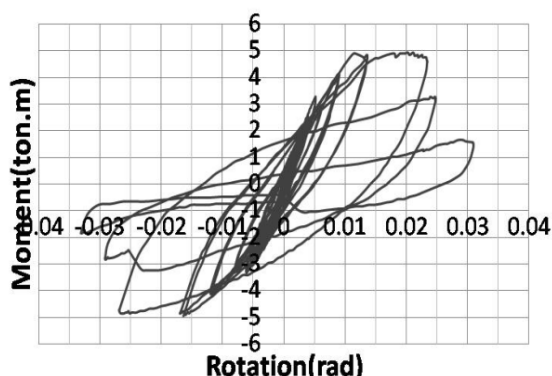
شکل (۵): منحنی لنگر - چرخش نمونه T1 تحت اثر بارگذاری چرخه ای



شکل (۶): تصاویری از شکستهای مشاهده شده در نمونه T1

نمونه T2:

به تیرها ظرفیت تحمل لنگر اتصال به نحو چشمگیری کاهش یافت (شکل ۸).



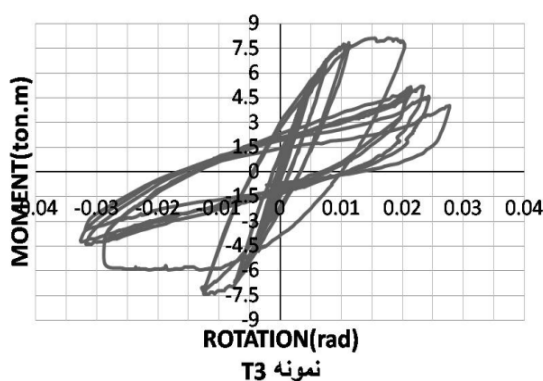
شکل (۷): منحنی لنگر - چرخش نمونه T2 تحت اثر بارگذاری چرخه ای

منحنی لنگر- چرخش ایجاد شده در اتصال در طول آزمایش در شکل (۷) نشان داده شده است. در این اتصال، نخست، ترک خوردگی در جوش نبشی بالایی به تیر سمت راست مشاهده گردید و پس از آن در سیکلهای بعدی جوش نبشی پائینی به همین تیر و نبشی پائینی به ستون نیز شکست هایی مشاهده شد. سپس شکست های دیگری در جوش نبشی به تیر در سمت چپ نیز اتفاق افتاد. در نهایت ترک خوردگی های دیگری نیز ایجاد گردید و ترک خوردگیهای قبلی نیز با افزایش طول مواجه شدند به طوری که با شکست جوشهای نبشی های بالایی



شکل (۸): تصاویری از شکستهای مشاهده شده در نمونه T2

آنجا که جوشهای مربوط به نبشی بالایی به تیر سمت چپ نیز دچار شکست گردیدند (شکل ۱۰).



شکل (۹): منحنی لنگر - چرخش نمونه T3 تحت اثر بارگذاری چرخه ای

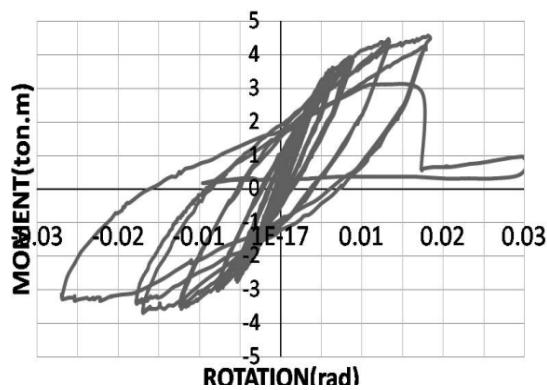
نمونه T3:

منحنی لنگر- چرخش ایجاد شده در اتصال در طول آزمایش در شکل (۹) نشان داده شده است. در این آزمایش نخست ترک خوردگی در جوش نبشی پائینی تیر سمت راست به ستون و جوش نبشی بالایی به ستون در همان تیر اتفاق افتاد. پس از آن ترک خوردگی در جوش نبشی پائینی به تیر سمت چپ و همچنین جوش نبشی پائینی به تیر سمت راست اتفاق افتاد. در سیکلهای بعدی این آزمایش جوش نبشی پائینی به تیر سمت راست دچار شکست ناگهانی در کل طول خود گردید به دلیل کیفیت نامناسب آن بود. پس از آن ظرفیت تحمل لنگر اتصال کاهش قابل ملاحظه ای یافت اما آزمایش ادامه پیدا کرد تا



شکل (۱۰): تصاویری از شکستهای مشاهده شده در نمونه T3

نمونه T4:



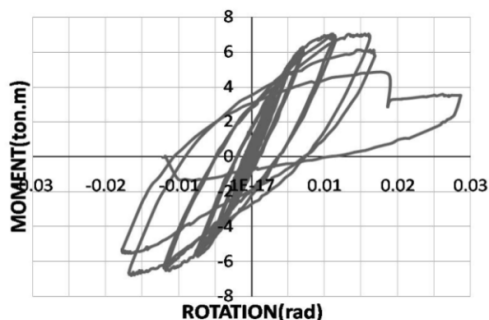
شکل (۱۱): منحنی لنگر - چرخش نمونه T4 تحت اثر بارگذاری چرخه ای

منحنی لنگر- چرخش ایجاد شده در اتصال در طول آزمایش در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این آزمایش نخست ترک خوردگی در جوش نبشی پائینی به تیر در تیر سمت چپ مشاهده گردید. پس از آن ترک خوردگی هایی در جوش نبشی بالایی تیر سمت راست به تیر و ستون در همین تیر ایجاد گردید. در سیکلهای بعدی ترک خوردگی به میزان ۱ تا ۲ سانتی متر در جوش نبشی پائینی به ستون اتفاق افتاد. در نهایت جوش های نبشی بالایی تیر سمت چپ و راست به تیرها دچار شکست کلی گردید و ظرفیت تحمل لنگر اتصال کاهش قابل توجهی یافت و آزمایش متوقف گردید (شکل (۱۲)).



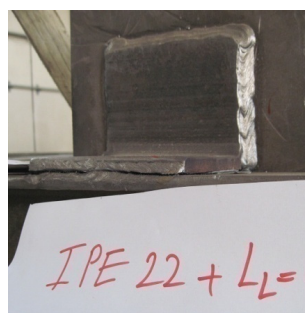
شکل (۱۲): تصاویری از شکست و تغییر شکل مشاهده شده در نمونه T4

نمونه T5:



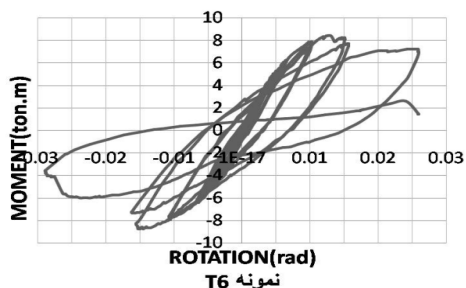
شکل (۱۳): منحنی لنگر - چرخش نمونه T5 تحت اثر بارگذاری چرخه ای

منحنی لنگر- چرخش ایجاد شده در اتصال در طول آزمایش در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در این اتصال نخست ترک خوردگی در جوش نبشی به تیر در تیر سمت راست ایجاد گردید. سپس ترک خوردگی هایی در جوش های نبشی بالایی به تیر و نبشی پائینی به تیر در تیر سمت چپ ملاحظه شد. پس از آن جوش نبشی بالایی تیر سمت چپ به ستون نیز دچار شکست اولیه گردید. در نهایت پس از تحمل شکست های کلی در جوش نبشی های بالایی به تیرها، اتصال ظرفیت تحمل لنگر خود را به صورت قابل توجهی از دست داد (شکل (۱۴)).



شکل (۱۴): تصاویری از شکستهای مشاهده شده در نمونه T5

نمونه T6:



شکل (۱۵): منحنی لنگر - چرخش نمونه T6 تحت اثر بارگذاری چرخه ای

منحنی لنگر- چرخش ایجاد شده در اتصال در طول آزمایش در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این آزمایش نخست جوش یک سمت نبشی بالایی به ستون در تیر سمت چپ، دچار ترک خوردگی با طول نسبتاً زیاد (در حدود ۵ سانتی متر) گردید. پس از آن جوش یک سمت نبشی بالایی به ستون در تیر سمت راست نیز دچار شکست کلی شد. در سیکلهای بعدی جوش سمت دیگر نبشی به ستون در تیر سمت چپ نیز دچار شکست کلی شد. در سیکلهای بعدی ترک خوردگی های دیگری در جوش ها اتفاق افتاد و در نهایت جوش نبشی های بالایی به تیر نیز دچار شکست کلی شدند و ظرفیت تحمل لنگر اتصال کاهش قابل توجهی یافت (شکل (۱۶)).



شکل (۱۶): تصاویری از شکستهای مشاهده شده

در نمونه T6

جدول (۴): میزان ترک خوردگی در جوشهای نمونه ها پس از انجام آزمایش

نمونه	تیر	جوش نبشی بالایی		جوش نبشی پائینی	
		به تیر	به ستون	به تیر	به ستون
T1	راست	شکست کامل	شکست کامل	۱سانتی متر در دو سمت	-----
	چپ	۲تا۳سانتی متر در دو سمت	۲سانتی متر در دو جوش قائم	۲ سانتی متر در یک سمت	۳تا۴سانتی متر در یک جوش قائم
T2	راست	شکست کامل	۲تا۳سانتی متر در دو جوش قائم	----	۳تا۴سانتی متر در یک جوش قائم
	چپ	شکست کامل	۲تا۳سانتی متر در یک جوش قائم	-----	-----
T3	راست	۲تا۳سانتی متر در هر دو سمت	۲تا۳سانتی متر در یک جوش قائم	شکست کامل	۲تا۳سانتی متر در یک جوش قائم
	چپ	۶سانتی متر در هر دو سمت	شکست کامل	-----	-----
T4	راست	۲ تا ۳ سانتی متر در هر دو سمت	۳ سانتی متر در یک جوش قائم	-----	یک سانتی متر در یک جوش قائم
	چپ	شکست کامل	-----	۲ سانتی متر در یک سمت	-----
T5	راست	شکست کامل	۲تا۳سانتی متر در یک جوش قائم	----	-----
	چپ	شکست کامل	۲تا۳سانتی متر در دو جوش قائم	----	۲تا۳سانتی متر در دو جوش قائم
T6	راست	شکست کامل	شکست کامل	-----	-----
	چپ	شکست کامل	شکست کامل	-----	-----

جدول (۵): ترک خوردگی اولیه در جوشهای نمونه ها و سیکل‌های مربوطه

نمونه	جوش نبشی بالایی			جوش نبشی پائینی	
	تیر	به تیر	به ستون	به تیر	به ستون
T1	سمت راست	C24	C14	C23	-----
	سمت چپ	C19	C23	C19	-----
T2	سمت راست	C26	C30	C30	C30
	سمت چپ	C30	-----	-----	-----
T3	سمت راست	C25	C25	C26	C25
	سمت چپ	-----	-----	C26	-----
T4	سمت راست	C23-	C23	-----	C26
	سمت چپ	-----	C26	C18	-----
T5	سمت راست	C23	---	---	-----
	سمت چپ	C25	C26	C25	-----
T6	سمت راست	C25	C23	-----	-----
	سمت چپ	C26	C14	-----	-----



۵- بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش:

۵-۱- ترک خوردگی اولیه:

در این آزمایشات اولین ترک خوردگی در جوش نبشی‌های بالا به ستون و یا تیر و یا در جوش نبشی پایینی به تیر اتفاق افتاد و تنها در نمونه T3 همزمان با شروع ترک خوردگی‌های اولیه در این نقاط در یکی از جوشهای قائم نبشی‌های پایین به ستون نیز ترک اولیه‌ای ایجاد گردید. همانطور که در جدول (۴) ملاحظه می‌گردد ترک خوردگی در بیشتر نمونه‌ها پس از سیکل ۲۳ام که معادل ۰/۰۱۵ رادیان زاویه انحراف است اتفاق افتاده است و تنها در دو نمونه T1 و T6 شکست اولیه قبل از این سیکل می‌باشد. دلیل این ترک خوردگی‌های زود هنگام در این نمونه‌ها کیفیت پایین جوش در محل این ترک خوردگی‌ها است. همچنین با نگاهی به این جدول می‌توان دریافت که در هیچ نمونه‌ای ترک خوردگی در جوش نبشی پایینی به ستون، که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، قبل از سیکل ۲۵ام که معادل ۰/۰۲ رادیان زاویه انحراف است اتفاق نیفتاده است.

۵-۲- شکست نهایی:

در تمامی نمونه‌ها، در پایان آزمایش جوش نبشی بالایی به تیر دچار شکست کلی و یا ترک خوردگی قابل توجه در طول خود گردید. همچنین در جوش نبشی بالایی به ستون نیز ترک خوردگی قابل توجه بود. ترک خوردگی‌ها در برخی از این جوشها بصورت سرتاسری بوده و در برخی دیگر به چند سانتی متر محدود می‌شد. ترک خوردگی در جوش نبشی پایینی به تیر تنها در تعداد معدودی از نمونه‌ها مشاهده گردید. این ترک خوردگی‌ها در همه نمونه‌ها (به جز نمونه T3) به یک تا ۲ سانتی متر محدود می‌گردد و تنها در نمونه T3 بدلیل کیفیت پایین جوش ترک خوردگی در کل طول آن اتفاق افتاد. در تمامی

نمونه‌ها ترک خوردگی در جوشهای قائم نبشی پایینی به ستون تنها به جوش یکی از این نبشی‌های اتصال محدود می‌شد. در بیشتر موارد این ترک خوردگی تنها در یکی جوش‌های قائم که نبشی را به ستون متصل می‌سازد اتفاق افتاده است و تنها در نمونه T5 ترک خوردگی در هر دو جوش قائم مربوط به یکی از نبشی‌های پایینی اتفاق افتاد که محدود به ۲ تا ۳ سانتی متر بود.

با توجه به موارد عنوان شده می‌توان دریافت که شکست در جوشهای نبشی‌های فوقانی یکی از دلایل اصلی کاهش ظرفیت لنگر گیری نمونه‌ها است.

۵-۳- سختی اولیه و مقاومت نهایی نمونه‌ها:

در جدول (۶) سختی اولیه و مقاومت نهایی مربوط به نمونه‌ها آورده شده است. با نگاهی به این جدول می‌توان دریافت که سختی اولیه و مقاومت نهایی در نمونه‌ها با افزایش طول نبشی‌ها افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع تیر نیز باعث افزایش ایندو پارامتر می‌گردد. همانطور که ملاحظه می‌گردد در تمامی نمونه‌ها مقاومت نهایی اتصال کوچکتر از لنگر تسلیم و پلاستیک تیرها است لذا اگر چه در تیرها در محل اتصال نبشی‌ها به بال تیر، تغییر شکل‌های موضعی رخ می‌دهد لیکن تیرها دچار تغییر شکل پلاستیک ناشی از خمش کل مقطع نمی‌گردند و شکست قبل از تیر، در اتصال رخ می‌دهد. شکل (۱۷) و (۱۸) نمونه‌های T3 و T6 که بیشترین طول نبشی و در نتیجه بیشترین میزان مقاومت نهایی را دارند، پس از پایان آزمایش نشان می‌دهد. بازرسی تیر نشان داد که در این مرحله هیچگونه انحنایی در تیرها وجود نداشته و با توجه به ترکهای قابل توجه در اتصالات نبشی‌ها و از دست رفتن ظرفیت تحمل لنگر، اتصال عملاً بصورت قیچی سان در آمده است.

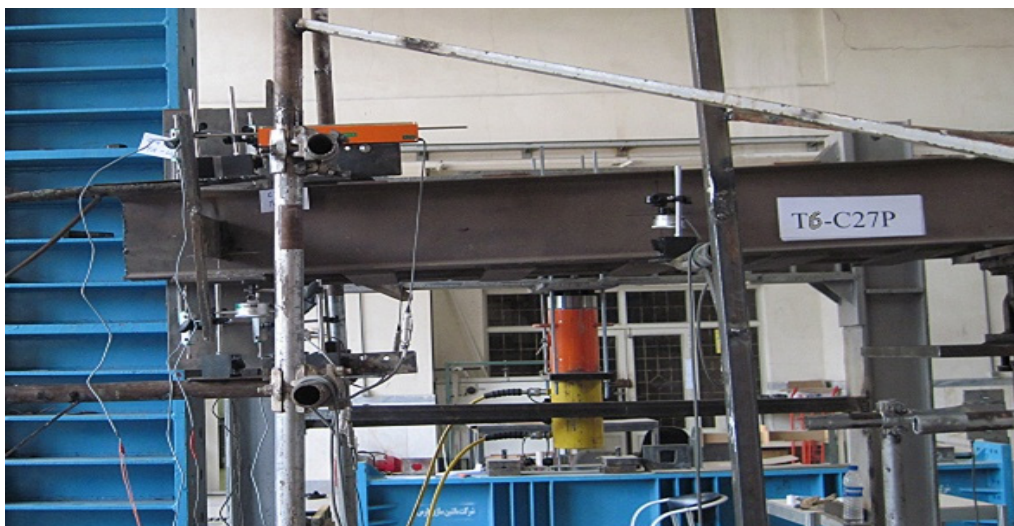
جدول (۶): سختی اولیه و مقاومت نهایی نمونه‌ها

نمونه	T1	T2	T3	T4	T5	T6
سختی اولیه (ton.m/rad)	۵۲۱	۷۸۰	۱۲۲۹	۶۶۵	۱۱۸۱	۱۳۸۰

۳/۲۵	۴/۹	۷/۹۵	۴/۵	۶/۷۵	۸/۷۵	مقاومت نهایی (ton.m)
------	-----	------	-----	------	------	----------------------



شکل (۱۷): تغییر شکل در نمونه T3 در در یکی از سیکل‌های آخر بارگذاری

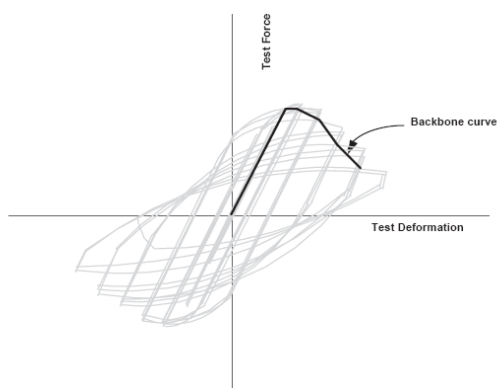


شکل (۱۸): تغییر شکل در نمونه T6 در یکی از سیکل‌های آخر بارگذاری

نیرو (در سیکل i ام و قسمت برگشت (کاهش نیرو) در سیکل i-1 ام بدست می آید (شکل ۱۹).

۴-۵- استخراج منحنی پشتواره:

در این قسمت به استخراج منحنی پشتواره بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۱۵] پرداخته میشود. بر اساس این منحنی میتوان کنترل شونده بودن نمونه بر اساس نیرو و یا تغییر شکل را مشخص نمود و همچنین سطوح عملکرد مربوط به نمونه های کنترل شونده توسط تغییر شکل را تعیین نمود. بر اساس روش ارائه شده در مرجع فوق منحنی پشتواره از وصل نمودن نقاط تقاطع رفت (افزایش



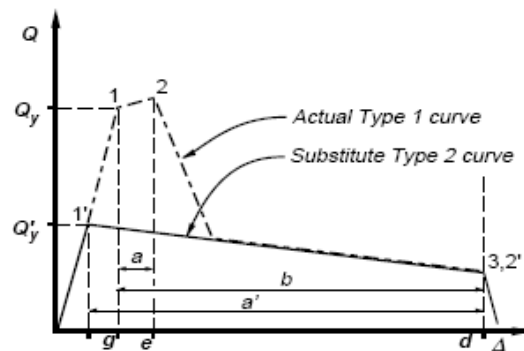
شکل (۱۹): منحنی پشتواره بدست آمده برای منحنی

هیسترسیس نشان داده شده [۱۵]

در نهایت منحنی پشتواره بدست آمده در قالب منحنی نشان داده شده در شکل (۲۰) قرار میگیرد. در صورتی میتوان عضوی را کنترل شونده توسط تغییر شکل دانست که یکی از دوشروط زیر وجود داشته باشد و در غیر اینصورت عضو کنترل شونده توسط نیرو قلمداد می شود.

(الف) - منحنی چند خطی (منحنی میانگین) نیرو تغییر شکل که در قسمت ۲ بدست آمده می بایست با یکی از منحنی های ۱ و ۲ که در شکل (۲۰) نمایش داده شده است مطابقت کند و مقدار پارامتر e که در این شکل نشان داده شده است، حداقل دو برابر مقدار g (در همان شکل) باشد.

(ب) - منحنی نیروی تغییر شکل خطی مرکب عضو که بر اساس قسمت ۲ بدست آمده با شکل ۱ در منحنی (۲۰) مطابقت می کند و پارامتر e کمتر از دو برابر g هست اما پارامتر تغییر شکل d حداقل دو برابر پارامتر تغییر شکل g است در این حالت معیار پذیرش ممکن است بوسیله ترسیم دوباره منحنی نیرو تغییر شکل بصورت منحنی نوع ۲ تخمین زده شود. در شکل (۲۰) چگونگی انجام این عمل نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می گردد ناحیه ای که در آن کاهش مقاومت وجود دارد امتداد داده می شود تا در نقطه ۱ منحنی اولیه را قطع کند و منحنی شبیه به منحنی نوع ۲ جایگزین منحنی نوع ۱ می گردد.



شکل (۲۰): منحنی نیرو - تغییر مکان جایگزین منحنی اولیه [۱۵]

سطح عملکرد ایمنی جانبی در نمونه های کنترل شونده توسط تغییر شکل، ۷۵ در صد تغییر شکل در نقطه ۲ در منحنی نوع ۱ است. سطح عملکرد آستانه فرو ریزش نیز، ۷۵ در صد تغییر شکل نقطه ۳ در همین منحنی و نه بزرگتر از تغییر شکل در نقطه ۲ می باشد. در شکل (۲۱) منحنی پشتواره شش نمونه مورد آزمایش که با استفاده از این روش حاصل شده، آورده شده است.

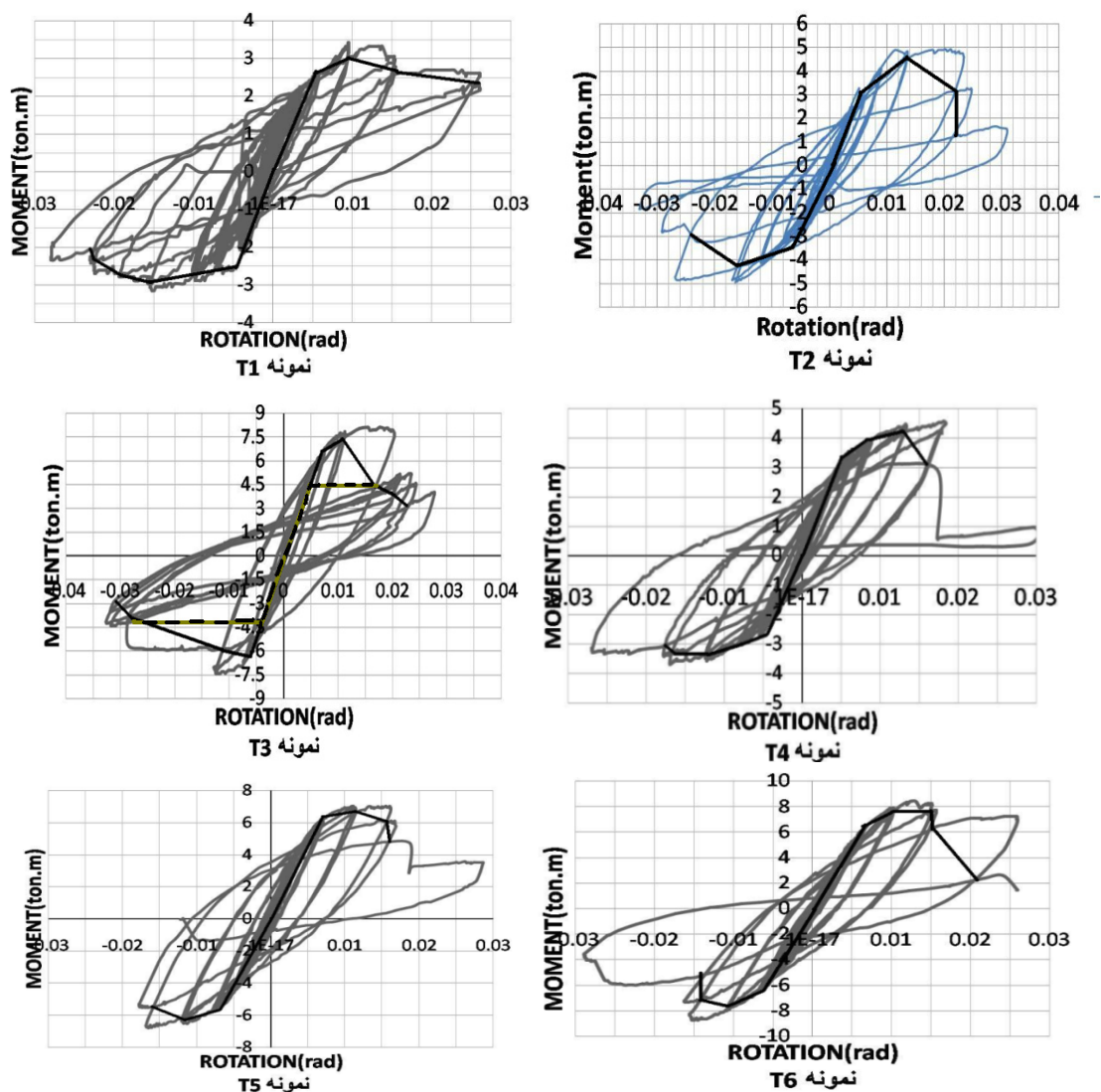
همانطور که ملاحظه می گردد منحنی همه نمونه ها به جز نمونه T3، شبیه به منحنی ۱ در شکل (۲۰) می باشند و میتوان این نمونه ها را طبق ضوابط ارائه شده در فوق کنترل شونده بر اساس تغییر شکل دانست. لازم به یادآوری است که شکست نمونه T3 بدین نحو بدلیل کیفیت فوق العاده پایین جوش بوده است. با استفاده از این منحنی های پشتواره بدست آمده و ضوابط عنوان شده در قسمت قبل نقاط g و e (شکل (۲۰)) و سطوح عملکرد هر یک از این نمونه ها مطابق جدول (۶) بدست می آید.

این پارامترها بر اساس میانگین آنها در حالت منفی و مثبت بدست آمده است. لازم بذکر است که نمونه T3 را نیز میتوان با ترسیم منحنی پشتواره طبق منحنی (۲) شکل (۲۰) کنترل شونده توسط تغییر شکل دانست. این منحنی بصورت نقطه چین ترسیم شده است. نکته قابل تامل در سطوح عملکرد بدست آمده آنست که در این نمونه ها با افزایش طول نبشی و ارتفاع تیر، دوران متناظر با سطوح عملکرد، کاهش می یابد.

جدول (۶): سطوح عملکرد در نمونه های کنترل شونده

توسط تغییر شکل

نمونه	g (rad)	e (rad)	ایمنی جانبی (rad)	آستانه فروریزش (rad)
T1	۰/۰۰۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۲۷۵	۰/۰۱۷
T2	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱۷۵	۰/۰۱۵
T3	۰/۰۰۶	۰/۰۱	۰/۰۰۷۵	۰/۰۱
T4	۰/۰۰۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶
T5	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱۲۵	۰/۰۱۵
T6	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۴



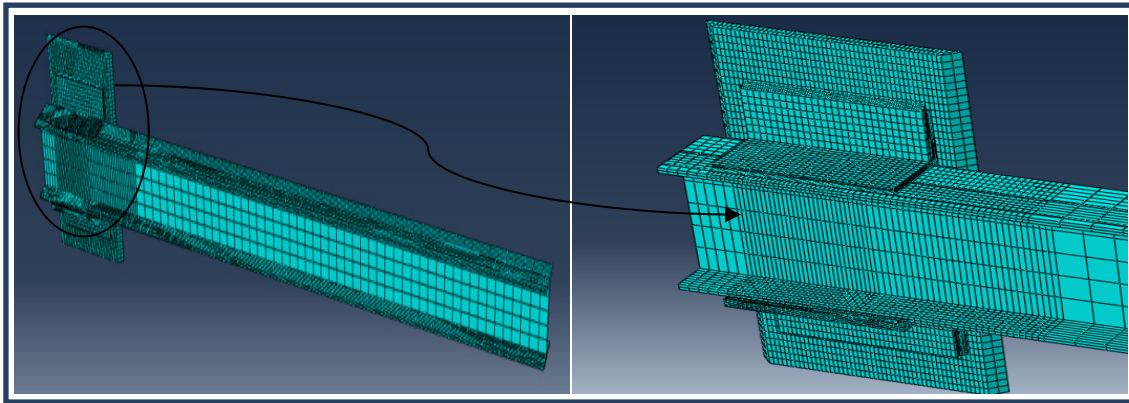
شکل (۲۱): منحنی پشتواره نمونه ها بر اساس منحنی لنگر - چرخش آنها

شده در آزمایشات، تنها ورق سمت این تیر در این مدلها منظور شد (شکل (۲۲)).

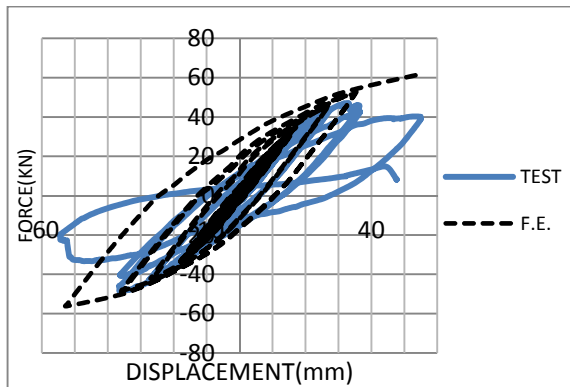
در این مدلسازی مابین بالهای نبشیها و بالهای تیر و ورق از المان CONTACT استفاده شده است. اثرات بستهایی که دو تیر را در فواصل ثابت ۳۰ سانتی متری به یکدیگر متصل کرده اند بوسیله جلوگیری از حرکت خارج از صفحه در محل همین بستها لحاظ شده است. بارگذاری نیز مطابق پروتکل استفاده شده در آزمایشات به صورت تغییر مکان به انتهای تیر اعمال گردید. لازم بذکر است در این مدلسازی ترک خوردگی در جوش و یا فولاد لحاظ نشده است.

۶- مدلسازی المان محدود:

آنالیز المان محدود نمونه ها بوسیله نرم افزار ABAQUS انجام گرفته است. مدلها از المانهای ۸ گرهی سه بعدی ساخته شده اند. پلاستیسیته ماده بوسیله معیار فون مایزس تعریف شده است. داده های مورد نیاز در آنالیز نیز از نتایج آزمایشات کشش انجام شده بر روی جوش و فولاد استخراج شد. در این مدلسازی اثرات سخت شوندگی kinematic و Isotropic نیز لحاظ شده است. به جهت آنکه نمونه از تقارن برخوردار است تنها تیر یک سمت به همراه نبشی های آن مدلسازی گردید و از قوطی استفاده



شکل (۲۲): مدل المان محدود نمونه ها

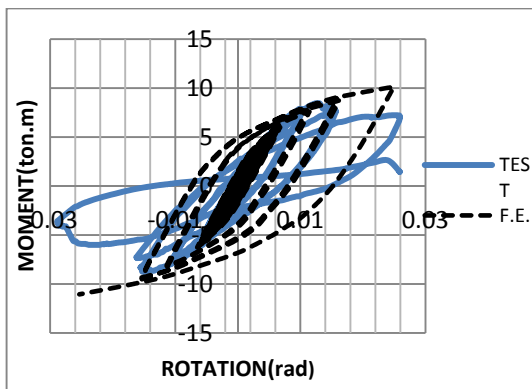


شکل (۲۳): منحنی نیرو- تغییر مکان انتهای تیر نمونه T5 تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای بدست آمده از آزمایش و آنالیز المان محدود

در شکل (۲۵) نیز منحنی های حاصل از دو روش تحت کل سیکلهای بارگذاری آورده شده است. همانطورکه ملاحظه میگردد تطابق مناسبی قبل از بروز ترک خوردگی وجود دارد و پس از آن بدلیل بروز ترک در نمونه و کاهش لنگر گیری اتصال تفاوت در منحنی‌های حاصل از دو روش مشهود است. تحلیل های المان محدود برای سایر نمونه ها نیز انجام شده است. نتیجه نهایی همه آنها، همراه با مقایسه با نتایج آزمایشها در شکل ۲۶ ارائه شده است. در تمام نمونه ها، مشابه نمونه T5، منحنی لنگر-دوران تا قبل از بروز ترک برای دو روش تطابق مناسبی دارد. لیکن در سیکلهایی که ترک در نمونه ها ایجاد شده، به دلیل عدم مدل سازی ترک، نتایج تحلیل F.E. مقاومت و سختی بیشتری را پیش بینی می کند.

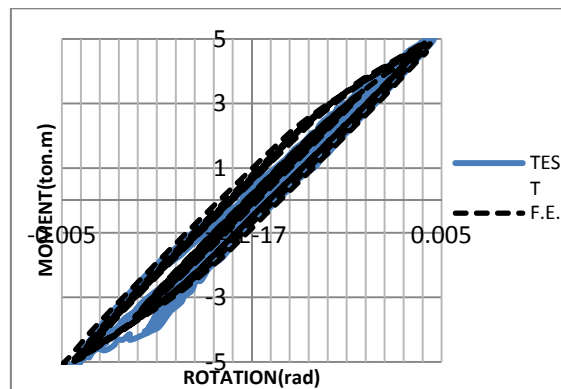
۷- مقایسه نتایج حاصل از آزمایش و مدل سازی المان محدود:

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش و مدل سازی المان محدود شامل سختیهای اولیه، مقاومت نهایی و منحنی های لنگر- چرخش نمونه ها مقایسه می شود. یکی از مواردی که میتواند مبنای مناسبی برای مقایسه اولیه نتایج حاصل از دو روش قرار گیرد منحنی نیرو- تغییر مکان انتهای تیر است. در شکل (۲۳) منحنی نیرو- تغییر مکان حاصل از دو روش برای نمونه T5 آورده شده است. این نمونه به دلیل عدم ترک خوردگی تا مراحل نهایی بارگذاری جهت مقایسه مناسب تشخیص داده شد. در این نمودار نیز تا قبل از بروز ترک خوردگی در نمونه، تطابق مناسبی بین دو منحنی حاصل شده است. در شکل (۲۴) منحنی های لنگر - چرخش مربوط به نمونه T5 تا سیکل ۱۸ آورده شده است. همانطور که ملاحظه میگردد در این سیکل ها تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از آزمایش و آنالیز المان محدود وجود دارد. تنها تفاوت مشاهده شده در این سیکل میزان حداکثر لنگر های حاصل از این دو روش است که بدلیل صعوبت کنترل دقیق میزان جابجایی انتهایی تیر در جابجایی های کم است.



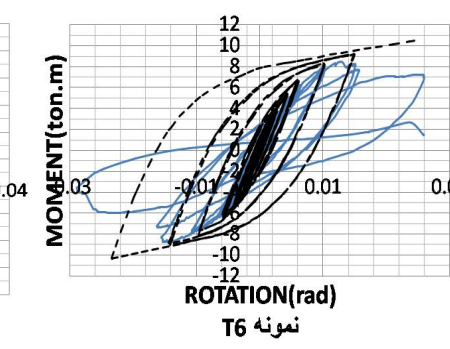
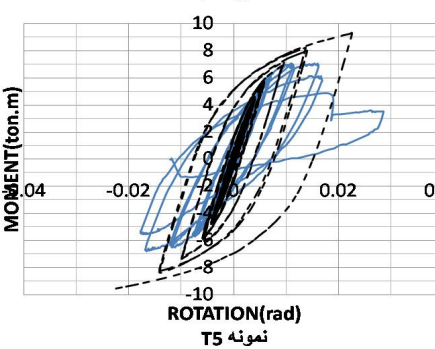
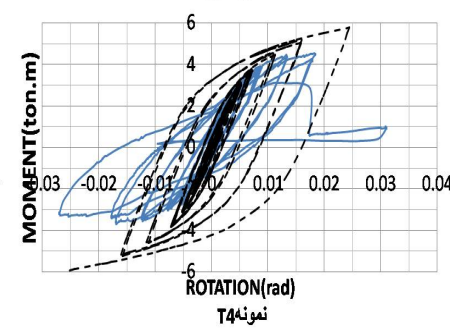
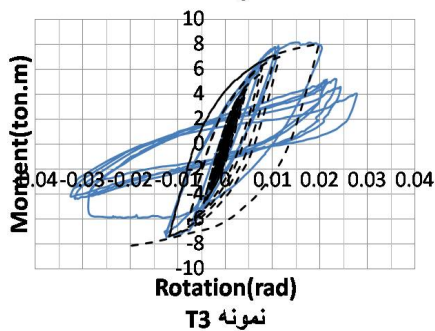
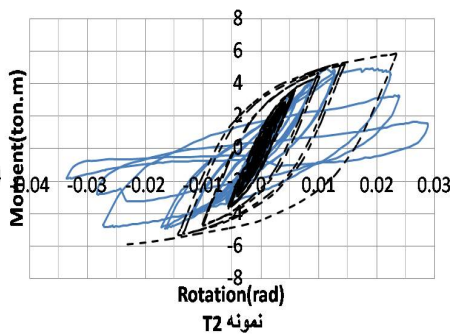
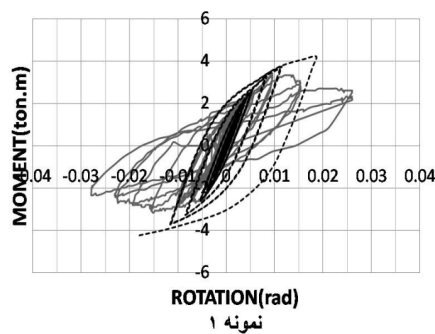
شکل (۲۵): منحنی لنگر - چرخش نمونه T5 تحت اثر بارگذاری چرخه ای بدست آمده از آزمایش و آنالیز المان محدود

روش تقریباً به یکدیگر نزدیک است اما به دلیل آنچه قبلاً نیز بیان شد (ترک خوردگی) تفاوت بین مقاومت نهایی حاصل از دو روش مشهود است.



شکل (۲۴): منحنی لنگر - چرخش نمونه T5 تحت اثر بارگذاری چرخه ای بدست آمده از آزمایش و آنالیز المان محدود تا سیکل ۱۸ بارگذاری

در جدول (۷) نیز سختی اولیه و مقاومت نهایی مربوط به نمونه ها که از تحلیل و آزمایش بدست آمده، ارائه شده است. سختی اولیه مربوط به نمونه ها بدست آمده از ایندو



شکل (۲۷): منحنی رفتاری نمونه تحت اثر بارهای رفت و برگشتی بدست آمده از آزمایش و مدل سازی المان محدود



جدول (۷): سختی اولیه و مقاومت نهایی بدست آمده از آزمایش و مدلسازی المان محدود

پارامتر	نمونه	T6	T5	T4	T3	T2	T1
سختی اولیه (ton.m/rad)	آزمایش	۱۳۸۰	۱۱۸۱	۶۶۵	۱۲۲۹	۷۸۰	۵۲۱
	آنالیز FE	۱۳۶۸	۱۲۰۵	۶۵۸	۱۲۶۳	۷۹۵	۵۳۸
مقاومت نهایی (ton.m)	آزمایش	۸/۷۵	۶/۷۵	۴/۵	۷/۹۵	۴/۹	۳/۲۵
	آنالیز FE	۱۰/۲۵	۹/۲۵	۵/۸۵	۸	۵/۹	۴/۱۵

نتیجه گیری:

در این تحقیق جهت شناخت رفتار اتصالات خورجینی تحت بارهای چرخه ای، از آزمایش بر روی شش نمونه از این اتصال بهره گرفته شد. با توجه به مشاهدات حین آزمایش و همچنین بررسی ها و مطالعات انجام شده و منحنی های رفتاری بدست آمده از این آزمایشات، نتایج زیر حاصل شد.

۱- سختی اولیه و مقاومت نهایی در نمونه ها با افزایش طول نبشی ها و ارتفاع تیر افزایش می یابد. سختی اولیه اتصالات آزمایش شده با توجه به این عوامل بین ۵۲۱ تا ۱۳۸۰ تن متر بر رادیان متغیر است. همچنین مقاومت نهایی در تمامی اتصالات کمتر از لنگر پلاستیک در تیرها می باشد.

۲- در تمامی نمونه های آزمایش شده تحت بارهای چرخه ای، اولین ترک خوردگی در جوش نبشی های بالا به تیر و یا ستون و یا در جوش نبشی پایینی به تیر اتفاق افتاده و تنها در یک نمونه همزمان با ترک خوردگی ها در این محل ها ترک خوردگی در جوش نبشی پایین به ستون نیز اتفاق افتاد که طول آن پس از انجام آزمایش کمتر از ۲ تا ۳ سانتی متر بود.

۳- براساس آزمایشات انجام شده در این تحقیق، شکست کلی در جوش نبشی های فوقانی به تیر یا ستون عامل اصلی کاهش ظرفیت لنگر اتصالات خورجینی متداول تحت اثر بارهای چرخه ای است و شکست در جوش نبشی پایینی به ستون که از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است، در این آزمایشها محدود به یکی از جوشهای قائم

نبشی در یک سمت یکی از نمونه ها و به طول حداکثر ۳ تا ۴ سانتی متر بود.

۴- بر اساس منحنی پشتواره بدست آمده برای نمونه ها بر اساس آیین نامه FEMA، این اتصالات را می توان کنترل شونده بر اساس تغییر شکل دانست.

۵- بر اساس نتایج آزمایشهای حاضر، میزان دوران قابل قبول برای سطح عملکردی ایمنی جانی در نمونه ها بر اساس دوران، از ۰/۰۰۷۵ تا ۰/۰۱۲۷ متغیر است. همچنین برای سطح عملکرد آستانه فروریزش، این پارامتر از ۰/۰۱ تا ۰/۰۱۷ رادیان متغیر است.

۶- نتایج مدلسازی المان محدود می تواند رفتار اتصال را تا قبل از آغاز ترک خوردگی بطور مناسبی پیش بینی نماید. لیکن با توجه به قابلیت تحمل تغییر شکل های بیشتر بعد از این مرحله، ضروری است تحلیل های المان محدود با در لحاظ نمودن اثرات ترک خوردگی انجام شود.

۷- اتصالات خورجینی پس از بروز و گسترش ترک در اتصالات نبشی هایشان رفتاری فیچی سان خواهند داشت. لذا در صورت عدم شکست اتصال نبشی پایین به ستون و داشتن مقاومت لازم برای تحمل بار ثقلی، این اتصالات می توانند بدون جذب لنگر صرفاً بار ثقلی را تحمل نمایند. بدیهی است در این حالت قاب دارای اتصال خورجینی نیاز به یک سیستم باربر لرزه ای دارد.

مراجع:

- ۱- کرمی، رضا، «خواص مکانیکی اتصالات خرجینی»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر حسن مقدم، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۰.
- ۲- طاحونی، شاپور، فرجودی، جمشید، «گزارش مطالعه صلیبیت اتصالات خرجینی»، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، ۱۳۷۱.
- ۳- حسینیخانی، علی، «اتصالات خورجینی»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر علی اکبر آقاچوچک، دانشگاه آزاد واحد جنوب، ۱۳۷۱.
- ۴- فلاح، احمد علی، «آنالیز دینامیکی غیرخطی اتصالات خرجینی نیمه صلب تحت بارهای زلزله»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر محمد علی برخوردار، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۳.
- ۵- طریقت، امیر، «مطالعه رفتار الاستیک اتصالات خرجینی»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر شاهرخ مالک، دانشگاه تهران، ۱۳۷۳.
- ۶- یعقوبی سرسختی، مجتبی، «بررسی انواع اتصالات در قابهای فولادی و ارزیابی تجربی و تئوریک رفتار اتصالات موسوم به رکابی (خرجینی)»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر رضا رازانی، دانشگاه شیراز، ۱۳۷۳.
- ۷- ملکی، مهدی، «بررسی عملکرد رفتار اتصالات خرجینی تحت بارهای دینامیکی»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر محسن تهرانی زاده، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۲.
- ۸- مزروعی، علی، مصطفایی، حسین، «روشهای بهسازی اتصالات خرجینی»، دومین کارگاه تخصصی اتصالات خرجینی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۷.
- ۹- صادقیان، پدram، «روشهای تحلیل و تقویت اتصالات خرجینی»، رساله کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر حسن مقدم، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۸.
- ۱۰- دهقانی رنانی، مهدی، «بررسی نظری و تجربی اتصالات تیرهای خورجینی به ستون و ارائه جزئیات یک اتصال گیردار جدید»، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر میرقادری و دکتر مزروعی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.
- ۱۱- مویید علائی، علی، «تقویت لرزه ای سازه ای اتصال خورجینی»، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر حسن مقدم، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۹.
- ۱۲- فاضل، داود، «کاربرد شبکه های عصبی در منحنی لنگر-دوران اتصال خورجینی»، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر علی کاوه، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ۱۳۷۸.
- ۱۳- وشکینی، پیمان، «تعیین ضریب رفتار **R** برای قابهای دارای اتصال خورجینی»، پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر علی اکبر آقاچوچک، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۰.
- ۱۴- پیرایه گر، شبیر، «عملکرد لرزه ای اتصال لنگر گیر به ستون»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۶.
- ۱۵- نشریه شماره ۳۶۰، «دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود»، معاونت امور فنی دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵.
- 16- FEMA356. "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings", building seismic safety council, Washington, D.C., 2000
- 17- AISC. "Seismic provisions for structural steel buildings", American Institute of steel construction, Chicago, 2005
- 18- D.T. Pachoumis, E.G. Galoussis, C.N. Kalfas, I.Z. Efthimiou. "Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections _ experimental analysis and finite element model simulation", journal of Engineering Structures (2010) 2683_2692.
- 19- S.R. Mirghaderi, M. Dehghani Renani. "The rigid seismic connection of continuous beams to column" Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 1516-1529.
- 20- C.Uang, D. Bondad, C. Lee. "Cyclic performance of haunch repaired steel moment connections: experimental testing and analytical modeling". *Engineering Structures*, Vol. 20, Nos 4-6, pp. 552-561, 1998

