١٥٤٧٢

٩٩٠٦٥

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه

تحلیل غیر خطی رفتار ورق‌های اتصال و مهاربندی فولادی همگرا تحت اثر بارهای چرخه‌ای

آرش قلمی فرد

استاد راهنما:
دکتر علی‌اکبر آقاکوچک

۱۳۸۷ /۵/۲۲

زمستان ۱۳۸۶

۹۹۰۶۵

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان

آقای آرش قلمی فرد پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان تحلیل غیر خطی رفتار ورقهای اتصال و مهاربندی فولادی همگرا تحت اثر بارهای چرخه ای** در تاریخ ۱۳۸٦/۱۲/۲۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر علی اکبر آقا کوچک	استاد	
استاد ناظر	دکتر مسعود سلطانی محمدی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر حمید محرمی	~~استادیار~~ دانشیار	
استاد ناظر	دکتر همایون استکانچی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر حمید محرمی	~~استادیار~~ دانشیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تأیید است.

امضای استاد راهنما:

۹۹۰٦٥

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب آرش قلی فرد دانشجوی رشته مهندسی عمران سازه مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: آرش قلی فرد

تاریخ و امضا: ۸۷/۳/۳۱

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از استاد محترم جناب آقای دکتر *علی‌اکبر آقاکوچک* که در تمامی مراحل تهیه و تدوین این پایان‌نامه از کمک‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان بهره‌مند بوده‌ام تشکر و قدردانی نمایم. امید که در به کار بستن آنها موفق بوده باشم و مجموعهٔ حاضر مقبول اهل نظر بیفتد.

همچنین از پدر و مادر مهربانم که همواره مرا تکیه‌گاهی اطمینان بخش بوده‌اند سپاس‌گزارم. بی شک بدون یاری و همراهی و صبر بی مثالشان طی این مرحله برایم امکان پذیر نبود.

چکیده

برای بررسی رفتار ورق های اتصال (Gusset Plates) تحت بارهای چرخه‌ای، با استفاده از نرم افزار ANSYS تعدادی مدل ساخته شد. مدل‌های ساخته شده که در آنها اثر سختی اعضای قاب، رفتار غیر خطی مواد و اشکالات اولیه قطعات لحاظ شده بود با استفاده از نتایج آزمایشات اعتبارسنجی شدند. پس از آن مطالعهٔ پارامتریکی برای بررسی اندرکنش ورق اتصال و مهاربند تحت بارهای چرخه‌ای و تاثیر ضخامت و هندسهٔ ورق اتصال و نیز سختی و طول مهاربند بر رفتار مجموعه اتصال انجام گرفت. در این مطالعهٔ پارامتریک از چهار نوع ورق اتصال استفاده شد که در دو مورد از آنها طول آزادی معادل با دو برابر ضخامت ورق اتصال در انتهای مهاربند بر مبنای ضوابط آیین‌نامهٔ *AISC2005* قرار داده شده بود. بررسی آندسته از ترکیبات ورق اتصال- مهاربند که در آنها ورق اتصال دارای ظرفیت فشاری کمتری نسبت به مهاربند بود نشان داد این ترکیبات تحت بارهای چرخه‌ای دارای رفتار پایدار و نیز ظرفیت استهلاک انرژی قابل توجهی هستند. علاوه بر این منحنی‌های رفتار ورق‌های اتصال در این حالت نشان دهندهٔ آن است که می‌توان آنها را کنترل شونده توسط تغییرشکل دسته‌بندی نمود. همچنین نتایج این مطالعهٔ پارامتریک حاکی از آن است که در نمونه‌های تحلیل شده ظرفیت فشاری مجموعهٔ بادبند و ورق اتصال با افزایش طول مهارنشدهٔ بادبند تغییر چندانی نکرده و ثابت می‌ماند و بر عکس این ظرفیت با تغییر سختی مقطع بادبند دستخوش تغییر عمده‌ای می‌شود. ورق‌های اتصالی که در آنها فاصله 2t ایجاد شده بود برعکسِ ورق‌هایی که در آنها این فاصله ایجاد نشده بود، ظرفیت فشاری کمتری نسبت به تخمین‌هایی که با استفاده از روابط طراحی به‌دست می‌آید داشته و در اثر کمانش مشخصه‌های عملکردی آنها اُفت قابل توجهی را تجربه نمودند.

کلمات کلیدی: فولاد، اتصالات، ورق اتصال، بار چرخه ای، مهاربند همگرا

فهرست مطالب

مقدمه ۱

۱- پیشینه تحقیق ۶

۱-۱- عملکرد ورق‌های اتصال در محدوده رفتار ارتجاعی مواد ۶

۱-۲- عملکرد ورق‌های اتصال در محدوده رفتار غیر ارتجاعی مواد ۱۱

۱-۲-۱- بارگذاری یکنوا ۱۱

۱-۲-۲- بارگذاری چرخه‌ای ۲۵

۲- مدل‌سازی و اعتبار سنجی ۳۹

۲-۱- مقدمه ۳۹

۲-۲- مش‌بندی و نوع المان ۴۱

۲-۳- عیوب اولیه قطعات ۴۳

۲-۴- رفتار مصالح ۴۴

۲-۵- تحلیل ۴۵

۲-۶- مدل ساخته شده در نرم افزار ANSYS ۴۵

۲-۷- ارزیابی تحلیل‌ها با نتایج والبریج ۴۶

۳- مطالعه پارامتریک ۴۷

۳-۱- مقدمه ۴۷

۳-۲- مدل اجزا محدود ۴۸

۳-۳- مشخصات نمونه‌ها ۵۰

۳-۴- بارگذاری ۵۴

۳-۵- بررسی گسیختگی در اعضا ۵۶

۳-۵-۱- نیاز به مدل‌های مبتنی بر واقعیت برای تخمین خستگی و گسیختگی در فولاد ۵۷

۳-۵-۲- مدل رشد چرخه‌ای حفره‌ها CVGM برای بررسی آغاز گسیختگی نرم در فولادهای سازه‌ای ۵۹

۳-۶- نتایج تحلیل‌های انجام یافته ۶۴

۳-۶-۱- ورق‌های GA1 ۶۷

۳-۶-۲- ورق‌های GA2 ۹۸

۳-۶-۳- ورق‌های GB2 ۱۰۴

۳-۶-۴- ورق‌های GB1 ۱۱۰

۳-۷- منحنی رفتار سامانهٔ مهاربندی ۱۱۵

۳-۷-۱- رفتار اجزای سازه ۱۱۵

۳-۷-۲- منحنی رفتار بادبند ۱۱۷

۳-۷-۳- منحنی رفتار ورق اتصال ۱۱۹

۴- نتایج و پیشنهادات ۱۲۱

۴-۱- مقدمه ۱۲۱

۴-۲- نتایج ۱۲۲

۴-۳- پیشنهادات برای تحقیقات آینده ۱۲۴

۵- مراجع ۱۲۶

۶- پیوست الف ۱۲۸

مقدمه

یکی از رایج‌ترین سامانه‌های باربر جانبی در ساختمان‌های فولادی که در ایران نیز کاربرد فراوانی دارد ، سامانه باربر جانبی با مهاربندهای همگراست. در این سامانه رابط بین قاب و اعضای مهاری ، عمدتاً ورق‌های فولادی موسوم به ورق‌های اتصال می‌باشد.

مشاهدهٔ آثار زلزله‌های مختلف بر روی ساختمان‌های فولادی‌ای که سامانهٔ باربر جانبی آنها از این نوع بوده است نشان می‌دهد که نحوهٔ اجرا و ویژگی‌های ورق اتصال ، اثر تعیین کننده‌ای در عملکرد این سامانهٔ باربر جانبی دارد.

در حال حاضر هدف از طراحی اتصالات و اجزای آنها به گونه‌ای است که هنگام وارد شدن بارهای ناشی از زلزله ، ورق‌های مذکور حالت ارتجاعی خود را حفظ نمایند و در عوض تمام تغییرشکل‌های خمیری به وسیلهٔ بادبندها تحمل شوند.

آیین‌نامه‌های موجود به خوبی اعضای این سامانه را پوشش داده و روابط نسبتاً مفصلی در این زمینه ارائه داده‌اند و به طور مداوم آنها را روزآمد می‌کنند ، اما هنگامی که نوبت به طراحی اتصالات این سامانهٔ باربر جانبی می‌رسد خلأ قابل ملاحظه‌ای در آیین‌نامه‌ها به چشم می‌خورد.

این خلأ موجب شده است تا محققین مختلف از سال‌های ۱۹۵۰ تا کنون جنبه‌های مختلف عملکرد ورق‌های اتصال را مورد بررسی قرار دهند. به طور کلی موضوع این تحقیقات تا اواخر دهه ۷۰ میلادی بررسی عملکرد این ورق‌ها در محدودهٔ رفتار ارتجاعی مواد تحت بارهای کششی بوده است. بر اساس نتایج این تحقیقات اصلاحاتی در رابطه با روش طراحی ورق‌های اتصال ارائه شد. در یکی از مهم‌ترینِ آنها *ویتمور* روشی برای تعیین ظرفیت کششی ورق‌های اتصال پیشنهاد نمود که تاکنون نیز در طراحی ورق‌های اتصال کاربرد دارد.

از اوایل دههٔ ۸۰ میلادی محققین به تدریج به مسالهٔ نحوهٔ تعیین ظرفیت فشاری ورق‌های اتصال پرداختند. آنان با طراحی و انجام دادن آزمایش‌های گوناگون ، جنبه‌های مختلف عملکرد ورق‌های اتصال تحت بارهای فشاری و همین‌طور میزان دقت روش ویتمور در تخمین ظرفیت کششی ورق‌ها را بررسی نمودند.

تورنتون در سال ۱۹۸۴ با انتشار مقاله‌ای با بررسی عمیق مسالهٔ طراحی ورق‌های اتصال یک روش کرانه پایین برای تعیین ظرفیت نهایی اتصال در حالت فشار ارائه کرد. این روش امروزه به صورت گسترده‌ای در تعیین ظرفیت فشاری ورق‌های اتصال به کار می‌رود. در بیشتر آزمایش‌هایی که تا اواسط دهه ۹۰ انجام شده‌اند بارگذاری به صورت یکنوا بوده‌است.

در سال ۱۹۸۲ *آستانه اصل* آزمایش‌هایی بر روی رفتار چرخه‌ای بادبندهای با مقطع جفت نبشی با ورق‌های اتصال انتهایی انجام داد. در برخی از این آزمایش‌ها ورق‌های اتصال در همان چرخه‌های اولیهٔ بارگذاری دچار گسیختگی ترد شدند. از این روی برای بررسی علت ایجاد این گسیختگی در ورق‌ها ، وی دست به مشاهداتی زد و در نهایت بر اساس آنها نتیجه گرفت: *چنانچه در انتهای بادبند یک فاصله آزاد به اندازهٔ دو برابر ضخامت ورق اتصال ایجاد شود از بروز این گسیختگی ترد در ورق جلوگیری می‌شود*. به نظر می‌رسد این اولین باری است که ورق‌های اتصال برخلاف روش مرسوم مبتنی بر طراحی بر اساس مقاومت ، از دیدگاه عملکردی بررسی شده و روشی برای توزیع و تنظیم تنش‌ها و کرنش‌های خمیریِ ایجاد شده در ورق‌های اتصال پیشنهاد

شده‌است. در ویرایش‌های اخیر *مقررات لرزه‌ای AISC* ایجاد فاصله 2t در انتهای بادبند در قاب‌های با مهاربند همگرای ویژه الزامی شده‌است.

در طی این سال‌ها با بهبود کارایی رایانه‌ها و پیشرفت‌های حاصل در روش‌های تحلیل اجزا محدود به تدریج از این روش‌ها برای مطالعهٔ رفتار ورق‌های اتصال نیز استفاده شد. به طور مثال بررسی انجام شده توسط چنگ و همکارانش نشان داد روش‌های اجزا محدود به خوبی می‌توانند رفتار ورق‌های اتصال را در محدودهٔ رفتار غیر ارتجاعی مواد شبیه سازی نمایند.

در سال‌های پایانی قرن گذشته وقوع زلزله‌های *نورتریج* آمریکا در سال ۱۹۹۴ و *کوبهٔ* ژاپن در سال ۱۹۹۵ و خرابی‌های گستردهٔ ناشی از آنها نشان داد فلسفهٔ طراحی مبتنی بر مقاومت دچار کاستی‌های اساسی است و لازم است عملکرد اجزای سازه تحت بارهای چرخه‌ای مورد بررسی عمیق‌تری قرار گیرند. در این راستا تحقیقات اخیر ، عمدتاً عملکرد ورق‌های اتصال را تحت بارهای چرخه‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. به طور مثال تحقیقات *والبریج* و چنگ از این دسته به شمار می‌روند. این تحقیق نشان داد که می‌توان برخلاف روش مرسوم طراحی مهاربندهای همگرا که در آن ورق‌های اتصال قوی‌تر از بادبند انتخاب می‌شوند ، از ورق‌های ضعیف‌تر از بادبند استفاده کرد و با این کار به ظرفیت جذب انرژی بیشتر و عملکرد متعادل‌تر نسبت به روش مرسوم دست یافت.

مرور تحقیق‌های پیشین نشان می‌دهد برخی از محققین نتیجه گرفته‌اند که هرچه بادبند در داخل ورق اتصال ادامه یابد و تا حد ممکن به اعضای قاب نزدیک‌تر باشد ، عملکرد اتصال بهبود می‌یابد.

ملاحظه می‌شود که این نتایج با نتایج کار *آستانه اصل* مبنی بر ایجاد فاصله 2t در انتهای بادبند مغایرت دارد. یا در جای دیگر ، بر خلاف *آستانه اصل* و *تورنتون* که با ارائه برخی تمهیدات سعی در جلوگیری از کمانش ورق اتصال دارند ، نتایج کارهای چنگ و همکاران نشان می‌دهد که

سامانهٔ ورق ضعیف – بادبند قوی در بسیاری موارد در مقایسه با سامانهٔ ورق قوی – بادبند ضعیف عملکرد بهتری دارد.

با نگاهی به آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام یافته ملاحظه می‌شود که در هر کدام از این موارد برخی جنبه‌های عملکرد ورق اتصال یا بررسی نشده‌اند و یا به صورت محدودی مطالعه شده‌اند. به عنوان مثال همانگونه که شرح داده شد توصیهٔ فاصله 2t در انتهای بادبند بر اساس آزمایش‌هایی صورت گرفته است که در آنها مقطع بادبندها از نوع جفت نبشی است و ورق‌های اتصال علاوه بر هندسهٔ خاص فقط به تیر متصل بوده‌اند و نه به تیر و ستون به‌طور همزمان. در صورتی که هم مقاطع مورد استفاده در قاب‌های با مهاربندی ویژه از تنوع زیادی برخوردارند و هم ورق‌های اتصالی که در اتصالات آنها استفاده می‌شوند. و یا در کارهای چنگ و همکاران طول‌هایی که برای بادبندها انتخاب شده‌اند عمدتاً در عمل به کار نمی‌روند (بادبندهایی با طول تا ۱۰/۵ متر و زاویه 45°). همچنین آنها روشی برای اطمینان از عدم ایجاد ترک در نمونه‌هایی که تحلیل نموده‌اند به کار نبرده‌اند.

متاسفانه به دلیل تفاوت‌های موجود در روش‌های آزمایش ، مقاطع به کار رفته برای بادبندها، فولادهای مصرفی، نحوه اتصال بادبند به ورق و... مقایسهٔ بین نتایج بدست آمده از تحقیقات مختلف امکان پذیر نیست.

از این روی این پایان‌نامه سعی بر آن دارد تا با استفاده از نتایج تحقیقات انجام گرفته در این زمینه و نرم‌افزار اجزا محدود *ANSYS* ، اثر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های عملکردی اتصالات با ورقِ مهاربندهای همگرا از جمله ظرفیت‌های کششی ، فشاری ، پس کمانشی و توانایی جذب انرژی را تحت بارهای چرخه‌ای مورد بررسی قرار دهد.

ضخامت ، شکل و اندازهٔ ورق اتصال و سختی مقطع و طول بادبند از جمله پارامترهای بررسی شده در این پایان‌نامه‌اند. از جمله ویژگی‌های این تحقیق استفاده از روش *CVGM* برای پایش

اندرکنش تنش‌ها و کرنش‌های خمیری و امکان ایجاد ترک در اجزای اتصال است. مبانی این روش در فصل چهارم شرح داده شده است.

در فصل اول این پایان‌نامه به طور خلاصه تحقیقات انجام شده قبلی در رابطه با ورق‌های اتصال مرور شده است. در فصل دوم شیوهٔ مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل‌های اجزا محدود شرح داده شده است. پس از آن در فصل سوم جزئیات مطالعهٔ پارامتریک انجام شده برای بررسی اثر عوامل مختلف بر عملکرد کلی اتصال آمده است. در این فصل مشخصات نمونه‌های ساخته شده ، فلسفهٔ انتخاب آنها و نتایج تحلیل‌های انجام گرفته تشریح شده است. در فصل پایانی نیز نتایج و پیشنهادات حاصل از مطالعهٔ پارامتریک بیان شده است.

۱- پیشینهٔ تحقیق

۱-۱- عملکرد ورق‌های اتصال در محدوده رفتار ارتجاعی مواد

در اولین آزمایش‌های انجام شده بر روی ورق‌های اتصال ، زمانی که هنوز از کرنش سنج در آزمایشات مهندسی سازه استفاده نشده بود ، به جای ورق‌های فولادی ، از ورق‌های باکلیت[1] پرداخت شده استفاده شده است. در این آزمایش‌ها محققان توانستند با تاباندن نور قطبیده بر ورق‌های باکلیت خطوط هم تنش در ورق‌ها را مشاهده و ثبت نمایند. این آزمایش‌ها نشان دادند که نیروهای وارد شده به ورق‌های اتصال از اعضای متصل به ورق ، موجب ایجاد و گسترش تنش در ناحیه ای از ورق در نزدیکی اعضای متصل شده می‌شود. البته با توجه به طبیعت ارتجاعی باکلیت، تنش‌های مذکور از نوع تنش ارتجاعی بودند. نتایج اولین آزمایش‌ها در این زمینه در مقاله راست[2] [ن (۱)] آمده است . در این مقاله علاوه بر نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی ورق‌های اتصال ، به احتمال زیاد اولین تصاویر از توزیع واقعی تنش‌های ارتجاعی در ورق‌های اتصال آمده است. در این مقاله همچنین بسیاری از اصول طراحی ورق‌های اتصال توضیح داده شده است.

---

[1] Bakelite
[2] Rust

در تفسیرهایی که در ارتباط با مقاله راست منتشر شده است ، اطلاعات بسیار مفیدی موجود است. به طور مثال راسل برینکر[1] [ن (۱)] در توضیحات خود به یک سری از آزمایشات ورق‌های اتصال ، احتمالاً از جنس باکلیت که توسط وایس[2] انجام شده است اشاره کرده است. به گفته برینکر، وایس از آزمایشات خود نتیجه می گیرد که توزیع تنش در ورق‌های اتصال در طول یک خط ۳۰ درجه اتفاق می افتد. تقریباً پس از ۱۵ سال ، همان طور که در ادامه توضیح داده خواهد شد ، ویتمور[3] [ن (۱)] برای ورق‌های اتصال یک ناحیه مؤثر پیشنهاد کرد که براساس همین توزیع ۳۰ درجه‌ای تنش در ورق‌های اتصال می باشد . این خطوط ۳۰ درجه مبنای روشی قرار گرفته اند که امروزه در عرف مهندسی سازه به عنوان روش ویتمور شناخته می‌شود.

در سال ۱۹۵۲ ، ویتمور از دانشگاه تنسی نتایج آزمایشات خود را بر روی ورق اتصال منتشر کرد. جنس ورق‌های اتصال آزمایش شده ، آلومینیوم مقاومت بالا با تنش تسلیم حدود 270Mpa و ضریب الاستیسیته 690Mpa بود. در این آزمایش نمونه استفاده شده مدلی از یک گره خرپایی با جفت ورق اتصال بود. نمونه مورد نظر ، یک مدل با مقیاس یک چهارم از یک اتصال خرپایی با دهانه ۹۰ متر بود. ویتمور خطوط هم تنش را به وسیله کرنش‌سنج هایی که بر روی ورق مورد نظر سوار شده بودند ، ترسیم کرد. اشکال ترسیم شده به خوبی امتداد توزیع تنش‌ها را تقریباً در طول خطوط ۳۰ درجه با عضو متصل شده ، نشان می‌دادند.

ویتمور همچنین توزیع تنش نرمال و برشی را در ناحیه بحرانی ترسیم کرد. او نشان داد که نمودارهای تجربی تنش با آنچه که از رابطه تیرها به دست می آید ، متفاوت است ($\tau = \frac{VQ}{It}$ ، $\sigma = \frac{Mc}{I}$) . با این وصف بیشینه تنش‌های نرمال و برشی اندازه گیری شده در طی آزمایش و به دست آمده از رابطه تیرها بسیار به هم نزدیک بودند. این مشاهده می‌تواند توضیح دهد

---

[1] Russell C. Brinker
[2] Wyss
[3] Whitmore

که چرا ورق‌های اتصال طراحی شده با استفاده از رابطه تیرها در مدتی بیش از دو قرن به خوبی کار کرده‌اند. به بیان دیگر تقریباً تمام آزمایشات انجام شده بیانگر این نکته بودند که توزیع تنش در ورق‌های اتصال نمی‌تواند به وسیله رابطه تیرها تخمین زده شود. هر چند رابطه تیرها می‌توانست بیشینه مقدار تنش‌های نرمال و برشی را به صورت قابل قبولی تخمین بزند ، لیکن از تعیین مکان وقوع این تنش‌ها عاجز بود. به همین دلیل است که ورق‌های اتصالی که تا به امروز نیز براساس تنش بیشینه حاصل از رابطه تیرها طراحی می شوند دارای ایمنی کافی هستند.

آزمایش ویتمور دوباره این موضوع را تائید کرد که برای به دست آوردن مقادیر منطقی تنش‌های مستقیم[1] در سطحی از یک ورق اتصال که در انتهای اعضا قرار می گیرد ، می‌توان از اصل توزیع تنش‌ها در ناحیه خطوط ۳۰ درجه استفاده کرد. بر پایه این اصل ساده ، عرض مؤثر یک ورق اتصال، در محل آخرین ردیف اجزای اتصال دهنده عضو مهاری به ورق اتصال (جوش یا پیچ) و بین خطوطی قرار می گیرد که از اولین آنها با زاویه ۳۰ درجه مطابق شکل ۱-۱ و شکل ۱-۲ رسم می‌شود. تنش‌های مستقیم در ورق‌های اتصال ، در نواحی نزدیک اعضای قطری ، از تقسیم کردن نیروی محوری عضو مهاری بر عرض این ناحیه مؤثر که شرح آن داده شد ، به دست می آید. ویتمور علاوه بر پیشنهاد توزیع تنش در ورق‌های اتصال در بین خطوط با زوایای ۳۰ درجه ، استفاده از رابطه تیرها برای به دست آوردن تنشهای نرمال و برشی در مقطع بحرانی ورق‌های اتصال را می‌پذیرد. باید توجه شود که ویتمور تنها یک نمونه را آزمایش کرد که آن نیز از جنس آلومینیوم با مقاومت بالا ساخته شده بود.

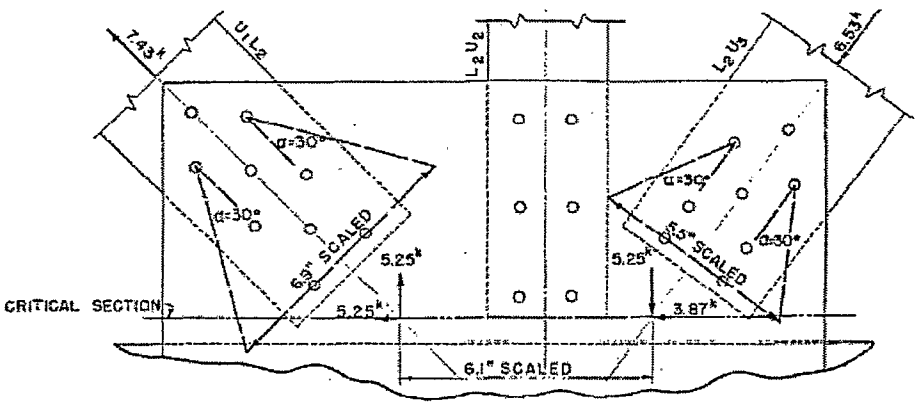
کار او با انجام آزمایش‌های ایروان[2] [ن (۱)] و هاردین[3] [ن (۱)] از دانشگاه کنتاکی بر روی اتصال‌های با ورق جفت دنبال شد. نمونه‌های بکار رفته در این مطالعات نیز مانند آزمایش ویتمور

---

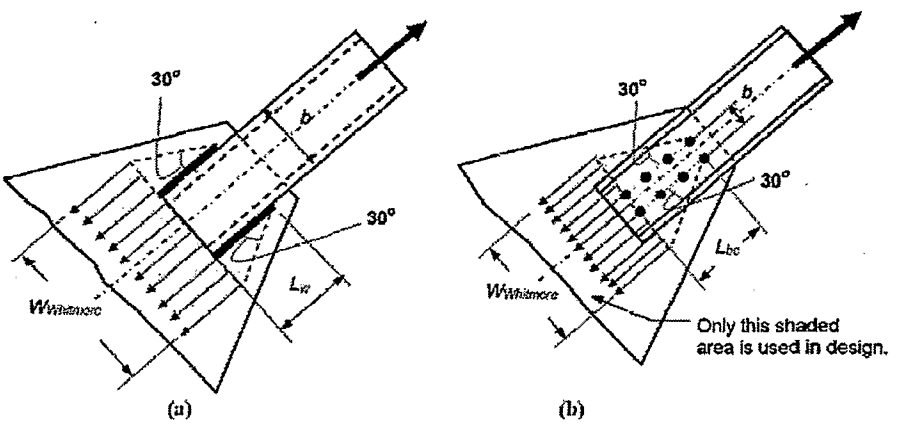
[1] Direct Stress
[2] W. G. Irvan Jr
[3] B. O. Hardin

نماینده اتصالات پل بودند. ورق‌های اتصال آلومینیمی با مقاومت بالا بکار برده شده در این آزمایشات به منظور اندازه‌گیری وضعیت تنش در ورق اتصال با تراکم زیادی به کرنش سنج مجهز شده بودند.

محققان مانند ویتمور به این نتیجه رسیدند که فرمول‌های تیر نمی‌تواند توزیع تنش در صفحات اتصال را دقیقاً به دست دهد. به نظر ایروان *"این فرض که می‌توان همه فرمول‌های تیر را برای محاسبه توزیع تنش اصلی در هر سطح مقطعی (خواه عمودی یا افقی) بکار برد ، بطور قابل ملاحظه ای در اشتباه است."*



شکل ۱-۱ خطوط ۳۰ درجه توزیع تنش در ورق‌های اتصال(ویتمور-۱۹۵۲)



شکل ۱-۲ عرض موثر ویتمور برای ورق اتصال الف) جوش شده، ب) پیچ شده