

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

عنوان

مطالعه تجربی و تحلیلی فرایند اتصال سرد ورق‌های فولادی استحکام بالا

نگارنده

سیداحمد علوی نژاد

استاد راهنما:

سیدهادی قادری

شهریور ۱۳۹۸

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سیداحمد علوی نژاد به شماره دانشجویی ۹۵۱۰۵۰۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان مطالعه تجربی و تحلیلی فرایند اتصال سرد ورق‌های فولادی استحکام بالا که در تاریخ ۹۸/۰۶/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

| |
|--|
| <input type="checkbox"/> مردود <input type="checkbox"/> دفاع مجدد <input type="checkbox"/> قبول (با درجه : _____ امتیاز _____) |
|--|

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

| امضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی | عضو هیأت داوران |
|-------|------------|--------------------------|---------------------------------|
| | استادیار | دکتر سید هادی قادری | ۱- استاد راهنمای اول |
| | - | - | ۲- استادراهنمای دوم |
| | - | - | ۳- استاد مشاور |
| | استادیار | دکتر سید مهدی حسینی فراش | ۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
| | استادیار | دکتر مهدی گردویی | ۵- استاد ممتحن اول |
| | استادیار | دکتر سید وحید حسینی | ۶- استاد ممتحن دوم |

رئیس دانشکده: دکتر محسن شاه‌مردان

سپاس‌گزاری

سپاس خدای بزرگ را که مرا یاری رساند تا بتوانم این مقطع تحصیلی را به پایان رسانده و گامی در راستای اعتلای علم بردارم. از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر سیدهادی قادری که وجودشان همیشه قوتی برای انجام کارهایم بوده‌است و بدون شک انجام این پایان‌نامه بدون کمک و راهنمایی‌های ارزنده ایشان، امکان‌پذیر نبود، کمال تشکر را دارم.

از هیات داوران محترم، اساتید گرامی جناب آقای دکتر مهدی گردویی و جناب آقای دکتر سیدوحید حسینی که شاگردی محضرشان از بزرگترین افتخارات زندگی علمی‌ام می‌باشد، و نیز جناب آقای دکتر سید مهدی حسینی فراش، کمال تشکر را دارم.

همچنین، از خانواده‌ام به دلیل تحمل سختی‌های که از سوی اینجانب به آنها تحمیل شد، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب سیداحمد علوی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مطالعه تجربی و تحلیلی فرایند اتصال سرد ورق‌های فولادی استحکام بالا تحت راهنمایی آقای دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) 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 پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه دغدغه کاهش وزن اتومبیل برای کاهش مصرف سوخت، باعث گرایش بیشتر صنعت خودروسازی به استفاده از ورق‌های فولادی استحکام بالا شده است. اتصال این نوع ورق‌ها، به ورق‌های همگون و ناهمگون فولادی، یکی از چالش‌های کاربردی کردن آنها است. فرایند اتصال سرد ورق فلزی روشی مبتنی بر شکل‌دهی برای همبندی مکانیکی قطعات ورقی است. در پایان‌نامه‌ی حاضر، ابتدا اتصال سرد ورق‌های فولاد گالوانیزه DX51D با ضخامت‌های ۱/۵ mm و ۲ (اتصال DX51D/DX51D) با استفاده از قالب شیاردار به‌عنوان فرآیند جایگزین جوش نقطه‌ای، برای کاربرد خاص در صنعت خودروسازی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس روشی جدید برای اتصال سرد سوراخ‌دار ورق DOCOL به ضخامت ۱ mm به ورق گالوانیزه‌ی DX51D به ضخامت ۱/۵ mm (اتصال DX51D/DOCOL) با قالب ثابت شیب‌دار ارایه شده است. برای اطمینان از یک اتصال با استحکام کافی، ابزار شکل‌دهی باید به صورت بهینه طراحی شود. از این‌رو، پس از شناسایی خواص مکانیکی مواد خام، با روش طراحی آزمایش متعامد (OED) و تحلیل المان محدود پارامترهای مهم طراحی ابزار برای بهینه‌سازی کردن استحکام اتصال سرد F ، بهینه‌سازی شد. تعداد ۹ آزمون برای فرآیند اتصال DX51D/DX51D و ۲۷ آزمون برای فرآیند اتصال DX51D/DOCOL با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب طراحی شد. برای تحلیل آزمایش‌ها از ابزار مطالعات پارامتریک و حل گر صریح نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. فایل ورودی متنی پارامتریک برای تغییر پارامترهای شبیه‌سازی، ایجاد و مورد استفاده قرار گرفت. پس از اجرای رایانه‌ای آزمایش‌های به دست آمده از OED، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مهم تاثیرگذار بر طراحی ابزار برای هر دو روش اتصال سرد به دست آمد. استحکام کششی بیشینه ۲۳۱۹ N و ۳۵۰۹ N به ترتیب برای اتصال سرد DX51D/DX51D و DX51D/DOCOL حاصل شد. ابزارهای مورد نیاز برای اجرای دو اتصال سرد ذکر شده براساس پارامترهای بهینه، طراحی و ساخته شد. آزمایش تجربی دو اتصال سرد با موفقیت انجام شد. سپس، استحکام کششی و هندسه پروفیل نمونه‌های اتصال سرد اندازه‌گیری شد. بررسی و مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی نشان داد که سازگاری قابل قبولی بین آنها وجود دارد. اتصال سرد DX51D/DX51D با قالب ثابت شیاردار، با توجه به الزامات استاندارد خودروسازی، جایگزین مناسبی برای فرآیند جوش نقطه‌ای در کاربرد خاص مورد مطالعه است. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از قالب ثابت شیب‌دار به‌عنوان یک طرحی جدید، برای اتصال DX51D/DOCOL، می‌توان استحکام اتصال را ۱۸٪ نسبت به اتصال سرد با قالب حفره استوانه‌ای شکل، افزایش داد.

واژگان کلیدی: اتصال سرد، طراحی آزمایش متعامد، بهینه‌سازی، تحلیل المان محدود، استحکام اتصال

مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله

- ۱- علوی نژاد. س. ا و قادری. س. ه، طراحی بهینه هندسه ابزار اتصال سرد با قالب ثابت به روش طراحی آزمایش متعامد (OED)، بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین‌المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران (ISME 2019)، انجمن مهندسان مکانیک ایران و گره مینا
- ۲- علوی نژاد. س. ا و قادری. س. ه، مطالعه اثر هندسه ابزار بر استحکام کششی اتصال سرد و بهینه‌سازی ابزار به روش طراحی آزمایش متعامد، ماهنامه علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، ارسال شده و داوری شده توسط تعدادی از داوران.

فهرست عنوان‌ها

- ب.....مطالعه تجربی و تحلیلی فرایند اتصال سرد ورق‌های فولادی استحکام.....
- ج.....فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد.....
- ه.....سیاس‌گزاری.....
- ز.....تعهد نامه.....
- ح.....چکیده.....
- ط.....مقالات مستخرج از پایان نامه /رساله.....
- ی.....فهرست عنوان‌ها.....
- ن.....فهرست شکل‌ها.....
- ص.....فهرست جدول‌ها.....
- ر.....فهرست نشانه‌ها.....
- ۱.....فصل ۱ مقدمه.....
- ۱-۱-۱.....اتصال سرد.....
- ۱-۲-۱.....فرآیند اتصال مکانیکی سرد.....
- ۱-۲-۱-۱.....سازوکار شکل‌دهی اتصال.....
- ۱-۲-۱-۲.....طبقه بندی انواع اتصال.....
- ۱-۲-۳.....پارامترهای موثر بر استحکام اتصال سرد.....
- ۱-۳.....پیشینه تحقیق.....
- ۱-۴.....ساختار پایان‌نامه.....

فصل ۲ شبیه‌سازی المان محدود..... ۱۵

۱-۲-۱ نرم‌افزار آباکوس ۱۶

۲-۲-۲ طراحی هندسه ابزار اتصال سرد ۱۷

۱-۲-۲-۱ طراحی سنبه و قالب ثابت شیاردار ۱۷

۲-۲-۲-۲ طراحی سنبه و قالب ثابت شیب‌دار ۱۸

۳-۲-۳ مدل‌سازی فرآیند اتصال سرد ۲۰

۱-۳-۲-۱ مدل‌سازی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D ۲۰

۲-۳-۲-۲ مدل‌سازی اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M ۲۳

۴-۲-۴ مدل‌سازی سه‌بعدی آزمون استحکام کششی اتصال سرد ۲۶

۱-۴-۲-۱ مدل‌سازی سه‌بعدی آزمون استحکام کششی اتصال DX51D/DX51D ۲۶

۲-۴-۲-۲ مدل‌سازی سه‌بعدی آزمون استحکام کششی اتصال DX51D/DOCOL 1400M ۲۸

۵-۲-۵ تحلیل آزمون کشش ۲۹

۱-۵-۲-۱ مدل‌سازی هندسی نمونه کشش استاندارد ۳۰

۶-۲-۶ طراحی آزمایش ۳۱

۱-۶-۲-۱ تعیین عوامل کنترلی و کم‌اثر اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D ۳۲

۲-۶-۲-۲ طراحی آزمایش متعامد بهینه‌سازی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار ۳۳

۳-۶-۲-۳ طراحی آزمایش متعامد بهینه‌سازی ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های X51D/DOCOL

1400M ۳۴

فصل ۳ روش تجربی..... ۳۷

۱-۳-۱ ورق‌های فولادی ۳۷

۲-۳-۲ آزمون کشش استاندارد ۳۹

- ۳-۳- انجام فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت ۴۰
- ۳-۴- آزمون استحکام کششی اتصال سرد ۴۳
- ۳-۵- آزمون سختی سنجی ۴۷

فصل ۴ نتایج و بحث ۴۹

- ۴-۱- نتایج مطالعه خواص ورق ها ۴۹
- ۴-۲- نتایج طراحی آزمایش متعامد ۵۴
- ۴-۲-۱- نتایج طراحی آزمایش متعامد اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار ۵۴
- ۴-۲-۲- نتایج طراحی آزمایش متعامد اتصال سرد سوراخدار ورق های DX51D/DOCOL 1400M ۵۹
- ۴-۳- مقایسه نتایج شبیه سازی قالب ثابت شیبدار و قالب ثابت با حفره ای استوانه ای شکل ۶۵
- ۴-۴- نتایج تجربی ۶۷
- ۴-۵- نتایج شبیه سازی سه بعدی و مقارن محوری استحکام کششی اتصال سرد ۶۹
- ۴-۵-۱- اتصال DX51D/DX51D ۶۹
- ۴-۵-۲- مقایسه نتایج اتصال DX51D/DOCOL 1400M ۷۰
- ۴-۶- مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی برای طراحی بهینه ۷۱
- ۴-۶-۱- نتایج ریز سختی سنجی و مقایسه با نتایج شبیه سازی ۷۵
- ۴-۶-۲- نتایج بررسی ریز ساختار ۷۶

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۷

- ۵-۱- نتیجه گیری ۷۷
- ۵-۲- پیشنهادها ۷۸

پیوست الف - نقشه های قالب و ابزار برای انجام اتصال سرد ۷۹

پیوست ب - نقشه های قید و بند برای انجام آزمون استحکام اتصال سرد ۹۲

پیوست ج - برگه مشخصات خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی ورق DOCOL 1400M.....۹۸

منبع ها.....۱۰۰

چکیده انگلیسی.....۱۰۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: اصول اصلی فرآیند اتصال سرد ۳
- شکل ۲-۱: دیاگرام انواع مختلف فرآیندهای اتصال سرد ۴
- شکل ۳-۱: پارامترهای هندسی الف) اتصال و ب) ابزار، در فرآیند اتصال سرد ۵
- شکل ۴-۱: پارامترهای فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ۶
- شکل ۵-۱: طرح‌واره‌ی فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ۹
- شکل ۱-۲: هندسه سنبه و قالب ثابت شیاردار ۱۸
- شکل ۲-۲: هندسه سنبه و قالب ثابت شیب‌دار ۱۹
- شکل ۳-۲: تماس خطی ورق‌ها در اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب حفره استوانه‌ای ۲۰
- شکل ۴-۲: اجزای مدل متقارن محوری فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار ۲۱
- شکل ۵-۲: منحنی مطالعات همگرایی شبکه ۲۱
- شکل ۶-۲: هندسه مدل ورق‌های گالوانیزه در اتصال سرد ۲۲
- شکل ۷-۲: مدل‌سازی المان محدود برای تعیین استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D
بعد از گام شکل‌دهی ۲۳
- شکل ۸-۲: اجزای مدل متقارن محوری فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با
قالب ثابت شیب‌دار ۲۴
- شکل ۹-۲: هندسه مدل ورق‌های استحکام بالا و گالوانیزه در اتصال سرد ۲۵
- شکل ۱۰-۲: مدل‌سازی المان محدود برای تعیین استحکام کششی اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های
DX51D/DOCOL 1400M بعد از گام شکل‌دهی اتصال سرد ۲۵
- شکل ۱۱-۲: هندسه و نحوه شبکه‌بندی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D ۲۷
- شکل ۱۲-۲: هندسه و نحوه شبکه‌بندی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M ۲۹
- شکل ۱۳-۲: نمونه آزمون کشش الف) هندسه و ابعاد ب) نحوه شبکه‌بندی ۳۱
- شکل ۱۴-۲: تحلیل حساسیت برای پارامترهای فرآیند اتصال مکانیکی سرد با قالب ثابت [۹] ۳۲

شکل ۲-۱۵: پارامترهای هندسی (الف) ابزار و (ب) اتصال، در فرآیند اتصال سرد ورق‌های

۳۴..... DX51D/DOCOL 1400M

شکل ۳-۱: تصویر ماکروسکوپی نمونه آماده‌شده از اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL

۳۸..... 1400M

شکل ۳-۲: آماده‌سازی نمونه آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8/E8M

شکل ۳-۳: دستگاه آزمون کشش استاندارد، اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک

شکل ۳-۴: آزمون کشش تک محوره روی ورق

شکل ۳-۵: پرس هیدرولیک و ابزار مورد نیاز برای انجام اتصال سرد با قالب ثابت

شکل ۳-۶: ابزار طراحی شده برای انجام فرآیند اتصال سرد

شکل ۳-۷: سنبه و قالب الف) اتصال سرد با قالب ثابت و شیاردار ب) اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب ثابت

۴۲..... شیب‌دار

شکل ۳-۸: اتصال ورق‌ها به هم برای انجام آزمون استحکام کششی اتصال سرد

شکل ۳-۹: دستگاه سایه‌نگار برای اندازه‌گیری پارامترهای مقطع اتصال سرد

شکل ۳-۱۰: قید و بند طراحی شده برای انجام آزمون استحکام کششی اتصال سرد

شکل ۳-۱۱: ساز و کار طراحی شده برای هم‌راستایی نیرو و محور اتصال سرد

شکل ۳-۱۲: آزمون کشش برای اندازه‌گیری استحکام اتصال سرد

شکل ۳-۱۳: دستگاه ریز سختی‌سنج ویکرز باریس

شکل ۳-۱۴: نقاط روی نمونه جهت انجام آزمون ریز سختی‌سنجی

شکل ۳-۱۵: تنظیم خطوط مماسی برای اندازه‌گیری قطرهای اثر ابزار ریز سختی‌سنج

شکل ۴-۱: تصاویر ریزساختار ورق فولادی گالوانیزه DX51D

شکل ۴-۲: تصاویر ریزساختار ورق DOCOL 1400M

شکل ۴-۳: منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش تک محوره برای الف) ورق DX51D و ب) ورق

۵۳..... DOCOL 1400M

- شکل ۴-۴: منحنی تنش حقیقی-کرنش مومسان استخراج شده از تحلیل المان محدود و نتایج حاصل از
 ازمون کشش استاندارد تک محوره در آزمایشگاه الف) ورق DX51D و ب) ورق DOCOL 1400M ... ۵۳
- شکل ۴-۵: مقایسه هندسه اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D حاصل از شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای
 طراحی آزمایش متعامد و شماره آزمون مطابق جدول ۴-۳ ۵۵
- شکل ۴-۶: وابستگی بین استحکام اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و هر پارامتر در سه سطح بر
 اساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب مطابق آزمون‌ها و داده‌های جدول ۴-۳ ۵۷
- شکل ۴-۷: مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف پارامترهای اتصال سرد ورق‌های
 DX51D/DX51D ۵۸
- شکل ۴-۸: نتایج شبیه‌سازی المان محدود استحکام کششی ورق‌های DX51D/DX51D بر اساس
 پارامترهای هندسه بهینه ابزار ۵۸
- شکل ۴-۹: مقایسه هندسه اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار حاصل
 از شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای طراحی آزمایش متعامد و شماره آزمون مطابق جدول ۴-۸ ۶۲
- شکل ۴-۱۰: وابستگی بین استحکام اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، با قالب شیب‌دار و هر
 پارامتر در سه سطح بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب مطابق آزمون‌ها و داده‌های
 جدول ۴-۸ ۶۴
- شکل ۴-۱۱: مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف پارامترهای اتصال سرد ورق‌های
 DX51D/DOCOL ۶۴
- شکل ۴-۱۲: نتایج شبیه‌سازی المان محدود استحکام کششی ورق‌های DX51D/DOCOL ۶۵
- شکل ۴-۱۳: منحنی استحکام کشش اتصال سرد با قالب ثابت حفره شیب‌دار و استوانه‌ای ۶۷
- شکل ۴-۱۴: سازوکار شکست اتصال سرد در شبیه‌سازی استحکام کشش الف) با قالب ثابت حفره استوانه‌ای
 ب) با قالب ثابت حفره شیب‌دار ۶۷
- شکل ۴-۱۵: تغییر شکل ورق‌های اتصال DX51D/DX51D در پایان گام تحلیل استحکام کششی ۶۹
- شکل ۴-۱۶: استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D حاصل از تحلیل المان محدود ۷۰
- شکل ۴-۱۷: هندسه ورق‌های اتصال DX51D/DOCOL 1400M در پایان گام تحلیل استحکام کششی ۷۰

شکل ۴-۱۸: استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M حاصل از تحلیل المان

محدود ۷۱

شکل ۴-۱۹: مقایسه مقطع اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D به دست آمده از شبیه‌سازی با نمونه

تجربی برای هندسه بهینه‌ی ابزار ۷۲

شکل ۴-۲۰: مقایسه مقطع اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار به دست آمده

از شبیه‌سازی با نمونه تجربی برای هندسه بهینه‌ی ابزار ۷۲

شکل ۴-۲۱: نمودار مقایسه استحکام کششی F اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D حاصل از تحلیل

المان محدود متقارن محوری و آزمون تجربی در ناحیه قبل از گلویی شدن ۷۳

شکل ۴-۲۲: نمودار مقایسه استحکام کششی F اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M

با قالب شیب‌دار حاصل از تحلیل المان محدود متقارن محوری و آزمون تجربی در ناحیه قبل از گلویی

شدن ۷۳

شکل ۴-۲۳: سختی نقاط مختلف نشان داده شده در شکل ۳-۱۴ ۷۵

شکل ۴-۲۴: سختی نقاط نمونه تجربی و کرنش معادل مومسان نظیر آن در نمونه شبیه‌سازی ۷۵

شکل ۴-۲۵: تصاویر ریزساختار ناحیه فنجان‌ی پروفیل نمونه اتصال سرد ورق فولادی گالوانیزه DX51D ۷۶

فهرست جدول‌ها

| | |
|---|----|
| جدول ۱-۲: پارامترهای هندسی موثر ابزار و مقادیر سطوح برای طراحی آزمایش متعامد در فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار | ۳۳ |
| جدول ۲-۲: پارامترهای هندسی مستقل موثر ابزار و فرآیند و مقادیر سطوح برای طراحی آزمایش متعامد در فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M | ۳۵ |
| جدول ۱-۴: خواص مکانیکی ورق DX51D و DOCOL 1400M | ۵۰ |
| جدول ۲-۴: ترکیب شیمیایی ورق DX51D و DOCOL 1400M | ۵۰ |
| جدول ۳-۴: طراحی آزمایش متعامد برای تعیین هندسه بهینه ابزار اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و استحکام اتصال به دست آمده از مطالعات پارامتریک آزمایش‌ها | ۵۴ |
| جدول ۴-۴: نتایج تحلیل واریانس داده‌ها برای هر پارامتر در فرآیند اتصال ورق‌های DX51D/DX51D | ۵۵ |
| جدول ۵-۴: نتایج تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب بر اساس میانگین اصلی پارامترهای موثر در اتصال DX51D/DX51D | ۵۶ |
| جدول ۶-۴: نتایج تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب بر اساس سیگنال به نویز پارامترهای موثر در فرآیند اتصال ورق‌های DX51D/DX51D | ۵۷ |
| جدول ۷-۴: مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D بر اساس تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب به روش طراحی آزمایش متعامد | ۵۸ |
| جدول ۸-۴: طراحی آزمایش متعامد برای بهینه‌سازی ابزار و فرآیند اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار و استحکام اتصال به دست آمده از مطالعات پارامتریک آزمایش‌ها | ۶۱ |
| جدول ۹-۴: نتایج تحلیل واریانس داده‌ها برای هر پارامتر در فرآیند اتصال ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M | ۶۲ |
| جدول ۱۰-۴: نتایج تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب برای رده‌بندی پارامترهای موثر در فرآیند اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M استحکام بالا با قالب شیب‌دار | ۶۳ |
| جدول ۱۱-۴: نتایج تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب بر اساس سیگنال به نویز پارامترهای موثر در فرآیند اتصال ورق‌های DX51D/DOCOL | ۶۳ |

جدول ۴-۱۲: مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار بر اساس تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب به روش طراحی آزمایش متعامد ۶۵

جدول ۴-۱۳: پارامترهای هندسی ابزار و فرآیند و مقادیر سطوح اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب حفره استوانه‌ای ۶۶

جدول ۴-۱۴: مقدار بهینه پارامترهای هندسی ابزار و فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب حفره استوانه‌ای ۶۶

جدول ۴-۱۵: مقایسه پارامترهای هندسی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D ۶۸

جدول ۴-۱۶: مقایسه پارامترهای هندسی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار ۶۸

فهرست نشانه‌ها

| | | | |
|------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| α | زاویه تورفتگی با محور اتصال سرد | R_P | شعاع سنبه |
| ν | نسبت پواسون | P_m | عمق حفره‌ی قالب |
| ρ | چگالی | L_m | عرض شیار کف قالب |
| μ | مقدار ثابت اصطکاک بین دو ورق | P_{BA} | زاویه کف سنبه |
| σ_{tru} | تنش حقیقی | R_{PH} | شعاع سوراخ ورق استحکام بالا |
| σ_{nom} | تنش مهندسی | R_{PF} | شعاع گوشه سنبه |
| ϵ_{tru} | کرنش حقیقی | A_{PW} | زاویه دیواره سنبه |
| ϵ_{pl} | کرنش حقیقی مومسان | X | ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال |
| F | استحکام اتصال | E | مدول یانگ |
| F_n | نیروی لازم برای شکست گلوبی | \mathbf{M} | ماتریس جرم قطری |
| F_p | نیروی لازم برای جداسدن اتصال | \mathbf{u} | جابجایی |
| R_{mi} | شعاع کوچک حفره قالب | \mathbf{I} | بردار نیروی داخلی در نمو n ام |
| R_{mo} | شعاع بزرگ حفره قالب | \mathbf{t} | بردار ترکشن |
| k_f | تنش شکست برشی | V | حجم |
| A_n | سطح تصویر شده‌ی ضخامت گلوبی | σ | تنسور تنش کوشی |
| A_p | سطح برش ضخامت تورفتگی | \mathbf{F} | بردار نیروی خارجی در نمو n ام |
| k | تنش تسلیم برشی | $\bar{\sigma}_f$ | تنش شکست |
| | | $\bar{\sigma}_Y$ | تنش متوسط جریان |
| | | A | سطح |

فصل ۱ مقدمه

اتصال سرد^۱ به عنوان یک روش اتصال مکانیکی، برای ورق‌های فلزی به کار می‌رود. ورق‌ها در اتصال سرد، با تغییر شکل مومسان موضعی ناحیه اتصال، به صورت مکانیکی و بدون نیاز به قطعات اضافی (مانند میخ پرچ، پیچ و مهره)، به هم متصل می‌شوند. این فرایند در دمای محیط انجام می‌شود و ابزار معمول شامل سنبه و ماتریس است. قالب با حفره ثابت و یا قالب با حفره اتساع‌پذیر^۲، در این فرایند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنبه، لایه‌های ورق فلزی را به داخل حفره قالب کشیده و یک اتصال دائمی تشکیل می‌شود. ناحیه‌ای فنجان‌شکلی که ورق‌ها در آن ناحیه در هم قفل شده، حاصل فرایند است. اتصال سرد بیشتر در صنایع خودرو، لوازم خانگی و سازه‌های ساختمانی، جایگزین جوش نقطه‌ای می‌شود. اتصال سرد بر خلاف جوش نقطه‌ای نیاز به برق و یا خنک‌کاری الکترودها نداشته و تولید جرقه و دود نمی‌کند. کیفیت استحکام اتصال سرد، با استفاده از یک ابزار ساده از طریق اندازه‌گیری ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال یا قطر فنجان‌ی اتصال به صورت غیرمخرب، صحت‌گذاری می‌شود. طول عمر ابزار اتصال سرد، صدها هزار چرخه است. طول عمر بالای ابزار یکی از دلایل توجیه اقتصادی این فرآیند محسوب می‌شود.

^۱ Clinching

^۲ Extensible Die

در سال‌های اخیر استفاده از فولادهای استحکام بالای پیشرفته^۱ (AHSS)، در صنعت خودروسازی برای کاهش وزن، مورد توجه قرار گرفته است. نیاز به توسعه روش اتصال سرد برای این فولادها در صنعت خودروسازی احساس می‌شود. برای همین در این پایان‌نامه به مطالعه تجربی و تحلیلی فرآیند اتصال سرد ورق‌های فولادی استحکام بالا با نام تجاری DOCOL 1400M پرداخته شد. پارامترهای هندسی ابزار اتصال سرد، برای ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M و ورق‌های DX51D/DX51D مورد استفاده در صنعت خودروسازی، بهینه‌سازی شد.

۱-۱- اتصال سرد

اتصال سرد یک فرآیند شکل‌دهی حجمی، برای هم‌بندی ورق‌های فلزی نازک بدون اجزای اضافی، است. تغییر شکل مومسان در ناحیه درهم‌رفتگی اتصال با استفاده از ابزارهای مخصوصی صورت می‌پذیرد. این فرآیند بیشتر در دمای محیط انجام می‌گیرد، در موارد خاص ورق‌ها را، برای جلوگیری از ایجاد ترک هنگام اجرای فرآیند و بهبود خواص شکل‌پذیری، پیش‌حرارت می‌دهند [۱، ۲].

فرآیند اتصال سرد، نسبت به فرآیندهای اتصال رایج مانند جوش نقطه‌ای، مزایای رقابتی زیر را دارد:

۱. امکان اتصال ورق‌های همگون و ناهمگون.

۲. سهولت خودکارسازی فرآیند

۳. سازگار با محیط زیست

۴. بهبود خواص خستگی

فرآیند اتصال مکانیکی سرد نقاط ضعفی دارد که در ادامه به آنها اشاره شده است:

۱. اجرای فرآیند تغییر شکل مومسان ناحیه اتصال، نیروی نسبتاً بالایی را نیاز دارد.

۲. برای اتصال ورق‌ها از جنس مواد ترد و شکننده کاربرد ندارد [۳-۵].

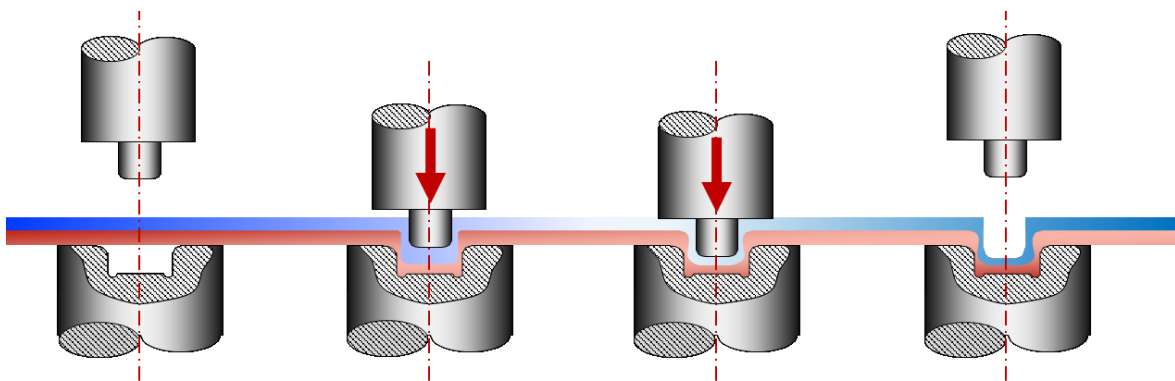
^۱ Advanced high-strength steels

۲-۱- فرآیند اتصال مکانیکی سرد

اتصال سرد از جمله فرایندهای اتصال مکانیکی است که ورقهای اتصال، به کمک سنبه و قالب در داخل یکدیگر نفوذ کرده و اتصال بین ورق بالایی و پایینی را تشکیل می‌دهد. نخستین اختراع مفهوم اتصال مکانیکی سرد در سال ۱۸۹۷ در کشور آلمان به ثبت رسید [۶].

۱-۲-۱- سازوکار شکل‌دهی اتصال

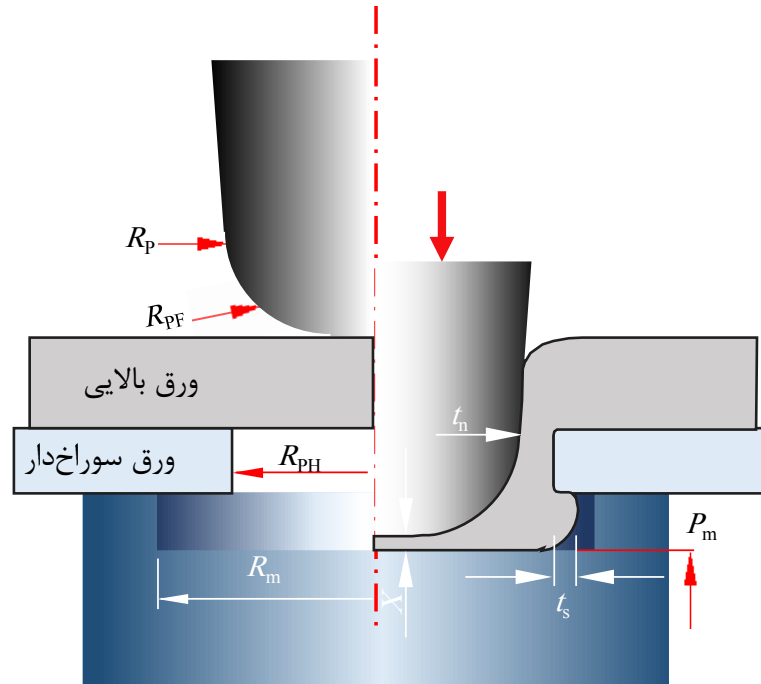
اصول اتصال سرد قطعات فلزی بر اساس تغییر شکل موضعی در ناحیه اتصال می‌باشد. در این روش ابتدا ورق بین سنبه و قالب قرار گرفته و نیروی ورق‌گیر اعمال می‌شود. سنبه به سمت قالب پایین می‌آید. با پیشروی بیشتر سنبه، ورق‌ها به همراه سنبه به داخل قالب کشیده می‌شود. ورق‌ها بین سنبه و ماتریس فشرده شده و مواد به داخل شیار کف قالب جریان می‌یابد و همزمان تورفتگی^۱ شکل می‌گیرد. فنجان‌ی اتصال در این مرحله شکل گرفته و هندسه اتصال سرد تشکیل شده است. فرآیند شکل‌دهی با برگشت سنبه به طرف بالا کامل می‌شود. این روش برای اتصال دو یا چند ورق با ضخامت‌های ناهمگون و جنس‌های متفاوت با زمان انجام اتصال مشابه کاربرد دارد. نیروی لازم برای تغییر شکل اتصال با خواص مواد و ابعاد ابزار مرتبط است. عدم تولید گرمای حاصل از فرآیند در ناحیه اتصال از جنبه‌های تمایز این فرآیند با فرآیندهای اتصال دیگر می‌باشد. شکل ۱-۱ اصول اصلی فرآیند اتصال سرد را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۱-۱: اصول اصلی فرآیند اتصال سرد

^۱ Undercut

معرفی کردند. در مطالعه‌های دیگر، لی و همکارانش [۱۱] شعاع سنبه R_P ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، شعاع حفره قالب R_m ، ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X ، ضخامت گلویی t_n و ضخامت تورفتگی t_s را مطابق شکل ۴-۱ پارامترهای فرآیند اتصال سوراخ‌دار معرفی کردند.



شکل ۴-۱: پارامترهای فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار

استحکام مکانیکی اتصال F ، به میزان زیادی به هندسه‌ی مقطع اتصال تولیدشده، به ویژه ضخامت تورفتگی t_s و گلویی t_n ، وابسته است [۱۲]. آزمونهای کششی مخرب و زمانبر بسیاری برای تعیین F ، با توجه به تعدد پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند، نیاز می‌باشد. تحلیل المان محدود شبیه‌سازی فرآیند، روش دیگری برای پیش‌بینی استحکام کششی اتصال را فراهم آورده‌است [۸] که روشی موثر برای کاهش هزینه و صرف زمان کمتر و همچنین بررسی امکان‌پذیری یک طراحی می‌باشد.

۳-۱- پیشینه تحقیق

فرآیند اتصال مکانیکی سرد، علیرغم پیشرفت سریع در سالهای اخیر، هنوز در ابتدای مسیر توسعه قرار دارد. برای رقابتی‌سازی آن بر اساس استاندارد صنایع و دستیابی به دقت، کیفیت بالا و بهینه‌سازی استحکام، نیاز به تحقیق و مطالعه بیشتری دارد [۵].

در فرآیند اتصال سرد، ورق‌های فلزی به کمک سنبه و قالب، در داخل یکدیگر نفوذ کرده و در اثر ایجاد درهم‌رفتگی موضعی، یک اتصال مکانیکی تشکیل می‌شود [۱۳]. آبه و همکارانش [۱۴] با مطالعه اتصال‌پذیری ورق‌های فولادی گرم پوشش‌شده با استفاده از فرآیند اتصال سرد نشان دادند، ورق‌های گالوانیزه را می‌توان با استفاده از این روش، هم‌بندی کرد. با توجه به ماهیت این اتصال به عنوان محصول یک شکل‌دهی سرد، هندسه قالب و سنبه در ایجاد شکل نهایی اتصال و همچنین کیفیت و استحکام آن نقش اساسی دارد. عواملی مانند درهم‌رفتگی بین دو ورق، ضخامت ورق بالایی و پایینی، کاهش ضخامت ورق‌ها در قسمت کف فنجان‌ی اتصال، بر کیفیت اتصال سرد تاثیر دارد. این عوامل خود، تحت تاثیر پارامترهای هندسه ابزار شامل شکل و ابعاد قالب و سنبه قرار می‌گیرد [۱۵].

بالوندر [۱۵] با مطالعه تجربی اتصال سرد ورق‌هایی از جنس مس و فولاد کششی به ضخامت ۱ mm نشان داد که: بیشترین استحکام اتصال سرد، با استفاده از قالب فنجان‌ی شکل دارای شیار کف در مقایسه با قالب فنجان‌ی بدون شیار، حاصل می‌شود. او با مطالعه تجربی و استفاده از روانکارهای مختلف بین سطوح در تماس ورق‌ها نشان داد، استفاده از روانکار گرافیتی، تاثیر بسیار کمی در افزایش استحکام برشی اتصال داشته، و استفاده از فیلم نازک و یا ضخیم از جنس PTFE حتی باعث کاهش استحکام برشی اتصال سرد نیز می‌شود. موری و همکاران [۱۶] با مطالعه عددی استحکام خستگی و استاتیکی اتصال سرد مکانیکی و خود پرچ^۱ ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم و مقایسه با اتصال جوش نقطه، دریافتند که استحکام خستگی و استاتیکی اتصال خود پرچ بالاتر است. استحکام استاتیکی اتصال مکانیکی سرد در حدود نصف استحکام اتصال نقطه‌جوش بود ولی استحکام خستگی مشابهی داشتند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی به روش المان محدود فرآیند اتصال نشان دادند که تمرکز تنش در لبه اتصال جوش نقطه با توجه به اینکه یک اتصال کامل در ناحیه هم‌بندی ایجاد می‌شود (در اتصال سرد درمقطع باریک نفوذ کرده بین دو ورق ایجاد می‌شود) بیشتر است و استحکام اتصال، به دلیل کارسختی در اتصال مکانیکی سرد و اتصال خود پرچ در حین فرآیند، افزایش می‌یابد. در حالیکه استحکام اتصال جوش نقطه به دلیل پدیده آنیلینگ، کاهش می‌یابد.

لامبیاس [۸] در سال ۲۰۱۳ اتصال سرد ورق‌های فلزی با قالب انعطاف‌پذیر را با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مطالعه کرد. او تاثیر پارامترهای هندسی طراحی ابزار (مانند قطر سنبه، شعاع گوشه

^۱ Self-pierce riveted

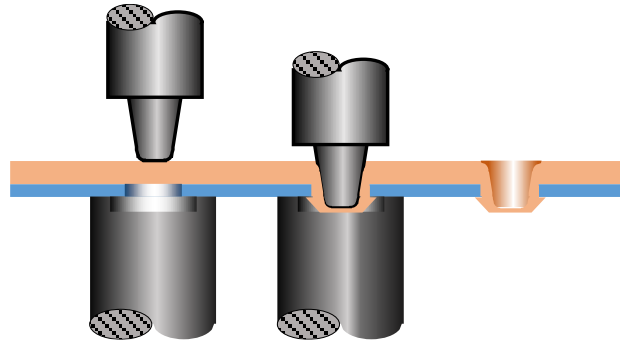
سنبله، عمق حفره قالب، قطر حفره و شعاع گوشه قالب ثابت) را بر هندسه مقطع اتصال سرد، نیروی تغییرشکل مورد نیاز و استحکام اتصال، برای مشخص کردن ویژگی‌های فرآیندی مناسب بررسی، و نشان داد که نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی، به قطر سنبله و ضخامت باقی‌مانده کف فنجان اتصال وابسته است. مقدار تورفتگی وابسته به میزان خم‌شدگی ورق پایین است و کاهش قطر قالب انعطاف‌پذیر، استفاده از ابزار با شعاع گوشه تیزتر، افزایش قطر سنبله و افزایش ارتفاع قالب، باعث افزایش مقدار تورفتگی می‌شود. ضخامت گلوبی‌شدن با قطر سنبله و قالب بزرگ‌تر، شعاع گوشه نرم‌تر و عمق قالب کم‌تر افزایش می‌یابد. هی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۴ با مطالعه تجربی و تحلیلی اتصال سرد ورق‌ها از جنس آلیاژ آلومینیوم، به کمک قالب انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار تجاری LS\DYNA، نشان دادند که نتایج عددی و تجربی در حد قابل‌قبولی بر هم منطبق‌اند و اتصال مکانیکی سرد ترکیبی (استفاده از لایه نازک چسب در ناحیه اتصال) باعث افزایش استحکام اتصال می‌شود.

ژائو و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۴ به کمک مطالعه تجربی اتصال مکانیکی سرد آلیاژهای تیتانیوم نشان دادند، استحکام اتصال با افزایش استحکام جنس ورق‌های متصل‌شونده افزایش می‌یابد. جائو و همکاران [۱۹] در همین سال با مطالعه تجربی اتصال مکانیکی سرد ورق‌های فولادی گالوانیزه‌شده و آلومینیوم، نشان دادند، عملیات پیرسازی آلومینیوم بر اتصال‌پذیری مکانیکی سرد تاثیر اندکی داشته ولی بر پارامترهای اتصال تاثیرگذار است و استحکام اتصال با افزایش استحکام ورق آلومینیوم، افزایش می‌یابد.

اتصال سرد سوراخ‌دار یکی از روش‌های مکانیکی اتصال مواد شکننده با مواد شکل‌پذیر است. در این روش، ورق شکل‌پذیر که باید به عنوان ورق بالایی موقعیت‌دهی شود، به وسیله سنبله با عبور از سوراخ ایجاد شده در ورق پایینی به داخل حفره‌ی قالب کشیده می‌شود. مواد در داخل حفره‌ی قالب، بین قالب و ورق پایینی گسترده شده و تورفتگی ایجاد می‌شود [۱۰]. شکل ۱-۵ طرح‌واره‌ی فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار را نشان می‌دهد. این روش، بدلیل عدم نیاز به اجزای اضافی و الزام خاص فرآیندی مانند پرچ و پیچ و آماده‌سازی سطوح، از ارزانترین روش‌های اتصال محسوب می‌شود [۲۰، ۲۱].

آبه و همکارانش [۲۲] با بررسی اتصال سرد ورق استحکام بالا و ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم A15052 نشان دادند، ورق‌ها با استحکام کششی پایین‌تر از ورق SPFC780 و SPFC980، با روش اتصال سرد سنتی قابل اجرا است. در این صورت باید ورق استحکام بالا به ترتیب در بالا و پایین قرار گیرد و شیار کف قالب حذف شود. عمق حفره‌ی قالب کاهش یافته و پارامترهای عمق و قطر حفره‌ی قالب، برای افزایش میزان تورفتگی،

بهینه‌سازی شود. اتصال سرد به روش معمول برای ورق‌های اتصال که اختلاف زیادی در خواص مکانیکی دارند، به دلیل شکل‌پذیری پایین ورق‌های فولادی استحکام بالا و نیز اختلاف زیاد تنش سیلان بین ورق‌ها، مناسب نیست [۲۲، ۲۳].



شکل ۱-۵: طرح‌واره‌ی فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار

آستن و همکارانش [۲] در سال ۲۰۱۴ با مطالعه تحلیل ترمومکانیکی با استفاده از داده‌های دیپلاتومتري اتصال مکانیکی به منظور کاهش سختی ورق فولادی استحکام بالا نشان دادند، اتصال سرد ورق‌های استحکام بالا از جنس 22MnB5، با روش معمول بدون نقص با توجه به اینکه استحکام بیش از ۸۰۰ MPa دارند، امکان‌پذیر نیست. آنها اتصال این ورق‌ها را به کمک ایجاد حرارت موضعی و کوتاه مدت لیزر انجام دادند. همچنین نتیجه گرفتند، اتصال سرد ورق‌های فلزی به روش معمول برای ورق‌های تا استحکام ۸۰۰ MPa و بیش از ۱۴٪ ازدیاد طول کاربرد دارد. آبه و همکارانش [۱۳] با مطالعه عددی و تجربی اتصال‌پذیری سرد ورق‌هایی از جنس فولاد کم‌کربن و فولاد استحکام بالا با آلیاژ آلومینیوم، نشان دادند، شکل‌پذیری ورق پارامتر مهمی در محدود کردن روش اتصال سرد محسوب می‌شود. پارامترهای هندسی اصلی ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار مانند شعاع R_m و عمق P_m حفره‌ی قالب، شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، شعاع سنبه R_P ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، و زاویه دیواره سنبه APW و پارامترهای هندسی اصلی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار، مانند شعاع R_m و عمق P_m حفره‌ی قالب، عرض شیار کف قالب L_m ، شعاع سنبه R_P ، و زاویه‌ی کف سنبه P_{BA} است. پارامترهای هندسی اتصال شامل تورفتگی t_s ورق بالایی در ورق پایینی، ضخامت گلوبی t_n و نیز ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X می‌باشد [۱۰، ۱۱، ۲۳، ۲۴].

روش تحلیل المان محدود، برای شبیه‌سازی جریان فلز در فرآیند اتصال سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایجی نزدیک مشاهدات آزمون تجربی تولید می‌کند [۲۵]. با طراحی و انجام آزمون‌های رایانه‌ای می‌توان از هزینه و زمان سعی و خطا کاست و به طراحی بهینه‌ی ابزار دست یافت. مطالعه و بررسی نتایج روش‌های

بهینه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از این روش‌ها، سبب افزایش استحکام اتصال از طریق بهینه‌سازی هندسه ابزار شکل‌دهی می‌شود [۵]. هان و همکارانش [۲۶] از طریق یکپارچه‌سازی روش طراحی آزمایش متعامد و شبیه‌سازی رایانه‌ای، بهینه‌سازی پارامترهای ابزار اتصال سرد با قالب تخت را بررسی و نشان دادند، به‌کارگیری این روش هزینه و زمان مدل‌سازی را، به میزان زیادی، کاهش می‌دهد. مایر و همکارانش [۲۷] تاثیر پارامترهای مربوط به سوراخ ورق را بر کیفیت اتصال سرد سوراخ‌دار مطالعه و نشان دادند، شبیه‌سازی عددی، یک ابزار بسیار موثر برای بررسی میزان تاثیر پارامترهای فرآیند است و با این روش می‌توان تاثیر پارامترها را بدون انجام آزمون‌های تجربی زیاد، مطالعه کرد.

باس و همکارانش [۲۸] با مطالعه و تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد ورق استحکام بالا و آلیاژ آلومینیوم به روش اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب مرکب دو مرحله‌ای، نشان دادند، اتصال سرد ورق‌ها تا استحکام کششی 600 MPa با روش معمول و سنتی قابل انجام است و ورق‌ها با استحکام بیشتر از 600 MPa ، با استفاده از روش اتصال سرد سوراخ‌دار، که لازم است در این روش ورق استحکام بالای سوراخ‌دار در تماس با قالب باشد (ورق پایینی)، قابل انجام می‌باشد. آنها نشان دادند، ابزارهای مدل‌سازی باعث درک بهتری از فرآیند اتصال سرد شده و با استفاده از این ابزارها تحلیل ترکیبی از پارامترهای ابزار و فرآیند با تاثیر جنس ورق‌ها، قابل انجام است. لی و همکارانش [۱۱] اتصال سرد سوراخ‌دار ورق استحکام بالا از جنس 22MnB5 و ورق آلومینیوم از جنس Al6061 با استفاده از تحلیل المان محدود، آزمون تجربی و روش ریاضی نشان دادند، این روش با قالب حفره استوانه‌ای، صرف‌نظر از جنس ورق‌ها، سبب بهبود در استحکام اتصال سرد شده و برای اتصال ورق‌ها از جنس ناهمسان قابل استفاده است.

در مطالعه‌ی دیگر از لی و همکارانش [۱۰] با استفاده از تحلیل المان محدود و روش تجربی تاثیر شکل ابزار بر استحکام اتصال سرد سوراخ‌دار ورق از جنس CFRP و ورق فلزی از جنس Al6061 را توسط قالب با حفره استوانه‌ای ساده بررسی، و نتیجه گرفتند که با افزایش قطر سنبه ضخامت گلویی کاهش و ضخامت تورفتگی افزایش می‌یابد. هندسه درهم‌رفتگی، به میزان زیادی، تحت تاثیر شعاع گوشه سنبه است به طوری که گوشه تیز سنبه باعث کاهش ضخامت گلویی می‌شود. گوشه کند سنبه باعث جلوگیری از شکست ضخامت گلویی ولی باعث اتساع سوراخ ورق پایینی می‌شود. همچنین نشان دادند، کاهش عمق حفره‌ی قالب اگر چه از شکست ضخامت گلویی جلوگیری می‌کند ولی سبب برگشت جریان مواد در ورق بالایی شده و موجب برهم زدن جریان مواد برای ایجاد تورفتگی می‌شود و ضخامت تورفتگی را کاهش می‌دهد. موچا [۲۹] با تحلیل المان محدود و

روش تجربی اتصال سرد ورق‌های استحکام بالا H320LA، نتیجه گرفت که هندسه قالب، بیشترین تاثیر را در شکل درهم‌رفتگی دارد. اثر پارامترهای قالب شامل شعاع قالب R_m ، عمق قالب P_m و عرض شیار کف قالب L_m را در فرآیند اتصال سرد مطالعه نموده، نشان داد که عرض شیار کف قالب L_m ، بیشترین تاثیر را در اندازه تورفتگی و نیروی لازم به‌یشینه برای شکل‌دهی اتصال سرد، دارد. راکس و بوچارد [۹]، با مطالعه عددی و تجربی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر در اتصال سرد، با استفاده از الگوریتم EGO^۱ و به کار بردن قالب ثابت، نشان دادند که بهینه‌سازی ۱۳/۵٪ استحکام کششی و ۴۶/۵٪ استحکام برشی اتصال سرد را افزایش می‌دهد. همچنین با تحلیل حساسیت پارامترهای موثر در فرآیند اتصال سرد دریافتند، شعاع سنبه و ارتفاع قالب مهمترین پارامترهای استحکام کششی اتصال می‌باشد. با توجه به تعدد پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند، دستیابی به یک طراحی بهینه ابزار به روش تجربی، نیازمند ساخت ابزارهای متعدد و انجام آزمون‌های زیادی می‌باشد، که این امر موجب صرف هزینه و زمان قابل توجهی است. با تحلیل المان محدود فرآیند شکل‌دهی اتصال و بارگذاری اتصال حاصل، می‌توان جریان فلز حین شکل‌دهی، هندسه‌ی اتصال و استحکام آن را پیش‌بینی کرد [۴].

لامیاس و ایلویو [۳۰] با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، رفتار اتصال سرد را پیش‌بینی کردند. روش شبکه عصبی مصنوعی نیاز به آزمون و خطای نتایج شبیه‌سازی عددی شامل طراحی آزمایش متعامد، داشت. اشتایه و همکارش [۳۱] از روش تاگوچی برای بهینه‌سازی هندسه ابزار اتصال سرد با قالب ثابت استفاده کردند. ون و همکارانش [۳۲] بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار اتصال سرد را، با هدف بهینه‌کردن استحکام کششی اتصال به عنوان متغیر هدف، مطالعه کردند و نشان دادند، روش طراحی آزمایش متعامد یک روش ساده و قابل اعتماد برای بهینه‌سازی ابزار اتصال سرد است. ون و همکارانش [۲۳] با مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی به بررسی تاثیر هندسه ابزار و هندسه سوراخ بر استحکام اتصال سرد سوراخ دار (سوراخ مخروطی ورق) پرداختند. به روش تحلیل سطح پاسخ (RSA) پارامترهای هندسه ابزار و سوراخ را بهینه‌سازی کرده و دریافتند، قطر و زاویه مخروطی سوراخ ایجاد شده در ورق و قطر سنبه، پارامترهای مهم موثر بر استحکام اتصال سوراخ‌دار می‌باشد.

آبه و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۲ با مطالعه تجربی و عددی با هدف بررسی جریان مواد در اتصال ورق‌های استحکام بالا و آلیاژ آلومینیوم که به روش مکانیکی سرد درون قالب انجام شده‌بود، دریافتند، به دلیل اینکه

^۱ Efficient global optimization

ورق‌ها در حین فرآیند اتصال مکانیکی سرد، دچار تغییر شکل مومسان شدید می‌شوند، در صورت شکل پذیری پایین، تمایل به شکست دارند. به گونه‌ای که اگر ورق رویی استحکام بالا داشته باشد، شکست ناشی از تمرکز تغییر شکل اطراف گوشه سنبه رخ می‌دهد. اگر ورق زیرین استحکام زیادی داشته باشد، تنش‌های بالای کششی حاصل از جریان مواد به داخل شیار کف قالب، باعث ایجاد ترک می‌شود که برای جلوگیری از آن باید جریان فلز، توسط بهینه‌سازی هندسه قالب، کنترل شود. اگر ورق رویی، فولادی استحکام بالا باشد، عمق قالب کاهش یافته تا از تمرکز تغییر شکل در اطراف گوشه سنبه جلوگیری شود. و اگر ورق استحکام بالا در قسمت پایین اتصال قرار گیرد، شیار کف قالب، برای کاهش تنش کششی ناشی از جریان مواد در داخل شیار، حذف می‌شود. هبلن و همکارانش [۱] در سال ۲۰۱۴ اتصال مکانیکی به کمک اولتراسونیک ورق‌هایی از جنس فولاد استحکام بالا و آلیاژ آلومینیوم را مورد مطالعه ترمومکانیکی قرار داده و نشان دادند، بکارگیری اولتراسونیک در فرآیند اتصال مکانیکی باعث کاهش نیروی لازم برای شکل‌پذیری و بهبود آن می‌شود.

آبه و همکارانش [۳۳] در سال ۲۰۱۴، استحکام اتصال مکانیکی سرد ورق‌های با استحکام خیلی بالا و شکل‌پذیری متفاوت را مطالعه و دریافتند که افزایش استحکام ورق باعث کاهش جریان فلز شده و ضخامت تورفتگی را کاهش می‌دهد. آنها نشان دادند، ورق با استحکام خیلی بالا که شکل‌پذیری بالا دارد، قابلیت اتصال داشته و در صورتیکه شکل‌پذیری پایین داشته باشد قابلیت اتصال ندارد. آنها با مقایسه اتصال سرد با جوش نقطه‌ای، نشان دادند، گرچه استحکام استاتیکی اتصالات سرد این نوع ورق‌ها کمتر از جوش نقطه‌ای است ولی استحکام خستگی بالاتری نسبت به آنها دارد. کاسکک و همکارانش [۳۴] در سال ۲۰۱۵ به روش تجربی، آزمون کشش و ریزسختی، تاثیر موقعیت ورق‌های فلزی را (به لحاظ اینکه ورق با استحکام بالاتر در تماس با سنبه است یا قالب) بر خواص اتصال سرد مطالعه و نشان دادند که بیشترین استحکام اتصال و نیز بیشترین سختی در ناحیه تورفتگی اتصال مکانیکی سرد زمانی اتفاق می‌افتد که ورق فلزی با استحکام بیشتر، در تماس با سنبه قرار بگیرد (ورق بالایی). استحکام مکانیکی اتصال F ، به میزان زیادی به هندسه‌ی مقطع اتصال تولیدشده، به ویژه ضخامت تورفتگی t_s و گلوپی t_n وابسته است. استحکام اتصال سرد در بارگذاری کششی و برشی قابل اندازه‌گیری است. معمولاً استحکام کششی اتصال کمتر از استحکام برشی است [۱۲]. بنابراین آزمون تجربی جدایش در کشش، یک روش مستقیم برای اندازه‌گیری استحکام اتصال در نظر گرفته می‌شود. هزینه پایین اجرای اتصال سرد مکانیکی و استحکام خستگی یکسان، در مقایسه با جوش نقطه‌ای، باعث کاربرد بیشتر آن در اتصال قطعات بدنه خودرو شده است [۱۶]. در تحقیق حاضر، فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت برای

ورق‌های DX51D/DX51D که در این کاربرد ویژه مورد نظر، طبق استاندارد پذیرش خودروساز حداقل استحکام کششی در راستای محور اتصال برابر 1000 N می‌باشد و فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های فولادی DX51D/DOCOL 1400M و ضخامت ناهمسان، مورد استفاده در صنعت خودروسازی با قالب ثابت شیب‌دار و روش المان محدود، مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای طراحی هندسی ابزار با استفاده از روش طراحی آزمایش متعامد و ابزار مطالعات پارامتریک نرم‌افزار آباکوس، برای رسیدن به بیشترین استحکام مکانیکی اتصال F ، بهینه‌سازی شد. بر اساس طراحی بهینه به دست آمده، ابزار برای هر دو روش اتصال سرد ساخته شد و نمونه‌های اتصال تولید و نتایج عددی و تجربی با هم مقایسه شد.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

ورق‌های با نسبت وزن به استحکام کمتر، مانند ورق‌های استحکام بالا و آلیاژهای آلومینیوم، کاربرد فزاینده‌ای در صنعت خودروسازی دارد. این ورق‌ها با فرآیند جوش نقطه، که بطور معمول برای اتصال ورق‌ها در بدنه و دیگر قسمت‌های خودرو کاربرد دارد بدلیل نقطه ذوب و قابلیت هدایت گرمایی متفاوت، قابل اتصال نبوده و روش اتصال جایگزینی نیاز می‌باشد. با توجه به رشد روزافزون صنعت خودرو و تلاش برای ساخت قطعات بهینه با استحکام بالاتر و وزن کمتر، نیاز به تحقیق و پژوهش در زمینه روش‌های اتصال چنین قطعاتی در این صنایع، امری ضروری است.

فرآیند اتصال سرد به عنوان یک فرآیند موثر در اتصال ورق‌های استحکام بالا، مدت زیادی است که در داخل و خارج کشور مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های اتصال مورد استفاده در حال حاضر، نتیجه تحقیقات و آزمایش‌های فراوان می‌باشد، با این وجود به دلیل پیچیدگی آن و وجود پارامترهای تاثیرگذار متعدد، تلاش و تحقیقات و ارائه روش‌های جدید برای بهبود و بهینه‌سازی فرآیند همچنان ادامه دارد. در این مطالعه اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، بوسیله‌ی قالب ثابت شیب‌دار به عنوان روشی جدید، مورد بررسی قرار گرفته و ابزار بر اساس پارامترهای بهینه‌شده حاصل از نتیجه طراحی آزمایش متعامد و مطالعات پارامتریک نرم‌افزار آباکوس، طراحی و ساخته شد.

اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M در پنج فصل مطالعه شد. در فصل اول مقدمه‌ای راجع به فرآیند، ویژگی‌ها و پارامترهای موثر در آن آورده شده است. همچنین اشاره‌ای به پژوهش‌های پیشین در این زمینه و اهداف این پایان‌نامه شده است. فصل دوم به مطالعات

پارامتریک المان محدود فرآیند اتصال سرد و طراحی آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی و طراحی ابزار اختصاص دارد. در فصل سوم به روش تجربی انجام فرآیند اتصال سرد، آزمون کشش استاندارد و آزمون استحکام کششی اتصال سرد پرداخته شده است. در فصل چهارم، نتایج طراحی آزمایش متعامد و آزمون تجربی و مقایسه آنها ارائه شده است. فصل پنجم، به نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار اختصاص دارد.

فصل ۲ شبیه‌سازی المان محدود

همزمان با پیشرفت فناوری طراحی و تولید وسایل، قطعات پیچیده و حساس، لزوم استفاده از روش‌های علمی مناسب برای کاهش هزینه، زمان و همچنین پاسخگویی به مشکل و نیازهای صنایع در این زمینه مطرح است. روش المان محدود می‌تواند به عنوان یک روش عددی برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالت‌های مختلف پایدار، گذرا، خطی یا غیرخطی بکار گرفته شود. حل مسائلی که توسط روش معمول تحلیلی غیرممکن می‌نمود، قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی، توانمندی روش در ارائه نتایج قابل اطمینان، کاهش هزینه‌های سنگین آزمون‌های علمی در فرآیندهای طراحی، سرعت بالا در حل مسائل و بالاخره افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی در طراحی، موجب شد که این روش به عنوان بخش جداناپذیر پیشرفت صنعتی درآید [۳۵]. از پرکاربردترین این نرم‌افزارها می‌توان به آباکوس، انسیس، ال‌اس‌داین، و ... اشاره کرد. نرم‌افزار آباکوس با توجه به قابلیت‌های خاص آن و قدرت حل مسائل با درجه غیرخطی بالا و با توجه به الگوریتم‌های عددی بکاررفته در آن، برای شبیه‌سازی، انتخاب شد.

با بیان مقدمه فوق، در این فصل ابتدا نرم‌افزار آباکوس معرفی و نحوه مدل‌سازی فرآیند اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با ضخامت‌های غیرهمسان، مطالعه شد. آزمون تعیین استحکام کششی اتصال، و آزمون کشش استاندارد برای ورق‌ها، با این نرم‌افزار مدل‌سازی شد. در پایان به بررسی و تعیین عوامل کنترلی و کم‌اثر فرآیند و رویکرد طراحی آزمایش متعامد و تعیین سطوح و پارامترهای موثر در طراحی ابزار برای هر دو روش اتصال سرد پرداخته خواهد شد.

۲-۱- نرم‌افزار آباکوس

این نرم‌افزار اولین بار در سال ۱۹۷۸، در صنعت هسته‌ای استفاده شد. قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس نسبت به سایر نرم‌افزارهای المان محدود مشابه، در داشتن رویه‌های حل صریح^۱ و ضمنی^۲، دارا بودن مدل‌های رفتاری پیشرفته و متنوع برای مواد مختلف (فلزات، لاستیک، بتن، خاک، سنگ، سیالات و ...) امکان ایجاد سریع مدل‌های با هندسه پیچیده و... می‌باشد. در چند سال گذشته این نرم‌افزار توجه بسیاری از محققین و صنعتگران را به خود جلب کرده‌است. نرم‌افزار آباکوس در رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی عمران و مهندسی مواد کاربردهای زیادی دارد [۳۶].

بسته نرم‌افزاری آباکوس دارای سه محصول اصلی می‌باشد که عبارتند از:

۱. آباکوس استاندارد: که با استفاده از آن می‌توان گستره وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و... را تحلیل کرد. روش حل مسائل در این قسمت به صورت ضمنی می‌باشد.
۲. آباکوس صریح: این محصول برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد^۳، انفجار، مچالگی^۴ و همچنین مسائل شبه‌استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند مانند شکل‌دهی مناسب‌تر است. روش حل مسائل در این محصول به صورت صریح می‌باشد.
۳. آباکوس CAE^۵: این قسمت به عنوان یک رابط گرافیکی برای کاربر تعریف شده‌است که به کمک آن می‌تواند یک مدل هندسی را سریع و بدون نیاز به نوشتن دستورها ایجاد کند و یا از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر وارد کند [۳۶].

^۱ Explicit

^۲ Implicit

^۳ Impact

^۴ Crushing

^۵ Complete Abaqus Environment

۲-۲- طراحی هندسه ابزار اتصال سرد

برای اینکه بیشترین استحکام برشی اتصال سرد با طراحی هندسه ابزار با مقطع گرد حاصل می‌شود [۳۷]، سنبه و قالب ابزار سرد به صورت متقارن محوری (گرد) طراحی شد. در طراحی هندسه سنبه و قالب، ابعاد به گونه‌ای در نظر گرفته شد، که با کمترین هزینه و زمان، تغییر کاربری ابزار اتصال سرد امکان‌پذیر باشد.

۲-۲-۱- طراحی سنبه و قالب ثابت شیاردار

سنبه و قالب ثابت شیاردار برای اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D طراحی شد. پارامترهای مهم شعاع سنبه R_P ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، عرض شیار کف قالب L_m و زاویه کف سنبه P_{BA} ، بیش از ۹۰٪ بر استحکام کششی اتصال تاثیرگذار است [۹] بنابراین در طراحی مطابق شکل ۱-۲ لحاظ شد. این پارامترها باید بهینه‌سازی شود.

شعاع گوشه سنبه R_{PF} و گوشه قالب R_F ، در بیشینه نیروی شکل‌دهی و در هم‌رفتگی اتصال سرد موثر است. افزایش نسبت شعاع گوشه سنبه باعث افزایش نیروی شکل‌دهی می‌شود. در حالی که افزایش نسبت شعاع گوشه قالب باعث کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود. همچنین افزایش شعاع گوشه سنبه باعث کاهش ضخامت تورفتگی (t_s) و افزایش ضخامت گلویی (t_n) می‌شود [۲۹]. مقدار این پارامترها 0.35 mm در نظر گرفته شد. برای سهولت در جدایش فنجان‌ی اتصال از روی سنبه و داخل قالب لازم است زاویه دیواره سنبه APW و زاویه دیواره حفره قالب Amw در طراحی ابزار منظور شود. پارامتر $APW = 1^\circ$ و $Amw = 3^\circ$ در نظر گرفته شد.

کاهش عمق و زاویه لبه شیار کف قالب (به سمت تخت‌شدن میل کند) باعث کاهش اتصال‌پذیری ورق‌ها می‌شود [۳۸]. شیار کف قالب برای سهولت در ساخت و جریان مواد به شکل نیم‌دایره طراحی شد و لبه تیز برخورد شیار با برجستگی کف قالب با ایجاد $R_F = 0.35 \text{ mm}$ برطرف شد.

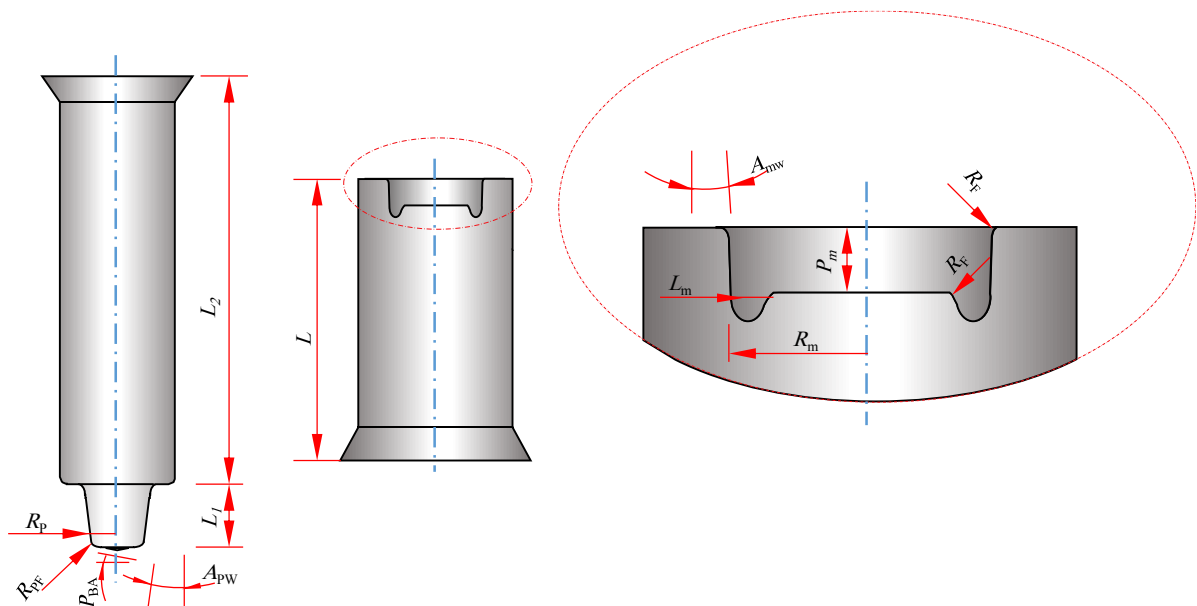
شعاع قالب وابسته به شعاع سنبه است. نسبت وابستگی توسط لامبیاس [۸] به صورت میزان لقی بین سنبه و قالب به ضخامت ورق (C/t) تعیین شد. افزایش این نسبت باعث افزایش ضخامت گلویی و کاهش ضخامت تورفتگی می‌شود و کاهش آن افزایش ضخامت تورفتگی و کاهش ضخامت گلویی را همراه دارد. برای طراحی شعاع قالب چون ضخامت ورق‌ها ناهمسان بود این نسبت بر اساس میزان لقی بین سنبه و قالب نسبت به میانگین مجموع ضخامت‌های ورق اولیه (C/t_{Avg}) محاسبه شد. که به صورت آزمون و خطا 0.9 بدست آمد.

مقدار پارامترهای R_F , A_{mw} , A_{PW} , R_F , R_{PF} که تاثیر کمی بر استحکام اتصال دارد، با آزمون و خطا تعیین شد. مقدار $L_1 = 5 \text{ mm}$ بر اساس رابطه (۱-۲) طراحی شد.

$$L_1 \geq t_u + t_l + P_m - X \quad (1-2)$$

در رابطه فوق t_u ضخامت ورق بالایی و t_l ضخامت ورق پایینی است.

مقدار $L_2 = 66 \text{ mm}$ طوری در نظر گرفته شد که فنرها آزادی عمل لازم را داشته باشد. و طول قالب $L = 34 \text{ mm}$ طوری طراحی شد که قطعه بدون هیچگونه برخوردی با ابزار، موقعیت‌دهی شود.



شکل ۱-۲: هندسه سنبه و قالب ثابت شیاردار

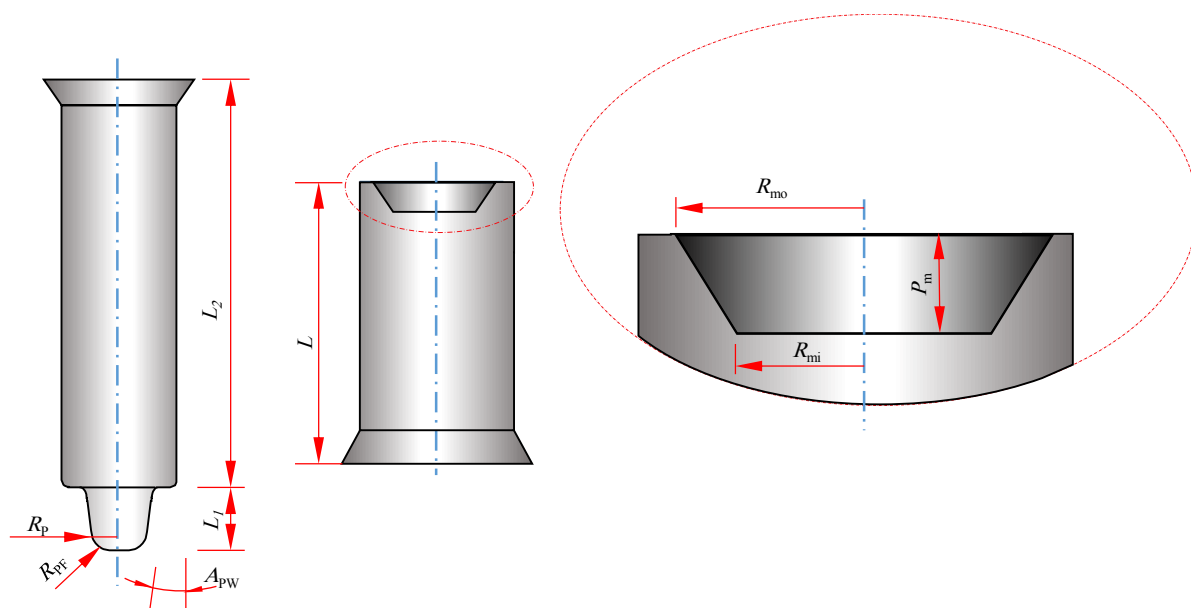
۲-۲-۲- طراحی سنبه و قالب ثابت شیاردار

سنبه و قالب ثابت شیاردار مطابق شکل ۲-۲ برای اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M طراحی شد. پارامترهای ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار با حفره استوانه‌ای قالب شامل: شعاع سنبه R_P ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، شعاع حفره استوانه‌ای قالب R_m و ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X می‌باشد [۱۱]. در اتصال سرد سوراخ‌دار با حفره استوانه‌ای قالب، افزایش قطر سنبه، ضخامت گلویی را کاهش و ضخامت تورفتگی را افزایش می‌دهد. هندسه درهم‌رفتگی به میزان زیادی تحت تاثیر شعاع گوشه سنبه است به نحوی که گوشه تیز سنبه باعث کاهش ضخامت گلویی شده و گوشه کند سنبه باعث جلوگیری از شکست ضخامت گلویی ولی باعث اتساع سوراخ ورق پایینی می‌شود.

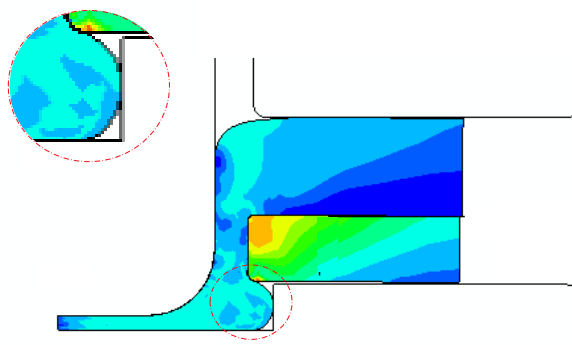
کاهش عمق قالب از شکست ضخامت گلویی جلوگیری می‌کند ولی سبب برگشت جریان مواد در ورق بالایی شده که موجب برهم زدن جریان مواد برای ایجاد تورفتگی می‌شود و ضخامت آن را کاهش می‌دهد [۱۰]. اتصال ورق استحکام بالا با شکل‌پذیری مناسب، با ابزار اتصال سرد معمول قابل انجام است. در این روش لازم است شیار کف قالب حذف شود و ورق استحکام بالا در تماس با قالب قرار گیرد [۳۹].

شعاع سنبه R_p ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، زاویه دیواره سنبه A_{PW} ، پارامترهای مهم ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب ثابت شیب‌دار است که در استحکام اتصال موثر است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، لازم بود همه این پارامترهای ابزار، بهینه‌سازی شود. ضخامت باقیمانده کف فنجان‌ی اتصال برای اینکه فقط ورق رویی در داخل قالب کوبش می‌شود، کمتر از روش اتصال سرد با قالب شیاردار است. بنابراین در طراحی سنبه، زاویه کف سنبه برای جلوگیری از پارگی ورق و استحکام بیشتر اتصال، حذف شد.

بررسی پژوهش‌های قبلی نشان داد که با حفره استوانه‌ای شکل قالب، جریان مواد قابل کنترل نیست و گوشه‌های منحنی شکل در قسمت بیرونی فنجان‌ی اتصال، ایجاد می‌شود. مطابق شکل ۲-۳ تماس در ناحیه اتصال ورق‌ها، که در مقابل نیروی کششی در راستای محور آن مقاومت می‌کند، خطی است. با اعمال نیروی کشش در راستای محور اتصال، حالت منحنی استقامت لازم را نداشته و دچار خمش می‌شود و از هم‌دررفتگی اتصال اتفاق می‌افتد. برای همین پیش‌بینی می‌شد که استحکام اتصال کاهش یابد. برای رفع مشکل و کنترل جریان مواد، به شکلی که تماس از حال خطی به تماس دو سطح تبدیل شود و سازوکار تخریب، با هدف استحکام بیشتر اتصال، از حالت درهم‌رفتگی به حالت برش گلویی، تغییر وضعیت دهد حفره قالب شیب‌دار طراحی شد.



شکل ۲-۲: هندسه سنبه و قالب ثابت شیب‌دار



شکل ۲-۳: تماس خطی ورق‌ها در اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب حفره استوانه‌ای

در اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، سوراخ ایجاد شده، برای جلوگیری از شکست ورق بالایی، باید در راستای ابزار و با آن هم‌مرکز باشد [۱۱]. برای هم‌راستایی و هم‌مرکزی سوراخ با ابزار قطر کوچک حفره طراحی شده برابر سوراخ ورق استحکام‌بالا طراحی شد ($R_{mi} = R_{PH}$). تحلیل‌های اولیه به طریق آزمون و خطا نشان داد، بیشینه ضخامت تورفتگی از 0.5 mm تجاوز نمی‌کند برای همین قطر بزرگ، 0.5 mm بزرگتر از قطر کوچک طراحی شد ($R_{mo} = R_{PH} + 0.5 \text{ mm}$).

مقدار $L_1 = 4 \text{ mm}$ بر اساس رابطه (۱-۲) طراحی شد. مقدار $L_2 = 66 \text{ mm}$ طوری در نظر گرفته شد که فنرها آزادی عمل لازم را داشته باشد. و طول قالب $L = 34 \text{ mm}$ برابر با طول قالب اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D، برای تغییر کاربری آسان‌تر، طراحی شد.

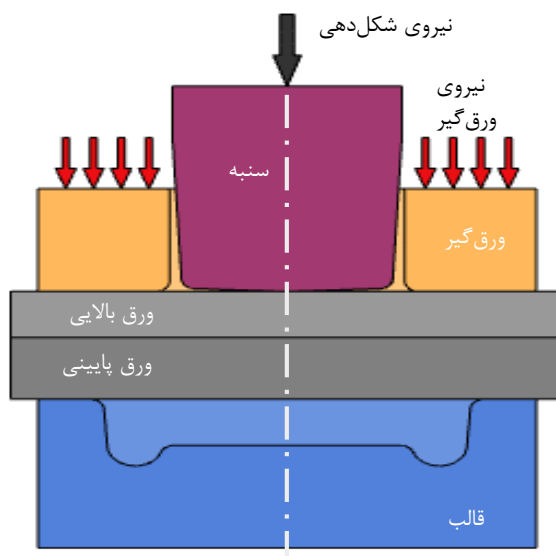
۲-۳- مدل‌سازی فرآیند اتصال سرد

فرآیند اتصال سرد ورق‌های فولادی DX51D/DX51D و فرآیند اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، با ضخامت‌های ناهمسان، متفاوت است. برای همین هر فرآیند اتصال جداگانه مدل‌سازی شد.

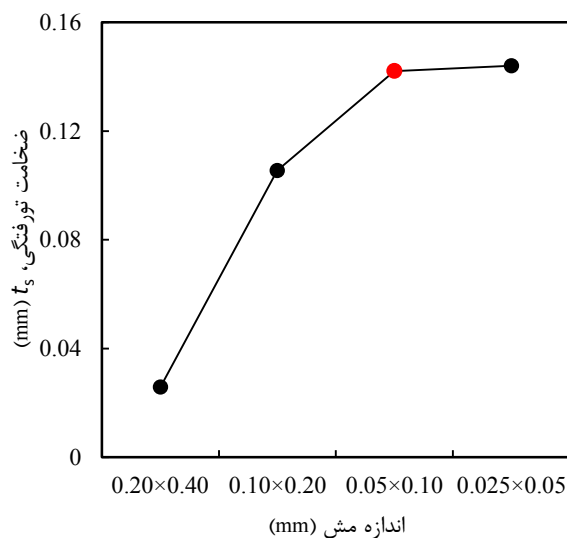
۲-۳-۱- مدل‌سازی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D

اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D با ضخامت ناهمسان با قالب ثابت شیاردار انجام گرفت. ابزار مطالعات پارامتریک نرم افزار آباکوس (نسخه ۶،۱۴) و حل‌گر دینامیک/ صریح آن برای تحلیل فرآیند ایجاد اتصال و آزمون جدایش، استفاده شده‌است. اجزای مدل، متقارن محوری مطابق شکل ۲-۴، شامل سنبه، ورق‌گیر، قالب شیاردار، ورق بالایی و ورق پایینی فولادی گالوانیزه می‌باشد. ورق‌ها به صورت جسم تغییر شکل‌پذیر و سایر

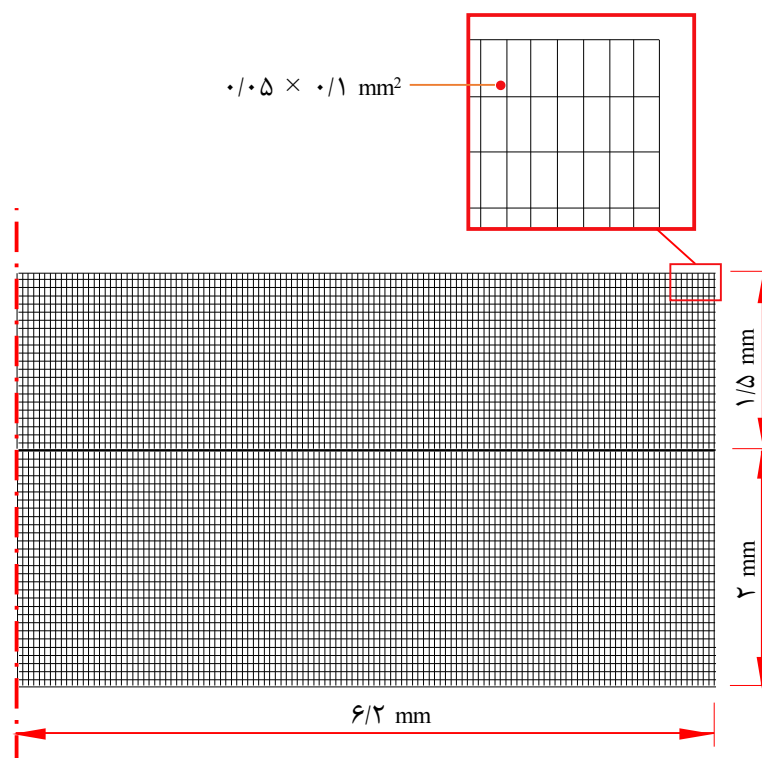
اجزا از نوع صلب تحلیلی در نظر گرفته شد. گسسته‌سازی ورق‌ها با استفاده از المان‌های پیوسته متقارن محوری خطی CAX4R انجام شد. مطابق شکل ۲-۵ مطالعات همگرایی شبکه انجام و ابعاد المان‌ها $0.1 \times 0.5 \times 0.5$ mm² تعیین شد (شکل ۲-۶). خواص مکانیکی ورق‌های فولادی گالوانیزه مورد استفاده، مطابق جدول ۴-۱ تعیین شد. برای معرفی پارامترهای مربوط به خواص مواد، مانند مدول یانگ و ضریب پواسون به نرم‌افزار آباکوس، از اطلاعات این جدول استفاده شد. نمودار تنش حقیقی-کرنش مومسان، که از نتایج آزمون کشش تک محوره در آزمایشگاه به دست آمد، در شکل ۴-۴ آورده شده‌است. از اطلاعات عددی این نمودار برای معرفی رفتار ورق‌های گالوانیزه در ناحیه مومسان استفاده شد.



شکل ۲-۴: اجزای مدل متقارن محوری فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار



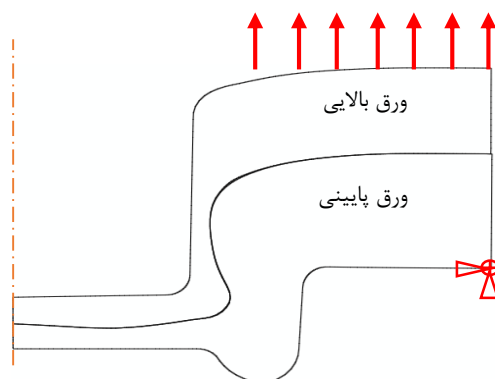
شکل ۲-۵: منحنی مطالعات همگرایی شبکه



شکل ۲-۶: هندسه مدل ورق‌های گالوانیزه در اتصال سرد

فرآیند اتصال سرد شامل تغییر شکل‌های بزرگی است که به همراه مقادیر بالای کرنش‌های مومسان در ناحیه کوچکی از ورق بالایی و پایینی، باعث ایجاد تغییر شکل خیلی زیاد المان‌ها در آن ناحیه می‌شود. برای جلوگیری از این پدیده، از تکنیک شبکه‌بندی تطبیقی لاگرانژی-اویلری اختیاری^۱ (ALE) استفاده شد. اصطکاک کلمبی برای مدل‌سازی برهم‌کنش تماسی اجزا در نظر گرفته شد [۲۶]. ضریب اصطکاک بین ورق‌ها با سطوح ابزار ۰/۱ و بین دو ورق ۰/۲۵ در نظر گرفته شد [۴۰]. فرآیند شکل‌دهی اتصال سرد شامل دو گام اعمال نیروی ورق‌گیر و جابجایی سنبه به سمت قالب به میزان مشخص می‌باشد. برای تعیین استحکام کششی اتصال، در گام سوم با ثابت کردن ورق‌ها، توسط تعریف قیدهای موجود در نرم‌افزار، تماس ابزار حذف شد. سپس، در گام چهارم مطابق شکل ۲-۷، با مقید کردن لبه‌ی ورق پایینی، ورق بالایی در جهت محوری، به سمت بالا حرکت می‌کند. بیشینه نیروی لازم برای جدا کردن ورق‌ها از هم، به عنوان استحکام اتصال F در نظر گرفته می‌شود.

^۱ Arbitrary Lagrangian-Eulerian

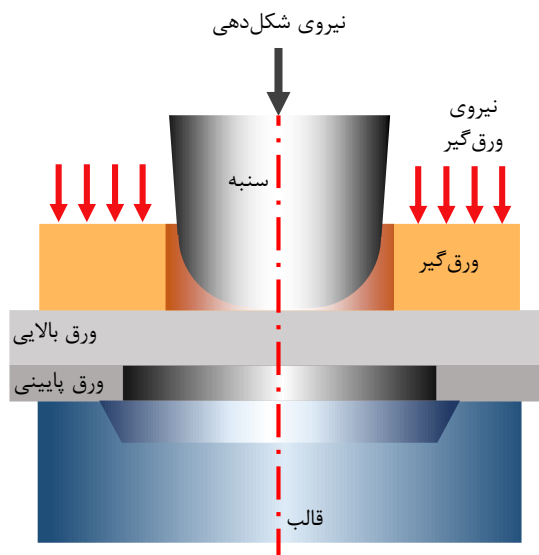


شکل ۲-۷: مدل‌سازی المان محدود برای تعیین استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D بعد از گام شکل‌دهی

۲-۳-۲- مدل‌سازی اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M

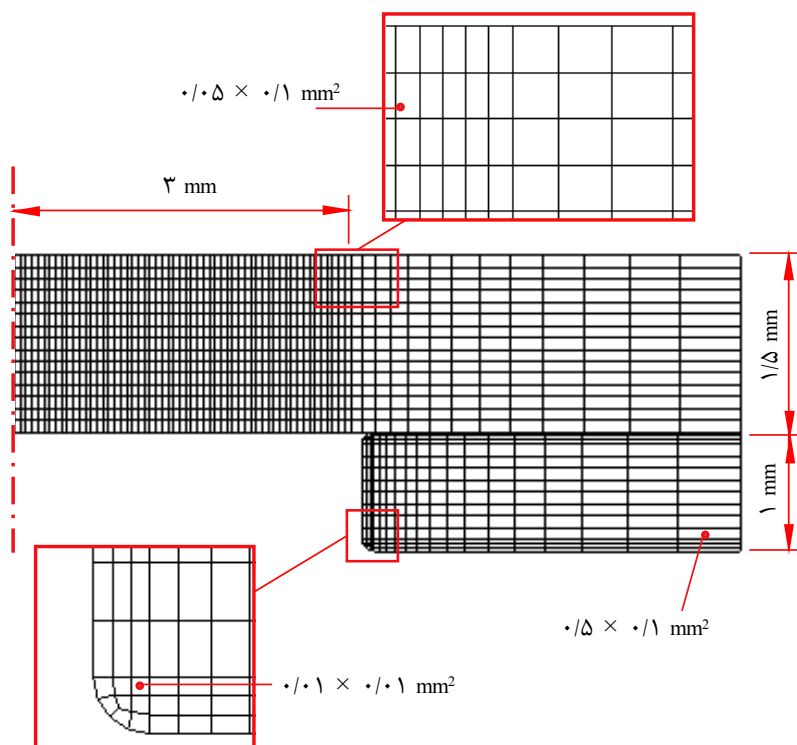
اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با ضخامت ناهمسان با قالب ثابت شیب‌دار انجام گرفت. در این روش سوراخی بر روی ورق فولادی استحکام بالا در مرکز محل اتصال وجود دارد. از ابزار مطالعات پارامتریک نرم افزار آباکوس (نسخه ۶,۱۴) و حل گر دینامیک/ صریح آن برای تحلیل فرایند ایجاد اتصال و آزمون جدایش آن استفاده شده است. اجزای مدل، متقارن محوری مطابق شکل ۲-۸، شامل سنبه، ورق گیر، قالب، ورق بالایی و ورق پایینی استحکام بالا و سوراخ‌دار، می‌باشد. ورق‌ها به صورت جسم تغییر شکل پذیر و سایر اجزا از نوع صلب تحلیلی در نظر گرفته شد. گسسته‌سازی ورق‌ها با استفاده از المان‌های پیوسته متقارن محوری خطی CAX4R انجام شد. مطابق شکل ۲-۵ مطالعات همگرایی شبکه انجام شد. ابعاد المان‌ها مطابق شکل ۲-۹ برای ورق بالایی و قسمتی از آن که تغییر شکل زیادی دارد، $0.1 \times 0.05 \text{ mm}^2$ و برای قسمت باقی‌مانده ورق از ابعاد متغیر در جهت طول $0.1 \times 0.05 - 0.2 \text{ mm}^2$ (با استفاده از تکنیک قسمت‌بندی مدل قطعه و دانه‌بندی مش با تمایل ساده^۱) و برای ورق پایینی در قسمت شعاع لبه دو طرف سوراخ، از ابعاد $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ و سایر قسمت‌های ورق از ابعاد متغیر در جهت طول $0.1 \times 0.05 - 0.05 \text{ mm}^2$ استفاده شد. خواص مکانیکی ورق‌های مورد استفاده مطابق جدول ۴-۱ تعیین شد. نمودار تنش حقیقی- کرنش مومسان، برای ورق‌های مورد استفاده، که از نتایج آزمون کشش تک محوره در آزمایشگاه به دست آمد، در شکل ۴-۴ آورده شده است. این نتایج با مدل‌سازی آزمون کشش به کمک حل گر ضمنی آباکوس صحه‌گذاری شد.

^۱ Single Bias

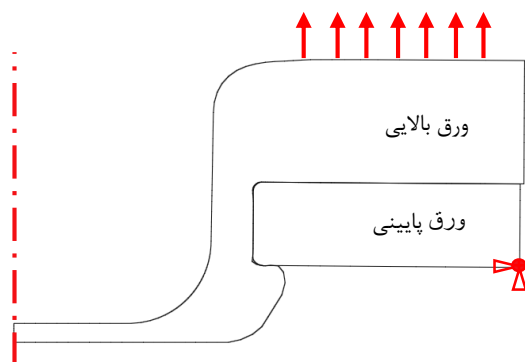


شکل ۲-۸: اجزای مدل متقارن محوری فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب ثابت شیب‌دار

با توجه به تغییر شکل‌های بزرگی که در فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار نیز اتفاق می‌افتد، برای جلوگیری از توقف تحلیل ناشی از تغییر شکل شدید المان‌ها در آن ناحیه، از تکنیک شبکه‌بندی تطبیقی لاگرانژی-اویلری اختیاری (ALE) استفاده شد. ضریب اصطکاک کلومبی [۲۶] بین ورق‌ها با سطوح ابزار ۰/۱ و بین دو ورق ۰/۲۵ در نظر گرفته شد [۴۰]. فرآیند شکل‌دهی اتصال سرد سوراخ‌دار شامل دو گام اعمال نیروی ورق‌گیر و جابجایی سنبه به سمت قالب به میزان مشخص می‌باشد. برای تعیین استحکام کششی اتصال، در گام سوم با ثابت کردن ورق‌ها تماس ابزار حذف شد. سپس، در گام چهارم مطابق شکل ۲-۱۰، با مقید کردن لبه‌ی ورق پایینی، ورق بالایی در جهت محوری، به سمت بالا حرکت می‌کند. بیشینه نیروی لازم برای جدا کردن ورق‌ها از هم، به عنوان استحکام اتصال F در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۹: هندسه مدل ورق‌های استحکام بالا و گالوانیزه در اتصال سرد



شکل ۲-۱۰: مدل‌سازی المان محدود برای تعیین استحکام کششی اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های

DX51D/DOCOL 1400M بعد از گام شکل‌دهی اتصال سرد

در تحلیل هر دو فرآیندهای اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M و اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، از حل گر دینامیک/ صریح نرم‌افزار آباکوس استفاده شد.

در حل صریح دینامیکی، معادله کار مجازی (۲-۲) به صورت معادله (۳-۲) گسسته‌سازی می‌شود.

$$\int_V \sigma \nabla(\delta \mathbf{u}) dV = \int_A \mathbf{t} \delta \mathbf{u} dA - \int_V \rho \ddot{\mathbf{u}} \delta \mathbf{u} dV \quad (2-2)$$

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}_n = \mathbf{F}_n - \mathbf{I}_n \quad (3-2)$$

در معادلات بالا، σ تنسور تنش کوشی، \mathbf{u} جابجایی، $\dot{\mathbf{u}}$ شتاب، \mathbf{t} بردار ترکشن، ρ چگالی، V حجم و A سطح است. همچنین \mathbf{M} ماتریس جرم قطری، \mathbf{F} بردار نیروی خارجی و \mathbf{I} بردار نیروی داخلی در نمو n است. با داشتن $\dot{\mathbf{u}}$ از نمو n ، و انتگرال گیری با استفاده از روش تفاضل مرکزی می‌توان بردار جابجایی \mathbf{u} را در نمو $n+1$ ، مطابق (۴-۲) بروز کرد.

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta t_{n+1} \dot{\mathbf{u}}_{n+\frac{1}{2}} \quad (۴-۲)$$

که در این رابطه $\dot{\mathbf{u}}_{n+\frac{1}{2}}$ از معادله (۵-۲) بدست می‌آید.

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{\mathbf{u}}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \ddot{\mathbf{u}}_n \quad (۵-۲)$$

در روند دینامیکی صریح، نیازی به محاسبه‌ی مدول مماسی نیست. در مقابل، تعداد نموها برای حل مسئله بالاست. محاسبات در صورتی پایدار خواهد بود که نمو زمانی، از یک مقدار بحرانی، کمتر باشد. با کاهش ابعاد المان‌ها، این نمو زمانی کاهش می‌یابد. از این رو برای اقتصادی شدن محاسبات، سرعت ابزار در شبیه‌سازی بیش از مقدار حقیقی آن و با یک دامنه‌ی تغییرات هموار در نظر گرفته شد. همواره توجه شد که این افزایش نرخ بارگذاری، موجب افزایش بیش از حد انرژی جنبشی نشود.

۴-۲-۴ مدل‌سازی سه‌بعدی آزمون استحکام کششی اتصال سرد

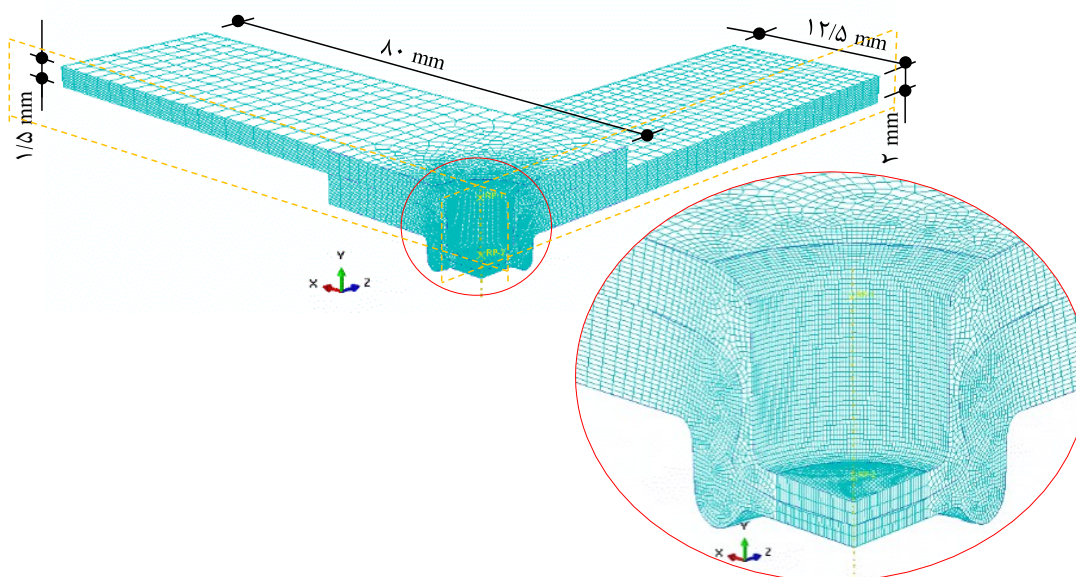
برای مطالعه تحلیلی استحکام کششی اتصال در هر دو روش اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M از مدل‌سازی متقارن محوری فرآیند اتصال استفاده شد. فرض تقارن محوری برای فرآیند استحکام کششی اتصال، فرض ساده‌شده است. برای صحت‌گذاری بر نتایج فرض تقارن محوری، بر اساس روش تجربی در نظر گرفته شده که بارگذاری و هندسه متقارن محوری ندارد، و همچنین بررسی خمش ورق‌ها و تاثیر آن بر استحکام اتصال، این آزمون به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شد.

۴-۲-۱-۴-۲ مدل‌سازی سه‌بعدی آزمون استحکام کششی اتصال DX51D/DX51D

مختصات گره‌های سطوح ورق‌های بالایی و پایینی به صورت خروجی متنی در پایان گام شکل‌دهی تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد متقارن محوری، که هندسه اتصال به صورت کامل شکل گرفت، درخواست

شد. با استفاده از این مختصات، ورق‌ها به صورت سه‌بعدی شکل‌پذیر و توپر^۱ مدل‌سازی شد. برای ساده‌سازی و کاهش زمان حل و برای اینکه نمونه اتصال نسبت به صفحه XY و ZY تقارن داشت، مطابق شکل ۲-۱۱ مدل‌سازی به صورت یک چهارم نمونه انجام گرفت. از مدل‌سازی قید و بند مهار و بستن نمونه به دستگاه کشش برای اینکه تاثیر بر نتایج تحلیل ندارد، صرف‌نظر شد.

برای رسیدن به شبکه‌بندی مناسب مدل ورق‌ها به بخش‌های کوچکتر تقسیم و به صورت جداگانه شبکه‌بندی شد. برای گسسته‌سازی ورق‌ها از المان خطی ۸ گرهی آجری‌شکل و کاهش‌یافته C3D8R استفاده شد. تعداد ۳۸۰۲۸ المان برای ورق بالایی و ۹۵۰۱۰ المان برای ورق پایینی تشکیل شد. در شکل ۲-۱۱ هندسه و نحوه شبکه‌بندی ورق‌های اتصال قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱۱: هندسه و نحوه شبکه‌بندی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D

خواص مکانیکی ورق‌ها، برای اینکه کرنش در ناحیه اتصال در پایان گام شکل‌دهی (در تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد متقارن محوری) اشباع شده است، به صورت کاملاً مومسان و در سایر قسمت‌های ورق بر اساس رفتار فلز پایه، کشسان-مومسان، به نرم‌افزار آباکوس معرفی شد. الگوریتم تماس بین سطوح ورق‌ها از

^۱ Solid

نوع تماس کلی^۱ با ضریب اصطکاک ۰/۲۵، برابر با ضریب اصطکاک تعریف شده در مدل‌سازی فرآیند متقارن محوری اتصال سرد مشابه، انتخاب شد.

قیود ناشی از تقارن در قسمت شرایط مرزی به ورق‌ها اعمال شد. قسمت‌هایی از ورق که در قید و بند بسته و ثابت می‌شود، با تعریف قید هم‌بندی^۲ به نقطه مرجع متصل شد. تمام درجات آزادی نقطه مرجع مربوط به ورق پایینی، بسته شد. درجات آزادی نقطه مرجع مربوط به ورق بالایی به جزء جابجایی در راستای محور اتصال، مقید شد. جابجایی نقطه مرجع ورق بالایی به اندازه‌ای تعریف شد که بیشینه نیروی لازم برای جدا شدن اتصال حاصل شود.

۲-۴-۲- مدل‌سازی سه‌بعدی آزمون استحکام کششی اتصال DX51D/DOCOL 1400M

مختصات گره‌های سطوح ورق‌های بالایی و پایینی به صورت خروجی متنی در پایان گام شکل‌دهی تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد متقارن محوری، که هندسه اتصال به صورت کامل شکل گرفت، درخواست شد. با استفاده از این مختصات، ورق‌ها به صورت سه‌بعدی شکل‌پذیر و توپر مدل‌سازی شد. برای ساده‌سازی و کاهش زمان حل و برای اینکه نمونه اتصال نسبت به صفحه XY و ZY متقارن است مطابق شکل ۲-۱۲ مدل‌سازی به صورت یک چهارم نمونه انجام گرفت. از مدل‌سازی قید و بند مهار و بستن نمونه به دستگاه کشش برای اینکه تاثیر بر نتایج تحلیل ندارد، صرف‌نظر شد.

برای گسسته‌سازی ورق‌ها از المان خطی ۸ گرهی آجری شکل و ناسازگار^۳ C3D8I استفاده شد. تعداد ۸۴۳۱ المان برای ورق بالایی و ۷۳۲۷ المان برای ورق پایینی تشکیل شد. در شکل ۲-۱۲ هندسه و نحوه شبکه‌بندی ورق‌های اتصال قابل مشاهده است.

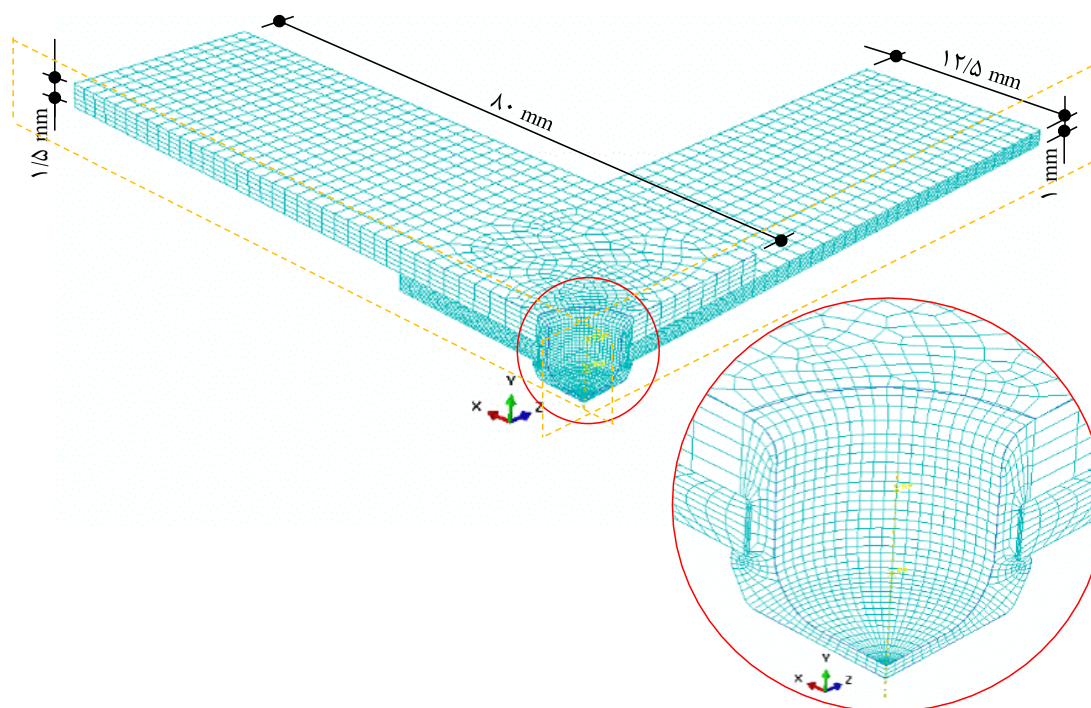
خواص مکانیکی ورق بالایی، برای اینکه استحکام تسلیم در ناحیه اتصال در پایان گام شکل‌دهی (در تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد متقارن محوری) اشباع شده است، به صورت کشسان-کاملاً مومسان و در سایر قسمت‌های ورق و همچنین ورق پایینی بر اساس رفتار فلز پایه، کشسان-مومسان کار سخت شونده، به نرم‌افزار

^۱ General contact

^۲ Coupling

^۳ Incompatible

آباکوس معرفی شد. الگوریتم تماس بین سطوح ورق‌ها از نوع تماس عمومی^۱ با ضریب اصطکاک ۰/۲۵، برابر با ضریب اصطکاک تعریف شده در مدل‌سازی فرآیند متقارن محوری اتصال سرد مشابه، انتخاب شد.



شکل ۲-۱۲: هندسه و نحوه شبکه‌بندی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M

قیود ناشی از تقارن در قسمت شرایط مرزی به ورق‌ها اعمال شد. قسمت‌هایی از ورق که در قید و بند بسته و ثابت می‌شود، با تعریف قید هم‌بندی^۲ به نقطه مرجع متصل شد. تمام درجات آزادی نقطه مرجع مربوط به ورق پایینی، بسته شد. درجات آزادی نقطه مرجع مربوط به ورق بالایی به جزء جابجایی در راستای محور اتصال، مقید شد. جابجایی نقطه مرجع ورق بالایی به اندازه‌ای تعریف شد که بیشینه نیروی لازم برای جدا شدن اتصال حاصل شود.

۲-۵- تحلیل آزمون کشش

یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر نتایج حاصل از تحلیل المان محدود در فرآیندهای شکل‌دهی فلز، معرفی صحیح رفتار کشسان و مومسان ماده به نرم‌افزار مدل‌سازی می‌باشد. رفتار خطی در گستره کشسان ماده با

^۱ General contact

^۲ Coupling

داشتن مدول یانگ، برای ورق‌های مورد استفاده توسط تولید کنندگان ارایه شده است، برای نرم‌افزار تحلیل، قابل محاسبه و پیش‌بینی است. برای تعیین رفتار غیر خطی در گستره مومسان، آزمون کشش تک‌محوره در آزمایشگاه انجام شد. برای صحت‌گذاری و اطمینان از خواص استخراج شده از نتایج آزمون کشش، مدل‌سازی المان محدود، آزمون کشش استاندارد انجام شد.

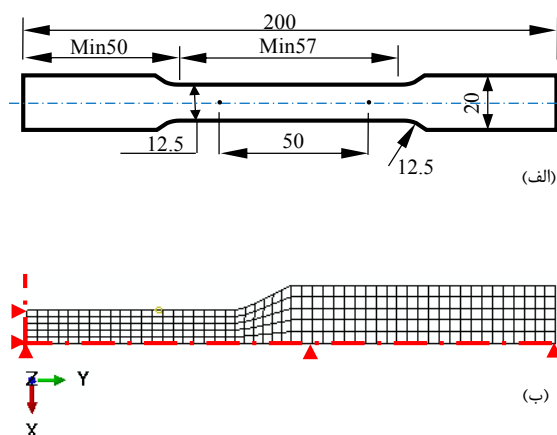
۲-۵-۱- مدل‌سازی هندسی نمونه کشش استاندارد

نمونه‌ی آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8/E8M با ابعاد آورده شده در شکل ۲-۱۳-الف، از نوع سه‌بعدی شکل‌پذیر و به صورت توپر مدل‌سازی شد. جهت ساده‌سازی و کاهش زمان حل و به دلیل وجود تقارن در نمونه (صفحه YZ و XZ)، فقط یک چهارم نمونه مطابق شکل ۲-۱۳-ب در نظر گرفته شد. از مدل‌سازی فک‌های ورق‌گیر به دلیل عدم تاثیر در نتایج تحلیل صرف‌نظر شد.

خواص کشسانی ورق‌ها بر اساس داده‌های گزارش شده توسط تولیدکننده و رفتار در گستره مومسانی از نتایج آزمون تجربی مطابق نمودار شکل ۴-۴ به نرم‌افزار معرفی شد. در بخش تعیین گام، حل‌گر ضمنی انتخاب و خروجی‌های مورد نیاز برای بررسی تعریف شد. که از جمله این خروجی‌ها می‌توان به خروجی طول گیج و خروجی نیرو به صورت عکس‌العمل نقطه مرجع تعریف شده اشاره نمود.

در ادامه شرایط مرزی شامل تثبیت طول نمونه (در هر سه جهت) که داخل فک ثابت دستگاه کشش قرار می‌گیرد و نیز تثبیت طول نمونه (به جزء جهت امتداد اعمال نیرو) که داخل فک متحرک دستگاه کشش قرار می‌گیرد از طریق اعمال قید به نقطه مرجع وابسته به این قسمت قطعه اعمال شد و با تعریف قید جابجایی برای انتهای آزاد قطعه، شرایط آزمون کشش، شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج آزمون عملی، جابجایی انتهای نمونه به اندازه‌ی تعریف شد که ناحیه مومسان را در برگرفته و از وقوع گلوبی در نمونه اطمینان حاصل شود. برای رسیدن به شبکه‌بندی مناسب و متقارن، نمونه تست کشش به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم و شبکه‌بندی شد. همچنین المان‌ها از نوع C3D8R انتخاب شده و اندازه المان^۱ برابر با ۲ تعیین، که به این ترتیب هندسه مدل شامل ۵۱۵ المان شد. در شکل ۲-۱۳-ب نحوه شبکه‌بندی نمونه قابل مشاهده است.

^۱ Approximate global size



شکل ۲-۱۳: نمونه آزمون کشش (الف) هندسه و ابعاد (ب) نحوه شبکه‌بندی

۲-۶- طراحی آزمایش

بهینه‌سازی پارامترهای هندسی طراحی ابزار نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت اتصال دارد. برای بهینه‌سازی پارامترهای ابزار از روش طراحی آزمایش متعامد، استفاده شده است. این روش شامل طرح‌ریزی شرایط آزمایش با استفاده از جدول‌های خاص است که آن را جدول آرایه‌های متعامد می‌نامند. این جدول‌ها، کمینه تعداد آزمایش‌ها و شرایط انجام آنها را تعیین و تضمین می‌کند که طراحی آزمایش‌ها از روایی و پایایی لازم برخوردار است. با استفاده از این روش، تعداد بررسی‌های تحلیلی لازم برای توسعه یک طراحی مهندسی به صورت قابل توجهی کاهش یافته، زمان و هزینه‌های آزمایش کمینه می‌شود. در روش طراحی آزمایش متعامد، مسائل بهینه‌سازی به دو گروه، استاتیکی و دینامیکی طبقه‌بندی می‌شود. اگر متغیر زمان در تابع هزینه مسئله‌ی بهینه‌سازی نباشد، مسئله‌ی بهینه‌سازی، استاتیکی است. ولی اگر زمان نیز وارد تابع هزینه شود مسئله‌ی بهینه‌سازی، دینامیکی یا پویا می‌باشد.

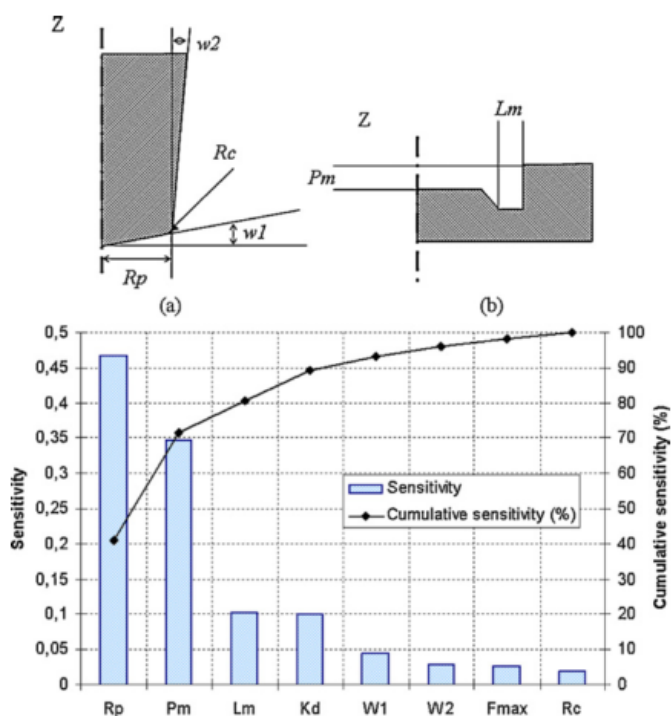
در این مطالعه با توجه به عدم حضور متغیر زمان در تابع بهینه‌سازی، مسئله استاتیکی در نظر گرفته شده که شامل سه نوع "کوچک‌تر-بهتر"، "بزرگ‌تر-بهتر" و "اندازه اسمی-بهتر" می‌باشد. از آنجا که هدف بیشینه کردن استحکام اتصال است، رویکرد "بزرگ‌تر-بهتر" برای بهینه‌سازی انتخاب شد. روش طراحی آزمایش متعامد در آزمایش‌های رایانه‌ای، برای بهینه‌سازی ترکیبی از پارامترهای مهم هندسه ابزار، موثر در استحکام کششی اتصال، به کار گرفته شد.

برای طراحی جدول آرایه‌های متعامد و کاهش زمان و هزینه طراحی و بهینه‌سازی، ابتدا نوع عوامل از نظر تاثیر بر پاسخ مسئله و نیز تحت کنترل بودن باید بررسی شود و عواملی که بر پاسخ مسئله بهینه‌سازی اثر داشته و

در شرایط واقعی قابل کنترل است، نسبت به عواملی که بر پاسخ اثر دارد ولی در شرایط واقعی قابل کنترل نیست و یا اثر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ ندارد، تعیین شود. عوامل کنترلی، در واقع پارامترهای ورودی مسئله هستند که به منظور رسیدن شرایط بهینه در طول آزمایش‌ها بر حسب سطوح انتخابی و ماتریس آزمایش‌ها تغییر می‌کند. عوامل کم‌اثر نیز به تمامی پارامترهایی گفته می‌شود که باعث ایجاد تغییرات جزئی در پاسخ می‌شوند و بر حسب شرایط در طی آزمایش‌ها ثابت فرض می‌شوند.

۲-۶-۱- تعیین عوامل کنترلی و کم‌اثر اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D

در این فرآیند با توجه به شکل ۲-۱۴ شعاع سنبه، ارتفاع قالب، عرض شیار قالب، هم‌محوری ابزار و زاویه کف سنبه (که بیش از ۹۰٪ حساسیت را شامل می‌شوند [۹]) به عنوان عوامل کنترلی در نظر گرفته می‌شود. از بین این عوامل هم‌محوری ابزار و نیروی جدایش بیشینه به عنوان پارامترهای فرآیند است که ارتباطی با متغیرهای طراحی هندسی ابزار نداشته و برای همین از عوامل طراحی حذف شد. بنابراین عوامل کنترلی شامل چهار متغیر، شعاع سنبه، ارتفاع قالب، عرض شیار قالب، و زاویه کف سنبه است. سایر پارامترهای طراحی قالب مانند شعاع گوشه پانچ و شعاع گوشه قالب و مقدار لقی بین سنبه و قالب، با توجه به اینکه حساسیت کمتری در پارامترهای فرآیند دارند به عنوان عوامل کم‌اثر لحاظ می‌شود و برای همین در طی انجام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۱۴: تحلیل حساسیت برای پارامترهای فرآیند اتصال مکانیکی سرد با قالب ثابت [۹]

۲-۶-۲- طراحی آزمایش متعامد بهینه‌سازی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار

پارامترهای مهم ابزار مورد استفاده در اتصال سرد شامل: شعاع سنبه R_p ، عمق قالب P_m ، عرض شیاردار L_m و زاویه کف سنبه P_{BA} است. پارامترهای هندسی اتصال شامل ضخامت تورفتگی t_s ، ضخامت گلویی t_n و نیز ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X در شکل ۱-۳، نشان داده شد. هندسه‌ی اتصال به عنوان متغیر تعیین‌کننده استحکام آن، به صورت قابل توجهی متأثر از چهار پارامتر هندسی مهم ابزار است. پارامترهای فرایندی مانند شرایط اصطکاکی و نرخ تغییر شکل نیز می‌تواند روی جریان مواد و در نتیجه هندسه‌ی اتصال موثر باشد. این پایان‌نامه بر بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار و فرآیند برای رسیدن به اتصال با هندسه‌ی بهینه و استحکام بیشینه متمرکز است.

گام اول در روش طرح آزمایش متعامد، تعیین آرایه‌های متعامد مناسب بر اساس پارامترهای هندسی مهم ابزار است. چهار پارامتر موثر ابزار بر اساس مطالعه راکس و همکارانش [۹] تعیین شد. محدوده مناسب برای این جدول آرایه‌های متعامد $L_9(3^4)$ که عدد ۳، تعداد سطوح آرایه، معرف سطوح آزمون و عدد ۴، تعداد ستون‌های آرایه، معرف تعداد فاکتورهای موثر بر فرآیند، انتخاب شد. مطابق جدول ۱-۲ مقادیر سطوح ۱-۳، از پژوهش‌های مشابه [۱۴، ۱۷، ۲۹، ۳۳] استخراج، و بر اساس فواصل مساوی تعیین شد. بر اساس این جدول آرایه، تعداد ۹ آزمون شبیه‌سازی فرآیند اتصال با قالب ثابت شیاردار طراحی شد. برای طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ استفاده شد. مینی‌تب یک نرم‌افزار کنترل کیفیت آماری می‌باشد که به وسیله آن می‌توان با تجزیه و تحلیل داده‌های آماری به طراحی آزمایش پرداخت.

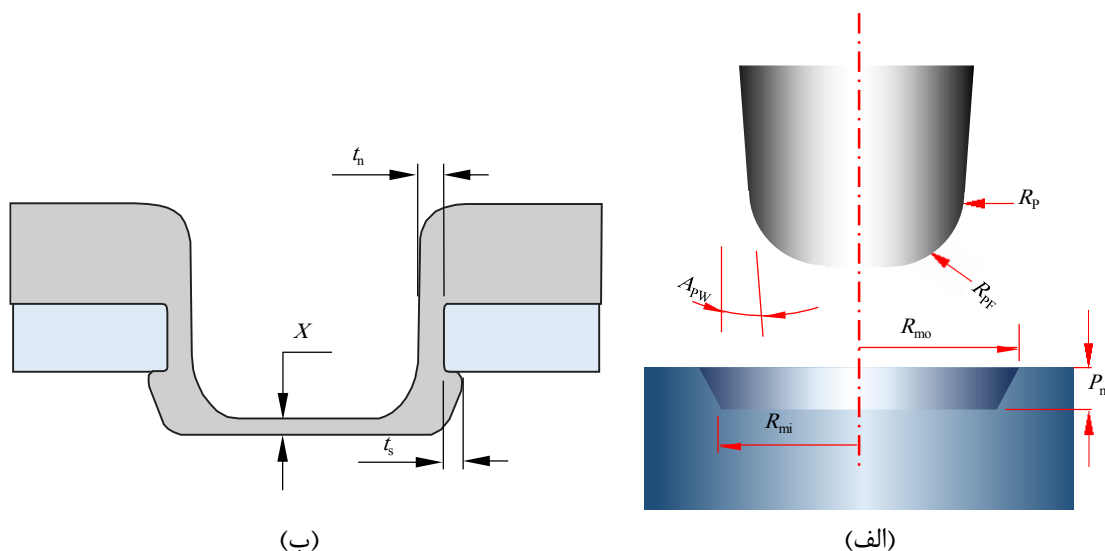
جدول ۱-۲: پارامترهای هندسی موثر ابزار و مقادیر سطوح برای طراحی آزمایش متعامد در فرآیند اتصال سرد با

قالب ثابت شیاردار

| سطح | شعاع سنبه R_p (mm) | عمق قالب P_m (mm) | عرض شیاردار قالب L_m (mm) | زاویه کف سنبه P_{BA} (°) |
|-----|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| ۱ | ۲/۴ | ۱/۴ | ۱/۲ | ۱ |
| ۲ | ۲/۵ | ۱/۵ | ۱/۴ | ۳ |
| ۳ | ۲/۶ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۵ |

۲-۶-۳- طراحی آزمایش متعامد بهینه‌سازی ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های X51D/DOCOL 1400M

با استفاده از روش طراحی آزمایش متعامد در آزمایش‌های رایانه‌ای، بهینه‌سازی ترکیبی از پارامترهای مهم هندسه ابزار، موثر در استحکام کششی اتصال، انجام شد. پارامترهای مهم ابزار مورد استفاده در اتصال سرد سوراخ‌دار شامل: شعاع سنبه R_P ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، و زاویه دیواره سنبه APW ، است (شکل ۲-۱۵-الف). پارامترهای هندسی اتصال شامل ضخامت تورفتگی t_s ، ضخامت گلویی t_n و نیز ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X ، در شکل ۲-۱۵-ب، نشان داده شده است. هندسه‌ی اتصال به عنوان متغیر تعیین‌کننده استحکام آن، به صورت قابل توجهی متأثر از چهار پارامتر هندسی مهم ابزار و سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، است. پارامترهای فرایندی مانند شرایط اصطکاکی و نرخ تغییر شکل نیز می‌تواند روی جریان مواد و در نتیجه هندسه‌ی اتصال موثر باشد. در این مطالعه تمرکز بر بهینه‌سازی پارامترهای هندسه ابزار و سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا، R_{PH} ، برای رسیدن به اتصال با هندسه‌ی بهینه و استحکام بیشینه است و این پارامترها، عوامل غیرکنترلی محسوب، و ثابت در نظر گرفته‌شد.



شکل ۲-۱۵: پارامترهای هندسی (الف) ابزار و (ب) اتصال، در فرآیند اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL

1400M

گام اول در روش طرح آزمایش متعامد، تعیین آرایه‌های متعامد مناسب بر اساس پارامترهای مهم هندسی مستقل موثر، در استحکام اتصال است. چهار پارامتر مستقل موثر ابزار شامل R_P ، P_m ، R_{PF} ، APW و نیز R_{PH} و X ، به عنوان پارامترهای مستقل موثر فرآیند، تعیین شد. شعاع کوچک R_{mi} و شعاع بزرگ R_{mo} حفره قالب به عنوان متغیر وابسته ($R_{mi} = R_{PH}$ و $R_{mo} = R_{PH} + 0.5 \text{ mm}$) در نظر گرفته شد. محدوده مناسب برای جدول

آرایه‌های متعامد (L27(3^۶) که عدد ۳، تعداد سطرهاى آرایه، معرف سطوح آزمون و عدد ۶، تعداد ستون‌های آرایه، معرف تعداد فاکتورهای موثر بر فرآیند است انتخاب، و مطابق جدول ۲-۲ مقادیر سطوح ۱-۳، بر اساس فواصل مساوی تعیین شد. بر اساس این جدول آرایه، تعداد ۲۷ آزمون شبیه‌سازی فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب ثابت شیب‌دار با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ طراحی شد.

جدول ۲-۲: پارامترهای هندسی مستقل موثر ابزار و فرآیند و مقادیر سطوح برای طراحی آزمایش متعامد در

فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M

| سطح | P_m (mm) | X (mm) | R_p (mm) | R_{PH} (mm) | R_{PF} (mm) | A_{PW} (°) |
|-----|---------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|
| ۱ | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۲/۲ | ۲/۹ | ۱/۰ | ۰ |
| ۲ | ۰/۷ | ۰/۳۵ | ۲/۳ | ۳/۰ | ۱/۱ | ۱ |
| ۳ | ۰/۸ | ۰/۴۵ | ۲/۴ | ۳/۱ | ۱/۲ | ۲ |

فصل ۳ روش تجربی

در این فصل به معرفی ورق‌های فولادی مورد استفاده و نحوه آزمون کشش نمونه استاندارد و انجام آن در آزمایشگاه برای استخراج منحنی تنش حقیقی-کرنش مومسان پرداخته و انجام فرآیندهای اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M بررسی، و نحوه آزمون کشش و انجام آن برای استخراج منحنی استحکام کششی اتصال سرد آورده می‌شود. در پایان روش انجام سختی‌سنجی آورده شده است.

۳-۱- ورق‌های فولادی

ورق‌های فولاد DX51D با پوشش گالوانیزه گرم به مقدار 125 g/m^2 ، به ضخامت‌های $1/5 \text{ mm}$ و 2 mm بر اساس استاندارد EN10346/00 تولید شرکت فولاد مبارکه، برای صنعت خودروسازی است. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی این فولاد، در جدول ۴-۱ و جدول ۴-۲ آورده شد. تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی بر اساس نتایج آزمون کشش تک محوره استاندارد در آزمایشگاه بدست آمد. سایر خواص بر اساس گزارش تولیدکننده در جدول آورده شد. نمونه متالوگرافی بر اساس روش استاندارد ASTM E3-17 مطابق شکل ۳-۱ آماده‌سازی شد. بر اساس روش استاندارد ASTM E 407-2015 با محلول نایتال ۲ درصد در آزمایشگاه اچ شده و بر اساس دستورالعمل استاندارد ASTM E 883-17 تصاویر با میکروسکوپ نوری گرفته شد.

ورق استحکام بالا، فولاد Docol CR1150Y1400T-MS با نام تجاری DOCOL 1400M به ضخامت ۱ mm بر اساس استاندارد SSAB خاص صنعت خودروسازی می‌باشد. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی این فولاد، در جدول ۱-۴ و جدول ۲-۴ آورده شد. تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی از نتایج آزمون کشش تک محوره استاندارد در آزمایشگاه بدست آمد. تغییر طول نسبی بر اساس برگه مشخصات^۱ ورق، مدول یانگ و نسبت پواسون بر اساس مطالعه ماجی و همکارانش [۴۱] تعیین شد. چگالی این ورق برابر با ورق DX51D در نظر گرفته شد.

نمونه متالوگرافی مطابق شکل ۱-۳ آماده‌سازی، و به همان روش و دستورالعمل‌های ورق فولادی گالوانیزه توسط میکروسکوپ نوری عکس‌برداری شد.



شکل ۱-۳: تصویر ماکروسکوپی نمونه آماده‌شده از اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M

^۱ Data sheet

۳-۲- آزمون کشش استاندارد

برای تعیین رفتار مومسان ماده و استخراج منحنی تنش حقیقی- کرنش مومسان برای استفاده در تحلیل المان محدود، آزمون کشش تک‌محوره انجام شد. برای این منظور، مطابق شکل ۳-۲ نمونه آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8/E8M به تعداد سه عدد برای افزایش دقت نتایج، آماده‌سازی شد. آزمون کشش شبه استاتیکی با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک (شکل ۳-۳)، با سرعت 0.32 mm/s انجام پذیرفت. برای اندازه‌گیری تغییر طول در ناحیه‌ی سنجه، مطابق شکل ۳-۴ از افزایش طول سنج^۱ استفاده شد.



شکل ۳-۲: آماده‌سازی نمونه آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8/E8M



شکل ۳-۳: دستگاه آزمون کشش استاندارد، اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک

^۱ Extensometer



شکل ۳-۴: آزمون کشش تک محوره روی ورق

با اعمال نیرو مشخص توسط واحد سرویهیدرولیک دستگاه، میزان جابجایی توسط افزایش طول سنج اندازه گیری و ذخیره شد. با داشتن نیرو - جابجایی، مقادیر تنش مهندسی، کرنش مهندسی، تنش حقیقی، کرنش حقیقی و کرنش حقیقی مومسان از روابط (۱-۳) تا (۳-۳)، محاسبه شد.

$$\sigma_{tru} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (۱-۳)$$

$$\varepsilon_{tru} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (۲-۳)$$

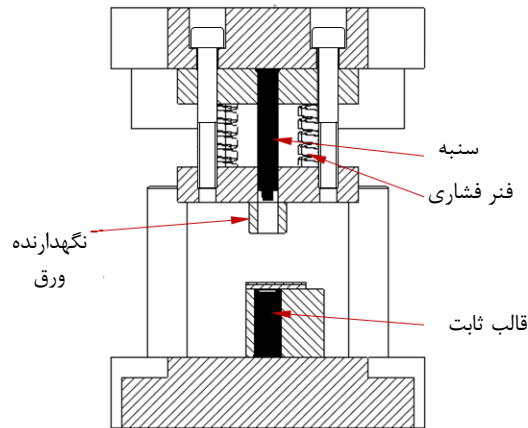
$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{tru} - \frac{\sigma_{tru}}{E} \quad (۳-۳)$$

۳-۳- انجام فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت

فرآیند اتصال سرد با قالب ثابت، مطابق شکل ۳-۵ به وسیله پرس هیدرولیک و ابزار اتصال، انجام گرفت. ابزار اتصال سرد طوری طراحی شد که بتوان با تعویض سنبه و قالب ثابت هر دو اتصال ورق های DX51D/DX51D و DX51D/DOCOL 1400M را تولید کرد. ابزار طراحی شده مطابق شکل ۳-۶ شامل سنبه، فنرهای فشاری، قالب ثابت و ورق گیر است.



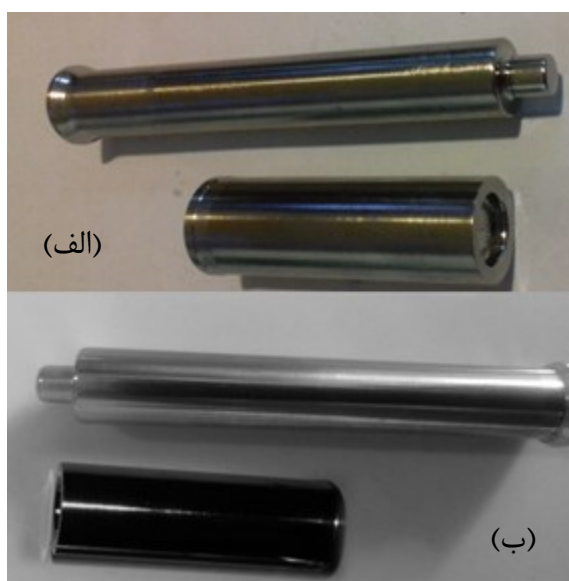
شکل ۳-۵: پرس هیدرولیک و ابزار مورد نیاز برای انجام اتصال سرد با قالب ثابت



شکل ۳-۶: ابزار طراحی شده برای انجام فرآیند اتصال سرد

سنبه‌ها و قالب ثابت مطابق شکل ۳-۷ از جنس فولاد HSS با دستگاه فرز و تراش CNC ساخته و عملیات حرارتی انجام شد و سختی قطعه HRC ۶۳ اندازه‌گیری شد. قطعات با توجه به صافی سطح مورد نیاز، سنگ و پولیش شد. از فنرهای استاندارد قرمز رنگ با عملکرد بالا^۱ با مفتول مقطع مستطیلی، به قطر ۲۰ mm و طول ۶۴ mm (کد مشخصه D64) استفاده شد. فنرها طوری انتخاب شد که نیروی ۵۰۰۰ N به ورق‌های اتصال را در انتهای کورس جمع‌شدگی، بر اساس آنچه به نرم‌افزار آباکوس معرفی شد اعمال کند. از کفشک و راهنمای نرم تولیدکننده با کارگیری $90 \times 90 \text{ mm}^2$ استفاده شد. ورق‌گیر، ماتریس، صفحه سنبه‌گیر از جنس فولاد ۲۰۸۰ توسط فرز NC آماده‌سازی، سنگ‌کاری و با فرز CNC سوراخکاری و برقو شد.

^۱ High performance



شکل ۳-۷: سنبله و قالب الف) اتصال سرد با قالب ثابت و شیاردار ب) اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب ثابت شیب‌دار

اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D، با استفاده از سنبله و قالب ثابت شیاردار شکل ۳-۷ الف، انجام شد و ابزار با روبند به میز پرس بسته شد. ورق‌های گالوانیزه روی قالب ثابت به ترتیب ضخامت‌های ۲ mm و ۱/۵ mm قرار گرفت. تنظیمات فرایند به نحوی انجام شد که ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال در آزمایش‌ها حدود ۰/۹ mm، معادل ۲۵٪ مجموع ضخامت ورق‌های اولیه (۷۵٪ نازک شدن مجموع ضخامت ورق‌ها) [۴۲] باشد. سنبله به سمت ورق‌ها پایین آمده و با نفوذ ورق‌ها گالوانیزه به داخل قالب و کوبش آنها داخل حفره قالب، اتصال ایجاد شد.

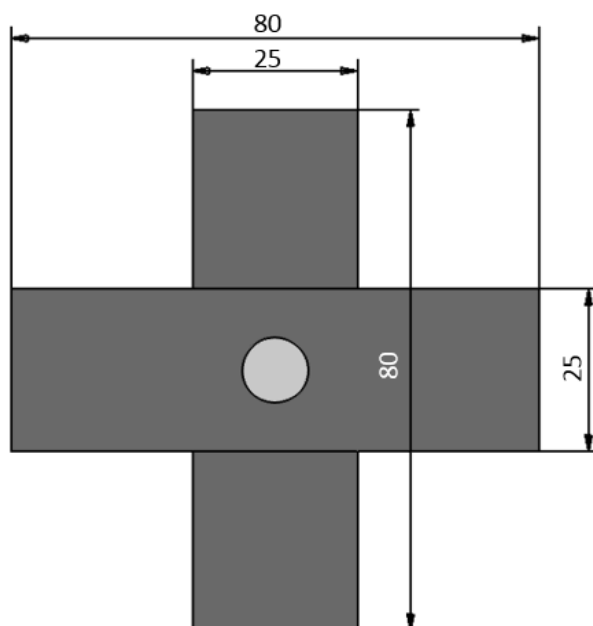
اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، با استفاده از سنبله و قالب ثابت شیب‌دار شکل ۳-۷ ب انجام شد. تنظیمات فرایند با روش آزمون و خطا و به کمک ریزسنج و ساچمه به قطر ۴/۷۵ mm (ساچمه داخل حفره فنجان‌ی شکل اتصال قرار گرفته و توسط ریزسنج اندازه‌گیری و پس از کم کردن قطر ساچمه اندازه ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی حاصل شد.) به نحوی انجام شد که ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال در آزمایش‌ها ۰/۲۵ mm، برابر مقدار پارامتر X حاصل از بهینه‌سازی، کنترل شد. برای هم‌راستایی سوراخ ورق استحکام بالا با حفره قالب از یک پین راهنما هم‌قطر با سوراخ و قطر کوچک حفره قالب استفاده شد. ورق سوراخ‌دار استحکام بالا را ابتدا روی قالب و در راستای ماتریس قرار داده و توسط پین راهنما، سوراخ ورق با حفره قالب هم‌راستا شد. ورق گالوانیزه در راستای عمود بر ورق استحکام بالا و روی آن قرار گرفت. سنبله به سمت ورق‌ها پایین آمده و با نفوذ ورق گالوانیزه از میان سوراخ ورق استحکام بالا، به داخل قالب و گسترده‌شدن آن داخل حفره قالب، اتصال ایجاد شد.

۳-۴- آزمون استحکام کششی اتصال سرد

بر اساس بند ۸-۴-۱ استاندارد B28 4250 [۴۳]، برای اندازه‌گیری استحکام کششی اتصال، مطابق شکل ۳-۸ نمونه‌هایی مستطیلی از ورق به صورت عمود بر راستای یکدیگر، به هم متصل شد. کیفیت اتصال به وسیله شکل مقطع و اندازه‌گیری استحکام کششی آن، ارزیابی می‌شود. مقطع اتصال توسط دستگاه سایه‌نگار مطابق شکل ۳-۹ و استحکام کششی اتصال با دستگاه کشش با نرخ بارگذاری 0.33 mm/s اندازه‌گیری شد. ورق‌های متصل شده به هم داخل قید و بندی که برای همین منظور طراحی و ساخته شد (طوری طراحی شد که هر دو نوع اتصال سرد به آن بسته شود) قرار گرفته و محکم شد. مطابق شکل ۳-۱۰ نمونه اتصال ۷ در داخل بدنه پایینی شماره ۱ قرار گرفته و توسط صفحه‌های شماره ۶ و پیچ‌های شماره ۴ ورق پایینی نمونه مقید شد. سپس در جهت عمود بر ورق پایینی، ورق بالایی اتصال داخل بدنه شماره ۵ قرار گرفته و توسط صفحه‌های شماره ۲ و پیچ‌های شماره ۴، ثابت شد.

در شبیه‌سازی متقارن محوری، نیروهای وارد شده به نمونه، باید متقارن محوری باشد. برای همین و برای جلوگیری از ایجاد گشتاور ناشی از عدم هم‌راستایی محور اعمال نیرو با محور اتصال، مطابق شکل ۳-۱۱ قسمت انتهایی میله‌های رزوه‌شده (برای اتصال قید و بند به گیره دستگاه کشش استفاده شد) در سمت اتصال به بدنه شماره ۵، ناف‌دار ماشینکاری شد تا در داخل قسمت فرورفتگی اتصال (محل اثر سنبه) قرار گیرد و در سمت اتصال به بدنه شماره ۱، سوراخکاری شده تا برآمدگی فنجانی اتصال (محل اثر قالب) داخل آن هم‌مرکز شود. پس از محکم کردن نمونه داخل قید و بند، میله‌ها از نمونه اتصال فاصله گرفته و به دستگاه کشش متصل شد. استفاده از سازوکار طراحی شده باعث حصول اطمینان از هم‌راستایی نیرو و محور اتصال سرد شد.

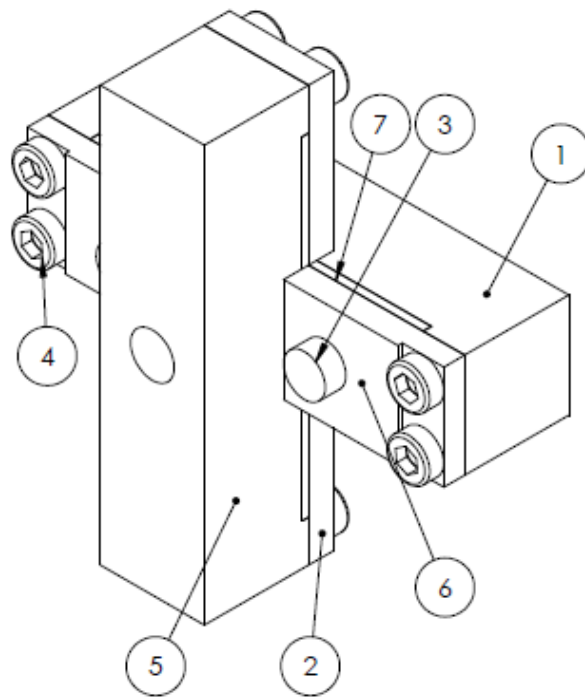
نمونه اتصال ثابت شده داخل قید و بند روی دستگاه دریل ستونی در موقعیت‌های موجود روی قید و بند، با متی به قطر 5 mm سوراخکاری شد. در پایان پین‌های شماره ۳ در موقعیت تعیین شده قرار گرفت. مجموعه اتصال و قید و بند مطابق شکل ۳-۱۲ به دستگاه کشش بسته شده و اعمال نیرو تا جدا شدن ورق‌ها از یکدیگر ادامه یافت و در طی فرآیند جداکردن ورق‌ها در ناحیه اتصال از یکدیگر، بیشترین نیروی جداسازی به عنوان بیشینه استحکام اتصال در نظر گرفته شد.



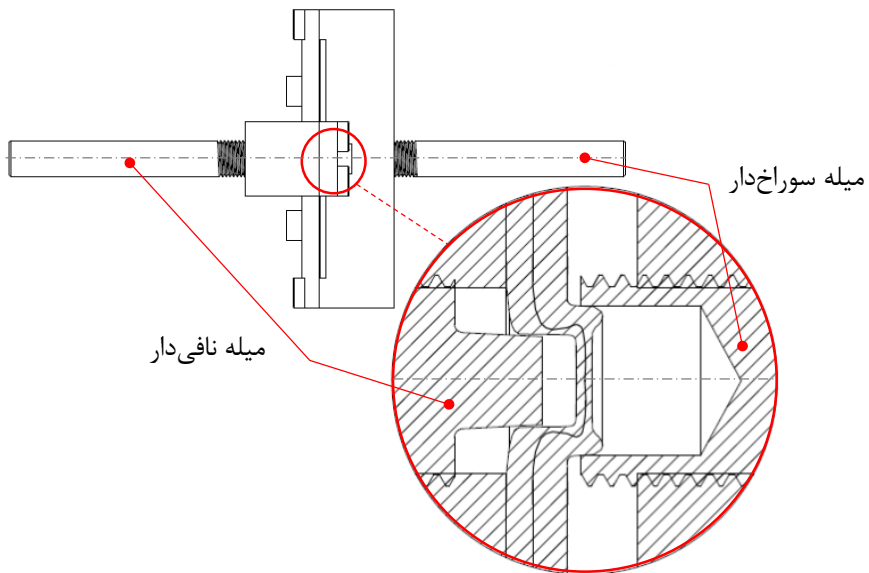
شکل ۳-۸: اتصال ورق‌ها به هم برای انجام آزمون استحکام کششی اتصال سرد



شکل ۳-۹: دستگاه سایه‌نگار برای اندازه‌گیری پارامترهای مقطع اتصال سرد



شکل ۳-۱۰: قید و بند طراحی شده برای انجام آزمون استحکام کششی اتصال سرد

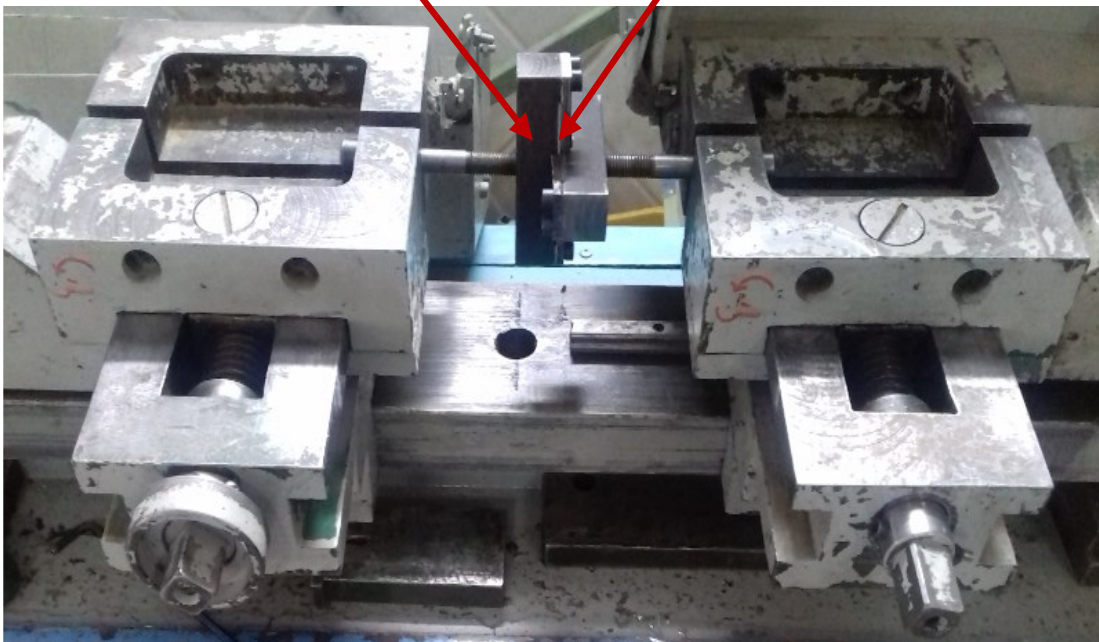


شکل ۳-۱۱: ساز و کار طراحی شده برای همراستایی نیرو و محور اتصال سرد



قید و بند

نمونه اتصال سرد



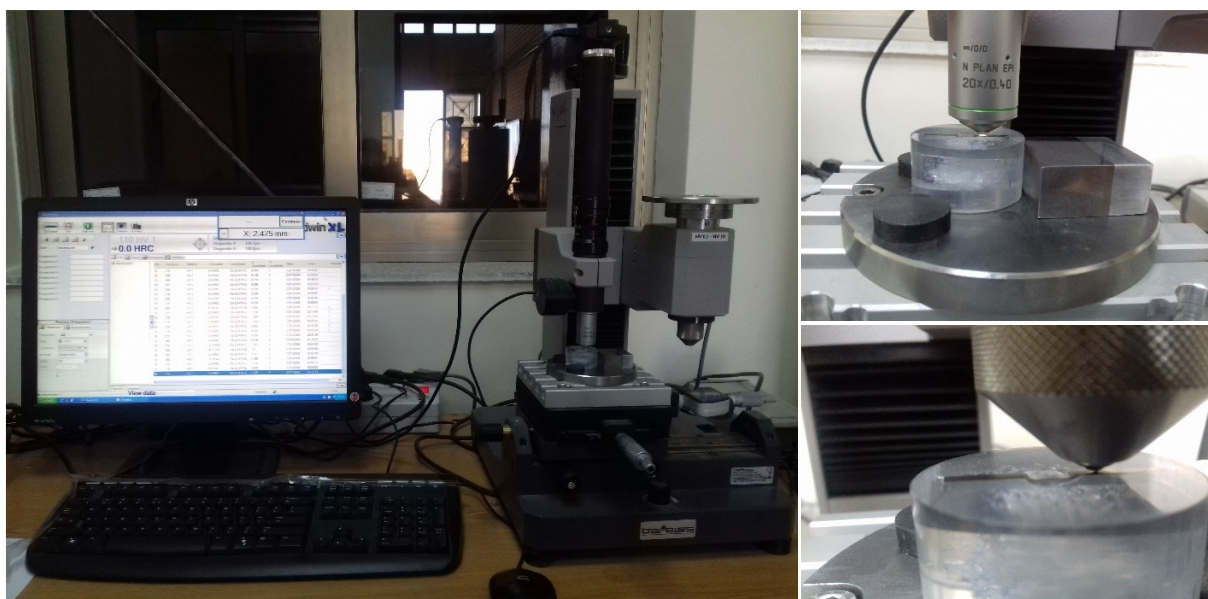
شکل ۳-۱۲: آزمون کشش برای اندازه‌گیری استحکام اتصال سرد

۳-۵- آزمون سختی سنجی

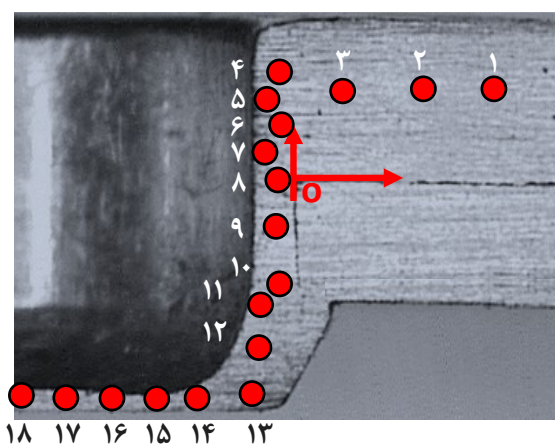
برای سختی سنجی ناحیه اتصال با توجه به ضخامت کم آن از دستگاه ریز سختی سنجی ویکرز باریس مطابق شکل ۳-۱۳ استفاده شد. آزمون ریزسختی ویکرز^۱، از متداول ترین آزمون های ریز سختی سنجی است. اصول روش آزمایش ریزسختی ویکرز مانند آزمون ویکرز استاندارد است با این تفاوت که به جای نیروی فرورونده چند کیلوگرمی، نیروها در حد گرم است. این آزمون با استفاده از میکروسکوپ متالورژیکی که برای این کار طراحی شده، انجام می شود. ابزار فرورونده، الماس هرمی شکل کوچک با قاعده مربع است. این ابزار روی مخروطی با نوک عدسی شکل مخصوص، جاسازی شده است.

برای انجام آزمون سطح نمونه آزمایش، باید پرداخت و بسیار براق باشد. برای همین مطابق شکل ۳-۱ از نمونه‌ی مانده که برای آزمون ساختارسنجی آماده سازی شده بود، استفاده شد. برای سختی سنجی، روش HV1 در نظر گرفته شد. برای همین از وزنه‌های استاندارد مخصوص با مجموع وزن ۱ Kg استفاده شد. نمونه روی میز دستگاه توسط چند آهن ربا ثابت شد. عدسی دستگاه روی دانه های مجزای ماده با استفاده از میکروسکوپ با درشت‌نمایی بالا، تنظیم و متمرکز شد. نقطه‌ی O روی نمونه به عنوان نقطه مبداء مطابق شکل ۳-۱۴ انتخاب شد. نقاط دیگر روی نمونه در راستای X و Y با استفاده از ریزسنج‌های متصل به میز دستگاه، از مبداء، مشخص شد. عدسی دستگاه روی هر نقطه بعد از تعیین مختصات توسط میکروسکوپ، متمرکز شد. بعد از وضوح تصویر، میز دستگاه به سمت الماس فرورونده هدایت شد. با شروع سختی سنجی، الماس هرمی به شکل خودکار در داخل قطعه نفوذ کرد. به مدت ۱۰ ثانیه در انتهای کورس پایین، فرورونده متوقف شد تا اثر مربعی شکل تشکیل شود. میز دستگاه دوباره به سمت میکروسکوپ، هدایت شده و مطابق شکل ۳-۱۵ با خطوط مماس شونده، قطرهای اثر مربعی شکل هرم فرورونده به صورت خودکار اندازه گیری شده و سختی آن نقطه ثبت و ذخیره شد. به همین ترتیب سختی نقاط دیگر نمونه، اندازه گیری شد.

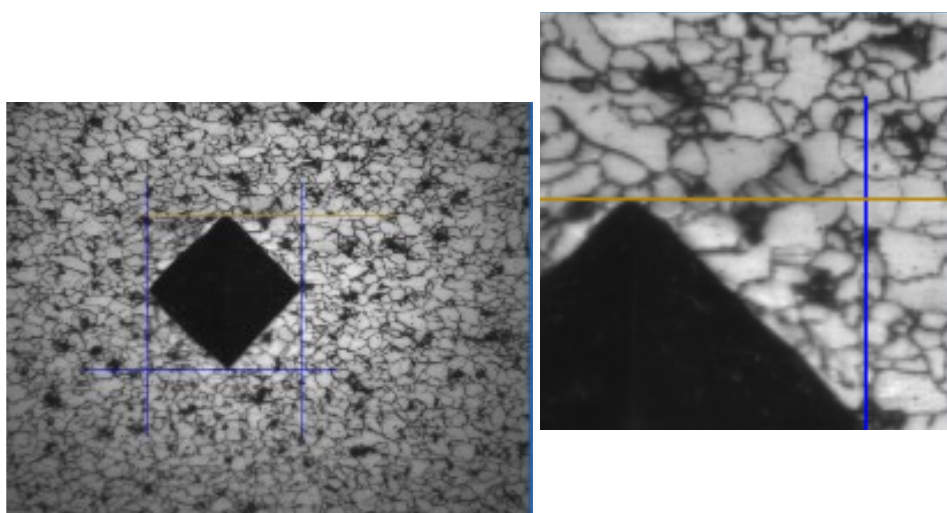
^۱ Vickers Microhardness



شکل ۳-۱۳: دستگاه ریز سختی سنج ویکرز باریس



شکل ۳-۱۴: نقاط روی نمونه جهت انجام آزمون ریز سختی سنجی



شکل ۳-۱۵: تنظیم خطوط مماسی برای اندازه‌گیری قطرهای اثر ابزار ریز سختی سنج

فصل ۴ نتایج و بحث

در این فصل ابتدا به بررسی نتایج خواص ورق‌های مورد استفاده پرداخته شده است. نتایج مربوط به آزمون‌های مطالعات پارامتریک المان محدود و آزمون تجربی فرآیند اتصال سرد ارائه شده است. سپس نتایج طراحی آزمایش متعامد و تحلیل المان محدود برای تعیین استحکام اتصال برای هر آزمایش، آورده شده است. بر اساس نتایج طراحی آزمایش متعامد، وابستگی بین استحکام اتصال سرد و هر پارامتر بررسی و پارامترهای طراحی ابزار به ترتیب اهمیت رده‌بندی شد. نتایج تجربی به صورت عددی، گرافیکی و نمودار با نتایج المان محدود مقایسه شده است. در پایان فصل نتایج سختی‌سنجی و ریزساختار بررسی می‌شود.

۴-۱- نتایج مطالعه خواص ورق‌ها

نتایج خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی ورق‌ها، بر اساس آزمون کششی تک‌محوره استاندارد و برگه مشخصات ارائه شده توسط تولیدکنندگان، در جدول ۴-۱ و جدول ۴-۲ نشان داده شده است. مطابق این جدول‌ها استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی ورق DOCOL 1400M نسبت به ورق DX51D بسیار بالا، و تغییر طول نسبی آن کم می‌باشد.

نتایج حاصل از مطالعه ساختار سنجی اتصال ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، که بر روی نمونه مانع شده در آزمایشگاه انجام شد نشان داد که، مطابق شکل ۴-۱ ریزساختار ورق فولادی DX51D، فریتی به همراه نواحی کوچک پرلیت می‌باشد. برای همین این ورق از شکل‌پذیری خوبی برخوردار بوده و در اتصال سرد

سوراخ‌دار، به عنوان ورق بالایی که تغییرشکل زیادی دارد، مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۴-۲ ریزساختار ورق فولادی استحکام بالا، مارتنزیت تمپر شده همراه مقادیر کمی فریت و نواحی بینیت می‌باشد. به دلیل ساختار مارتنزیت، ورق استحکام بالایی داشته و شکل‌پذیری پایینی دارد. برای همین لازم است این ورق، به عنوان ورق پایینی در فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار استفاده شود.

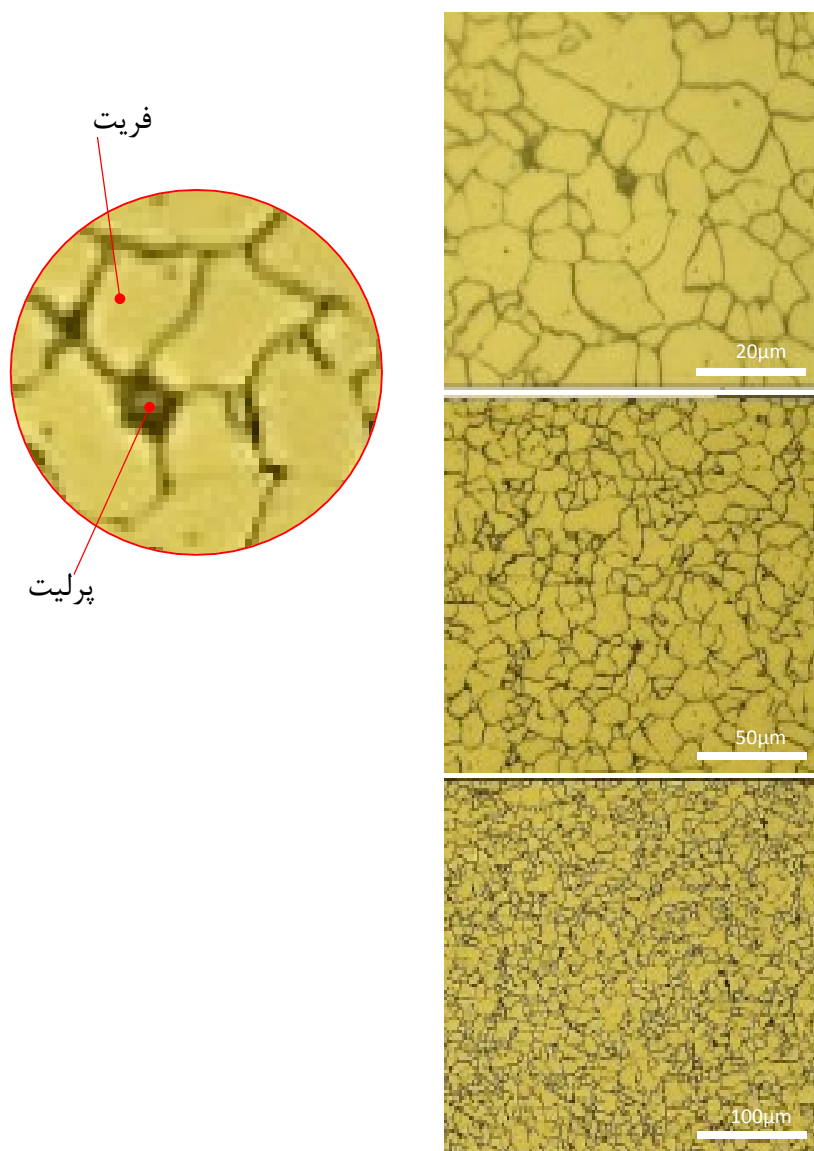
منحنی تنش- کرنش مهندسی و منحنی تنش حقیقی-کرنش مومسان، مربوط به ورق‌های مورد استفاده، مطابق شکل ۴-۳ و شکل ۴-۴ از نتایج آزمون کشش استاندارد تک‌محوره استخراج شد. برای اطمینان از استخراج درست این منحنی، آزمون کشش بر اساس مدل‌سازی انجام شده در فصل ۲ در یک تحلیل استاتیکی با حل‌گر ضمنی آباکوس شبیه‌سازی شد. نتایج سازگاری قابل قبولی را نشان داد.

جدول ۴-۱: خواص مکانیکی ورق DX51D و DOCOL 1400M

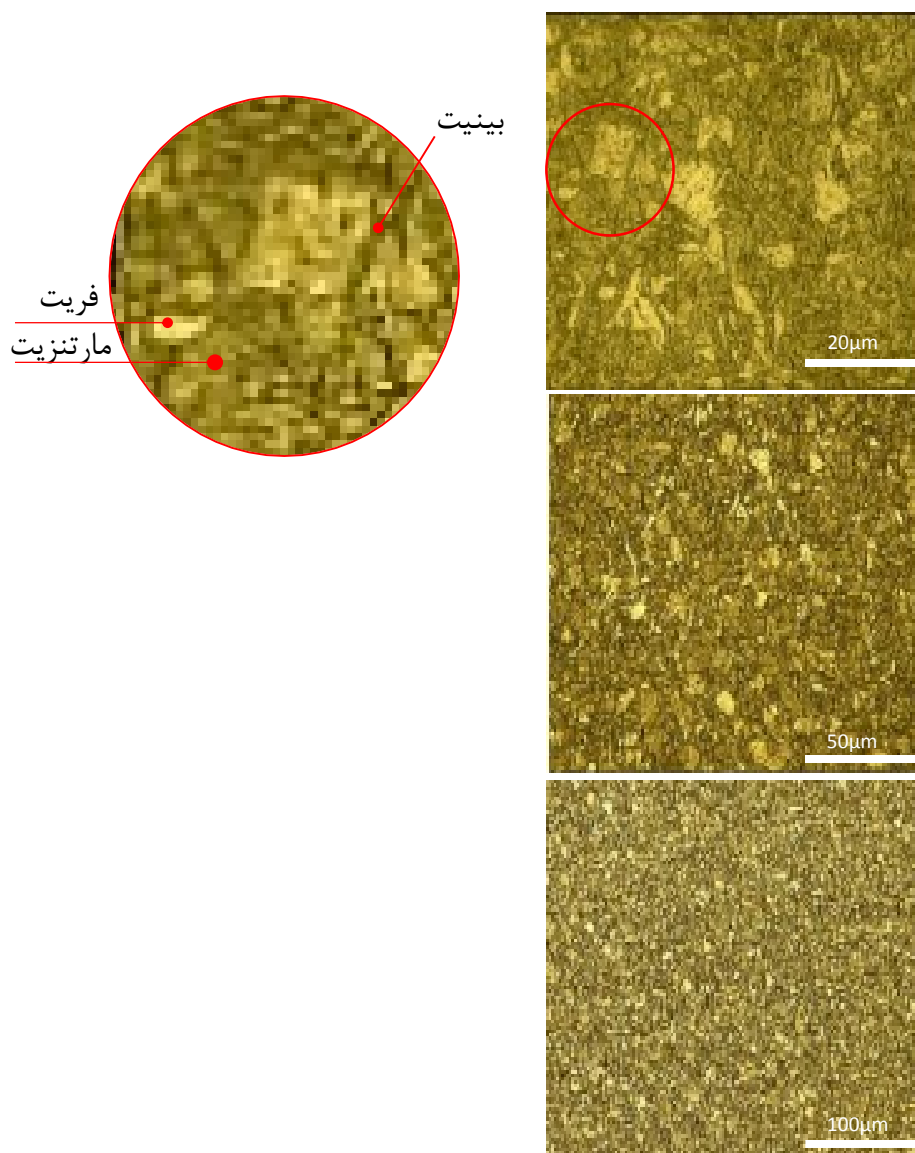
| ماده | مدول یانگ E (GPa) | نسبت پواسون ν | چگالی ρ (g/cm ³) | تنش تسلیم (MPa) | استحکام کششی نهایی (MPa) | تغییر طول نسبی (%) |
|----------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------|
| DX51D | ۲۱۰ | ۰/۳ | ۷/۸۵ | ۲۷۹/۵ | ۴۱۸/۹ | ۴۰ |
| DOCOL 1400M | ۲۳۰ | ۰/۳ | ۷/۸۵ | ۱۱۲۴/۸ | ۱۴۸۸/۸ | ۳ |

جدول ۴-۲: ترکیب شیمیایی ورق DX51D و DOCOL 1400M

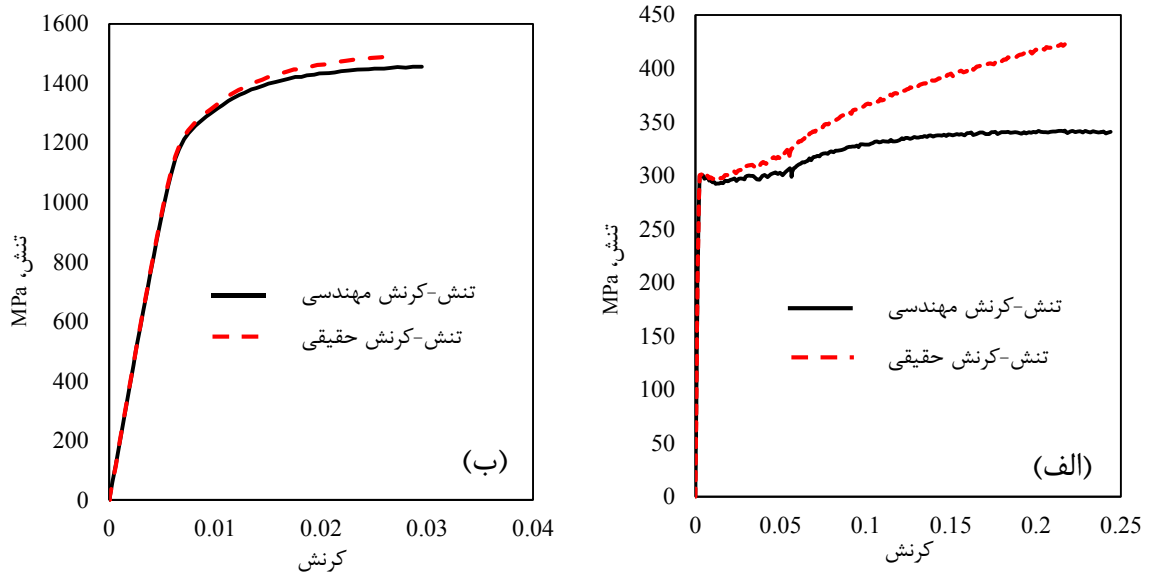
| ماده | Al | S | P | Mn | Si | C | Nb+Ti |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| DX51D | ۰/۰۵۸۸ | ۰/۰۰۴۲ | ۰/۰۰۷۹ | ۰/۲۳۶۵ | ۰/۰۱۱۱ | ۰/۰۳۸۲ | - |
| DOCOL 1400M | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۱۰ | ۰/۰۲۰ | ۱/۶۰ | ۰/۴۰ | ۰/۲۰ | ۰/۱۰ |



شکل ۴-۱: تصاویر ریزساختار ورق فولادی گالوانیزه DX51D

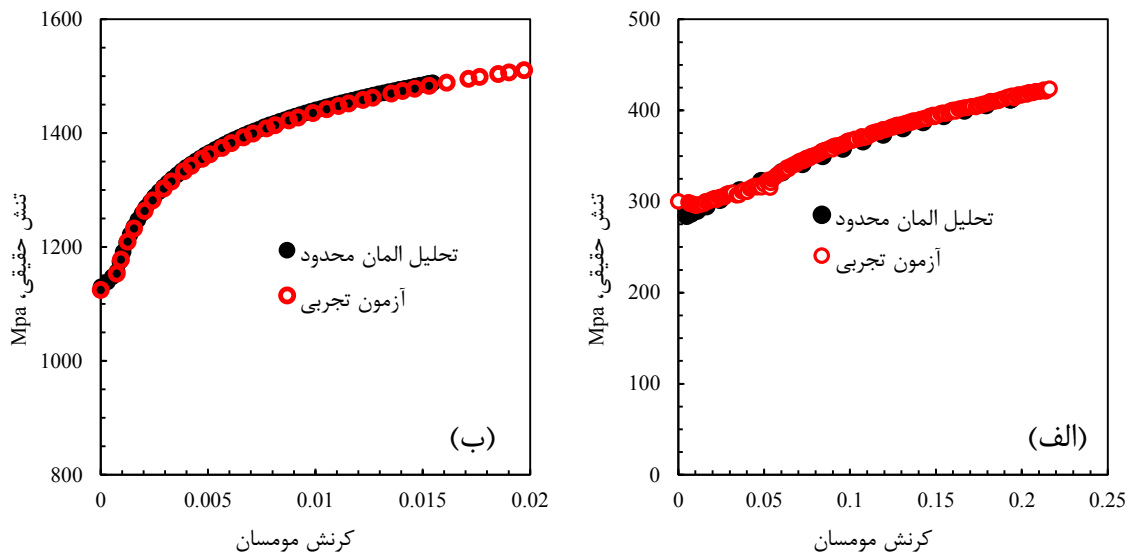


شکل ۴-۲: تصاویر ریزساختار ورق DOCOL 1400M



شکل ۳-۴: منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش تک محوره برای الف) ورق DX51D و ب) ورق DOCOL

1400M



شکل ۴-۴: منحنی تنش حقیقی-کرنش مومسان استخراج شده از تحلیل المان محدود و نتایج حاصل از آزمون

کشش استاندارد تک محوره در آزمایشگاه الف) ورق DX51D و ب) ورق DOCOL 1400M

۲-۴- نتایج طراحی آزمایش متعامد

در این بخش بر اساس آزمایش‌های طراحی شده و استفاده از ابزار مطالعات پارامتریک نرم افزار آباکوس، بهینه‌سازی پارامترهای طراحی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار و اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب ثابت شیب‌دار بررسی و نتایج هندسه بهینه ابزار استخراج شد.

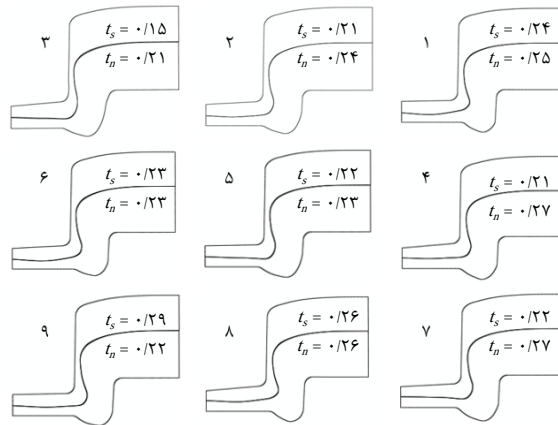
۱-۲-۴- نتایج طراحی آزمایش متعامد اتصال سرد با قالب ثابت شیاردار

نتایج مطالعات پارامتریک آزمایش‌های متعامد طراحی شده برای اتصال ورق‌های DX51D/DX51D، در جدول ۳-۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۵ و جدول ۴-۳، کمینه استحکام کششی اتصال مربوط به آزمون شماره ۳ است که ضخامت تورفتگی و گلوپی کمتری داشته و بیشینه استحکام کششی مربوط به آزمون‌های شماره ۷ و ۸ است که در آنها ضخامت تورفتگی یا گلوپی بیشتری دیده می‌شود. نتایج استحکام به دست آمده از شبیه‌سازی آزمون‌ها بر اساس مطالعات پارامتریک با نرم‌افزار آباکوس، وارد نرم‌افزار مینی‌تب شد.

جدول ۳-۴: طراحی آزمایش متعامد برای تعیین هندسه بهینه ابزار اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D و

استحکام اتصال به دست آمده از مطالعات پارامتریک آزمایش‌ها

| شماره آزمایش | شعاع سنبه R_p (mm) | عمق قالب P_m (mm) | عرض شیار قالب L_m (mm) | زاویه کف سنبه P_{BA} (°) | استحکام اتصال F (N) |
|-----------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| ۱ | ۲/۴ | ۱/۴ | ۱/۲ | ۱ | ۱۸۶۵ |
| ۲ | ۲/۴ | ۱/۵ | ۱/۴ | ۳ | ۱۶۳۶ |
| ۳ | ۲/۴ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۵ | ۱۳۸۴ |
| ۴ | ۲/۵ | ۱/۴ | ۱/۴ | ۵ | ۱۹۰۱ |
| ۵ | ۲/۵ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱ | ۱۸۴۹ |
| ۶ | ۲/۵ | ۱/۶ | ۱/۲ | ۳ | ۱۸۱۸ |
| ۷ | ۲/۶ | ۱/۴ | ۱/۶ | ۳ | ۲۱۲۵ |
| ۸ | ۲/۶ | ۱/۵ | ۱/۲ | ۵ | ۲۱۹۵ |
| ۹ | ۲/۶ | ۱/۶ | ۱/۴ | ۱ | ۱۹۳۳ |



شکل ۴-۵: مقایسه هندسه اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D حاصل از شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای

طراحی آزمایش متعامد و شماره آزمون مطابق جدول ۴-۳

برای پیدا کردن اهمیت نسبی پارامترها بر روی هر کدام از خروجی‌ها، از تکنیک آماری تحلیل واریانس استفاده شد. مطابق جدول ۴-۴ آزمون F نشان دهنده میزان تاثیر پارامترهای آزمایش، در سطح اطمینان مورد نظر است. برای پارامترهای با پراکندگی بالا، تغییراتی کوچک باعث تاثیر زیادی بر پاسخ می‌شود. P-Value در جدول نشان دهنده‌ی ارزش احتمال^۱ می‌باشد. بر این اساس شعاع سنبه R_p ، اهمیت زیادی بر پاسخ دارد ($P\text{-Value} < 0.05$) و سایر پارامترها اهمیت کمتری بر پاسخ دارند ($P\text{-Value} > 0.05$).

جدول ۴-۴: نتایج تحلیل واریانس داده‌ها برای هر پارامتر در فرایند اتصال ورق‌های DX51D/DX51D

| P-Value | پراکندگی نسبی (F) | میانگین مربعات (MS) | مجموع مربعات (SS) | درجه آزادی (DF) | R-Sq (%) | پارامترهای فرآیند |
|---------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------|----------|------------------------|
| 0.037 | 5/99 | 155952 | 311904 | 2 | 6/65 | شعاع سنبه R_p |
| 0.480 | 0/83 | 50727 | 101454 | 2 | 2/68 | عمق قالب P_m |
| 0.713 | 0/36 | 24967 | 49934 | 2 | 1/67 | عرض شیار قالب L_m |
| 0.970 | 0/03 | 2351 | 4702 | 2 | 1 | زاویه کف سنبه P_{BA} |

پس از تحلیل نتایج آزمون‌ها و داده‌های جدول ۴-۳ رده‌بندی پارامترهای موثر در فرایند اتصال بر اساس میانگین و سیگنال به نویز پارامترها، به ترتیب مطابق جدول ۴-۵ و جدول ۴-۶ انجام شد. نرم‌افزار مینی‌تب بر اساس میانگین استحکام اتصال و سیگنال به نویز در هر سطح از چهار پارامتر اصلی، میزان اختلاف (Delta)

^۱ Probability Value

مقدار بیشینه و کمینه هر پارامتر را محاسبه و آنها را بر اساس این اختلاف رده‌بندی (Rank) می‌کند. هرچه میزان این اختلاف بیشتر باشد، پارامتر مربوطه تاثیر بیشتری در متغیر هدف (استحکام اتصال) دارد. مطابق جدول ۴-۵ شعاع سنبه R_p ، عمق حفره‌ی قالب P_m و عرض شیار کف قالب L_m ، به ترتیب، تاثیر بیشتر و زاویه کف سنبه P_{BA} ، تاثیر کمتری بر استحکام اتصال دارد.

نتایج طراحی آزمایش متعامد ورق‌های DX51D/DX51D، با نتایج مطالعه‌ی راکس و همکارانش [۹]، که پارامترهای ابزار اتصال سرد با قالب ثابت را به ترتیب تاثیرگذاری بر استحکام اتصال، رده‌بندی کردند کاملاً منطبق می‌باشد. آنها نشان دادند که شعاع سنبه R_p ، عمق قالب P_m و عرض شیار کف قالب L_m ، به ترتیب، بیشترین تاثیر و زاویه کف سنبه P_{BA} ، کمترین تاثیر را بر استحکام اتصال دارد.

وابستگی بین استحکام اتصال سرد و هر پارامتر در سه سطح بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب، مطابق نمودارهای شکل ۴-۶ می‌باشد. نقاط روی نمودار، میانگین مقدار استحکام اتصال مربوط به هر پارامتر در سطح است. مقدار سطح مربوط به بیشترین استحکام اتصال در هر پارامتر، مقدار بهینه آن پارامتر می‌باشد. همچنین مقادیر سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در شکل ۴-۷ آمده است. بر اساس مقادیر بیشینه سیگنال به نویز برای هر سطح، مطابق جدول ۴-۷، شعاع سنبه R_p ، در سطح سوم و عمق حفره قالب P_m ، عرض شیار کف قالب L_m و زاویه کف سنبه P_{BA} ، در سطح اول، ترکیب بهینه پارامترهای ابزار اتصال سرد را تشکیل می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی المان محدود استحکام کششی اتصال ورق‌های DX51D/DX51D بر اساس پارامترهای بهینه هندسه ابزار حاصل از روش آزمایش متعامد مطابق شکل ۴-۸ بدست آمد.

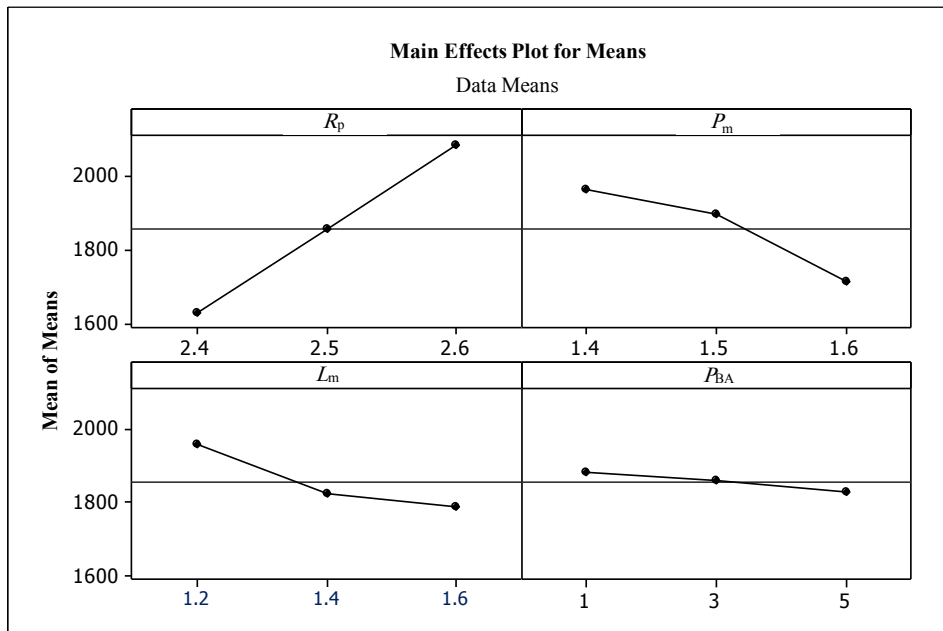
جدول ۴-۵: نتایج تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب بر اساس میانگین اصلی پارامترهای موثر در اتصال DX51D/DX51D

| Response Table for Means | | | | |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| سطح | شعاع سنبه R_p (mm) | عمق قالب P_m (mm) | عرض شیار قالب L_m (mm) | زاویه کف سنبه P_{BA} (°) |
| ۱ | ۱۶۲۸ | ۱۹۶۴ | ۱۹۵۹ | ۱۸۸۲ |
| ۲ | ۱۸۵۶ | ۱۸۹۳ | ۱۸۲۳ | ۱۸۶۰ |
| ۳ | ۲۰۸۴ | ۱۷۱۲ | ۱۷۸۶ | ۱۸۲۷ |
| Delta | ۴۵۶ | ۲۵۲ | ۱۷۳ | ۵۶ |
| Rank | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |

جدول ۴-۶: نتایج تحلیل نرم افزار مینی تب بر اساس سیگنال به نویز پارامترهای موثر در فرایند اتصال ورق های

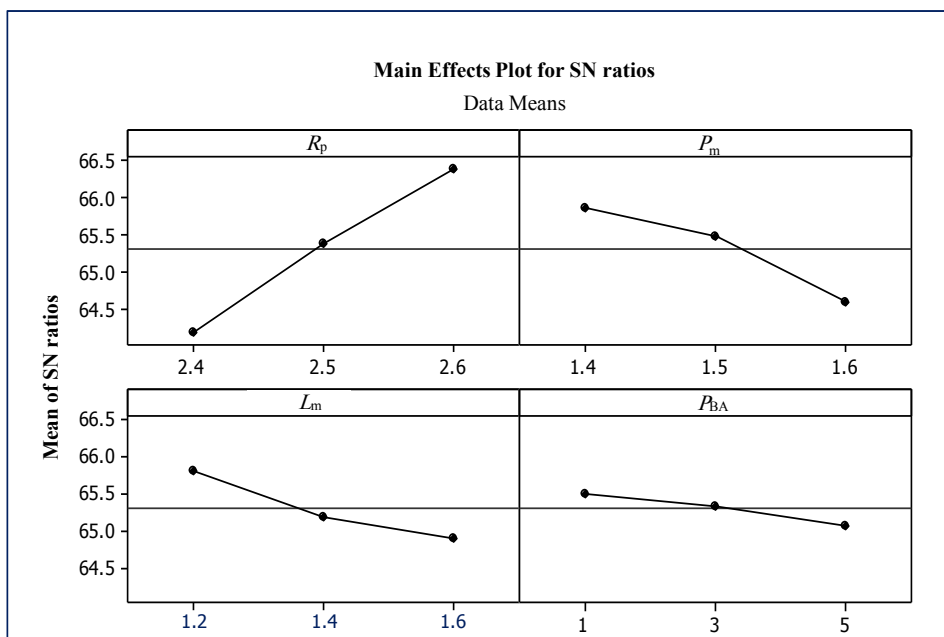
DX51D/DX51D

| Response Table for Signal to Noise Ratios | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Larger is better | | | | |
| سطح | شعاع سنبه R_p (mm) | عمق قالب P_m (mm) | عرض شیار قالب L_m (mm) | زاویه کف سنبه P_{BA} (°) |
| ۱ | ۶۴/۱۷ | ۶۵/۸۵ | ۶۵/۸۱ | ۶۵/۴۹ |
| ۲ | ۶۵/۳۷ | ۶۵/۴۸ | ۶۵/۱۹ | ۶۵/۳۴ |
| ۳ | ۶۶/۳۷ | ۶۴/۵۸ | ۶۴/۹۰ | ۶۵/۰۸ |
| Delta | ۲/۲۰ | ۱/۲۷ | ۰/۹۱ | ۰/۴۲ |
| Rank | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |



شکل ۴-۶: وابستگی بین استحکام اتصال سرد ورق های DX51D/DX51D و هر پارامتر در سه سطح بر اساس

نتایج حاصل از تحلیل نرم افزار مینی تب مطابق آزمون ها و داده های جدول ۴-۳

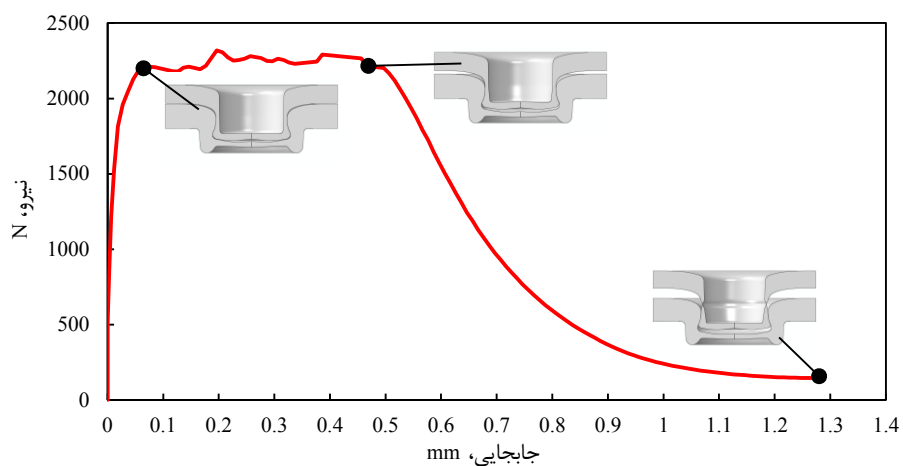


شکل ۴-۷: مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف پارامترهای اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D

جدول ۴-۷: مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D بر اساس تحلیل نرم‌افزار

مینی تب به روش طراحی آزمایش متعامد

| شعاع سنبه R_p (mm) | عمق قالب P_m (mm) | عرض شیار قالب L_m (mm) | زاویه کف سنبه P_{BA} (°) |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| ۲/۶ | ۱/۴ | ۱/۲ | ۱° |



شکل ۴-۸: نتایج شبیه‌سازی المان محدود استحکام کششی ورق‌های DX51D/DX51D بر اساس پارامترهای

هندسه بهینه ابزار

۴-۲-۲- نتایج طراحی آزمایش متعامد اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M

نتایج مطالعات پارامتریک آزمایش‌های متعامد طراحی‌شده اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، در جدول ۴-۸ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۹ و جدول ۴-۸، کمینه استحکام کششی اتصال مربوط به آزمون شماره ۲۳ است که ضخامت تورفتگی در آن ایجاد نشده است و بیشینه استحکام کششی مربوط به آزمون شماره ۱۳ است که در آن ضخامت و هندسه‌ی تورفتگی و ضخامت گلوبی متناسب است. نتایج استحکام به دست آمده از شبیه‌سازی آزمون‌ها بر اساس مطالعات پارامتریک با نرم‌افزار آباکوس، وارد نرم‌افزار مینی‌تب شد. بر اساس تحلیل واریانس مطابق جدول ۴-۹ شعاع سنبه R_p و شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، اهمیت زیادی بر پاسخ داشته ($P\text{-Value} < 0.05$) و سایر پارامترها اهمیت کمتری بر پاسخ دارد ($P\text{-Value} > 0.05$).

پس از تحلیل نتایج آزمون‌ها و داده‌های جدول ۴-۸، رده‌بندی پارامترهای موثر در فرایند اتصال بر اساس میانگین و سیگنال به نویز پارامترها، به ترتیب مطابق جدول ۴-۱۰ و جدول ۴-۱۱ انجام شد. نرم‌افزار مینی‌تب بر اساس میانگین استحکام اتصال و سیگنال به نویز در هر سطح از شش پارامتر اصلی، میزان اختلاف (Δ) مقدار بیشینه و کمینه هر پارامتر را محاسبه و آنها را بر اساس این اختلاف رده‌بندی ($Rank$) می‌کند. هرچه میزان این اختلاف بیشتر باشد، پارامتر مربوطه تاثیر بیشتری در متغیر هدف (استحکام اتصال) دارد. مطابق جدول ۴-۱۰ شعاع سنبه R_p ، شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، و عمق حفره‌ی قالب P_m ، به ترتیب، تاثیر بیشتر و زاویه دیواره سنبه APW تاثیر کمتری بر استحکام اتصال دارد.

وابستگی بین استحکام اتصال سرد سوراخ‌دار و هر پارامتر در سه سطح بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب، مطابق نمودارهای شکل ۴-۱۰ می‌باشد. نقاط روی نمودار، میانگین مقدار استحکام اتصال مربوط به هر پارامتر در سطح است. مقدار سطح مربوط به بیشترین استحکام اتصال در هر پارامتر، مقدار بهینه آن پارامتر می‌باشد. بر این اساس مطابق جدول ۴-۱۲، مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار بر اساس تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب به روش طراحی آزمایش متعامد، شعاع سنبه R_p ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، در سطح سوم، شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، در سطح اول، و زاویه دیواره سنبه APW ، در سطح دوم، ترکیب بهینه پارامترهای ابزار اتصال سرد سوراخ‌دار را تشکیل می‌دهد.

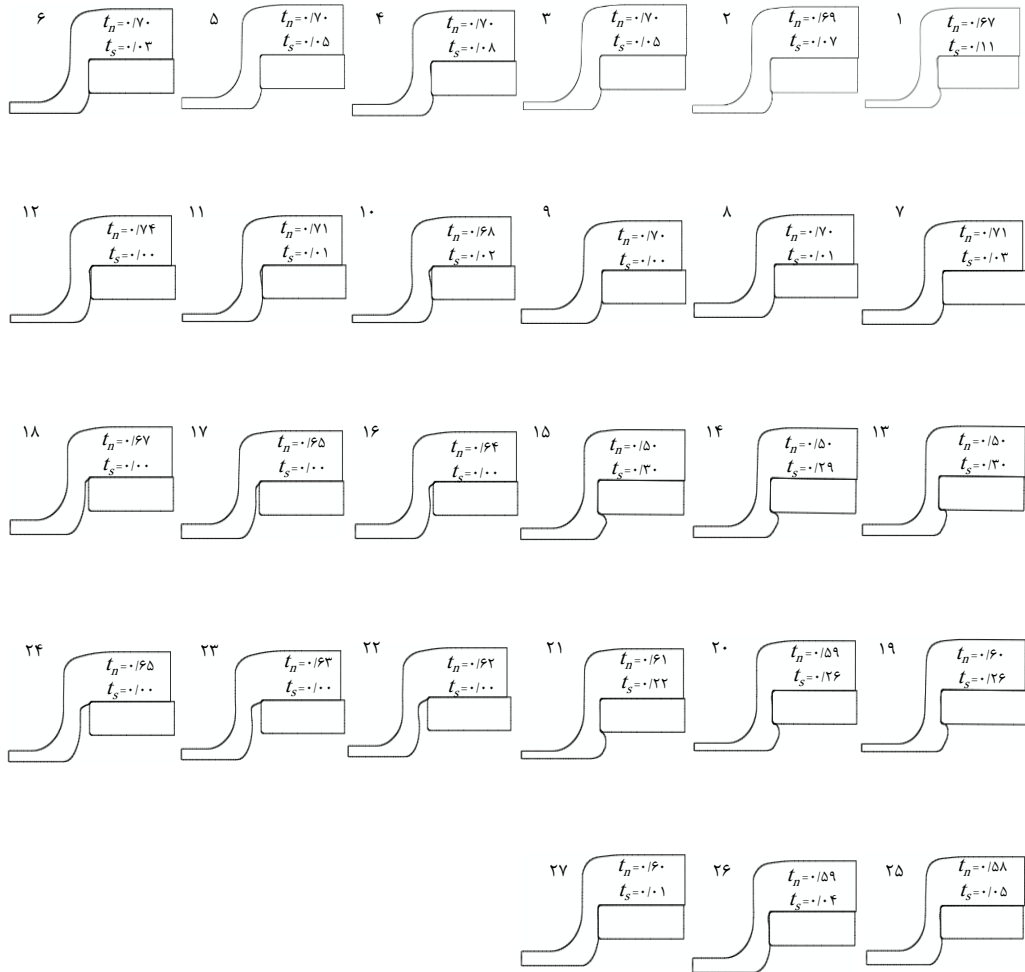
همچنین مقادیر سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در شکل ۴-۱۱ آمده است. به جزء پارامتر عمق حفره‌ی قالب P_m که در این شکل در سطح اول بهینه شده است سایر سطوح بهینه پارامترها نتایج یکسانی داشت. برای همین تحلیل المان محدود ترکیب بهینه با هر دو سطح پارامتر P_m انجام شد و با توجه به استحکام کششی اتصال بیشتر P_m در سطح سوم مقدار $0/8$ به عن.ان مقدار بهینه برای پارامتر عمق حفره قالب در نظر گرفته شد.

نتایج شبیه‌سازی المان محدود استحکام کششی اتصال ورق‌های DX51D/DOCOL بر اساس پارامترهای بهینه هندسه ابزار حاصل از روش آزمایش متعامد مطابق شکل ۴-۱۲ بدست آمد.

جدول ۴-۸: طراحی آزمایش متعامد برای بهینه‌سازی ابزار و فرآیند اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL

1400M با قالب شیب‌دار و استحکام اتصال به دست آمده از مطالعات پارامتریک آزمایش‌ها

| شماره آزمایش | P_m (mm) | X (mm) | R_p (mm) | R_{PH} (mm) | R_{PF} (mm) | A_{PW} (°) | F (N) |
|-----------------|---------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|------------|
| ۱ | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۲/۲ | ۲/۹ | ۱/۰ | ۰ | ۲۱۵۹ |
| ۲ | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۲/۲ | ۲/۹ | ۱/۱ | ۱ | ۲۱۰۳ |
| ۳ | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۲/۲ | ۲/۹ | ۱/۲ | ۲ | ۱۵۸۸ |
| ۴ | ۰/۶ | ۰/۳۵ | ۲/۳ | ۳/۰ | ۱/۰ | ۰ | ۱۸۹۸ |
| ۵ | ۰/۶ | ۰/۳۵ | ۲/۳ | ۳/۰ | ۱/۱ | ۱ | ۱۷۲۱ |
| ۶ | ۰/۶ | ۰/۳۵ | ۲/۳ | ۳/۰ | ۱/۲ | ۲ | ۱۱۷۷ |
| ۷ | ۰/۶ | ۰/۴۵ | ۲/۴ | ۳/۱ | ۱/۰ | ۰ | ۱۶۰۲ |
| ۸ | ۰/۶ | ۰/۴۵ | ۲/۴ | ۳/۱ | ۱/۱ | ۱ | ۸۶۲ |
| ۹ | ۰/۶ | ۰/۴۵ | ۲/۴ | ۳/۱ | ۱/۲ | ۲ | ۴۹۰ |
| ۱۰ | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۲/۳ | ۳/۱ | ۱/۰ | ۱ | ۱۴۶۸ |
| ۱۱ | ۰/۷ | ۰/۲۵ | ۲/۳ | ۳/۱ | ۱/۱ | ۲ | ۸۵۷ |
| ۱۲ | ۰/۷ | ۰/۲۵ | ۲/۳ | ۳/۱ | ۱/۲ | ۰ | ۱۶۰ |
| ۱۳ | ۰/۷ | ۰/۳۵ | ۲/۴ | ۲/۹ | ۱/۰ | ۱ | ۳۰۵۵ |
| ۱۴ | ۰/۷ | ۰/۳۵ | ۲/۴ | ۲/۹ | ۱/۱ | ۲ | ۲۵۲۸ |
| ۱۵ | ۰/۷ | ۰/۳۵ | ۲/۴ | ۲/۹ | ۱/۲ | ۰ | ۲۹۸۵ |
| ۱۶ | ۰/۷ | ۰/۴۵ | ۲/۲ | ۳/۰ | ۱/۰ | ۱ | ۱۶۴ |
| ۱۷ | ۰/۷ | ۰/۴۵ | ۲/۲ | ۳/۰ | ۱/۱ | ۲ | ۱۶۹ |
| ۱۸ | ۰/۷ | ۰/۴۵ | ۲/۲ | ۳/۰ | ۱/۲ | ۰ | ۱۵۶ |
| ۱۹ | ۰/۸ | ۰/۲۵ | ۲/۴ | ۳/۰ | ۱/۰ | ۲ | ۳۰۵۴ |
| ۲۰ | ۰/۸ | ۰/۲۵ | ۲/۴ | ۳/۰ | ۱/۱ | ۰ | ۳۲۹۴ |
| ۲۱ | ۰/۸ | ۰/۲۵ | ۲/۴ | ۳/۰ | ۱/۲ | ۱ | ۳۱۶۹ |
| ۲۲ | ۰/۸ | ۰/۳۵ | ۲/۲ | ۳/۱ | ۱/۰ | ۲ | ۱۶۸ |
| ۲۳ | ۰/۸ | ۰/۳۵ | ۲/۲ | ۳/۱ | ۱/۱ | ۰ | ۱۲۴ |
| ۲۴ | ۰/۸ | ۰/۳۵ | ۲/۲ | ۳/۱ | ۱/۲ | ۱ | ۱۵۱ |
| ۲۵ | ۰/۸ | ۰/۴۵ | ۲/۳ | ۲/۹ | ۱/۰ | ۲ | ۱۶۸۲ |
| ۲۶ | ۰/۸ | ۰/۴۵ | ۲/۳ | ۲/۹ | ۱/۱ | ۰ | ۱۲۱۲ |
| ۲۷ | ۰/۸ | ۰/۴۵ | ۲/۳ | ۲/۹ | ۱/۲ | ۱ | ۱۰۷۷ |



شکل ۴-۹: مقایسه هندسه اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار حاصل از شبیه‌سازی بر

اساس پارامترهای طراحی آزمایش متعامد و شماره آزمون مطابق جدول ۴-۸

جدول ۴-۹: نتایج تحلیل واریانس داده‌ها برای هر پارامتر در فرایند اتصال ورق‌های DX51D/ DOCOL 1400M

| P-Value | پراکندگی نسبی (F) | میانگین مربعات (MS) | مجموع مربعات (SS) | درجه آزادی (DF) | R-Sq (%) | پارامترهای فرآیند |
|---------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------|----------|-------------------|
| ۰/۸۶۱ | ۰/۱۵ | ۱۸۶۱۵۳ | ۳۷۲۳۰۵ | ۲ | ۱۶/۲۴ | P_m |
| ۰/۰۶۳ | ۳/۱۱ | ۳۰۷۷۴۸۷ | ۶۱۵۴۹۷۵ | ۲ | ۲۰/۵۶ | X |
| ۰/۰۰۲ | ۷/۸۳ | ۵۹۰۷۹۳۲ | ۱۱۸۱۵۸۶۴ | ۲ | ۳۹/۴۷ | R_p |
| ۰/۰۱۲ | ۵/۳۴ | ۴۶۰۸۴۸۲ | ۹۲۱۶۹۶۴ | ۲ | ۳۰/۷۹ | R_{PH} |
| ۰/۶۵۷ | ۰/۴۳ | ۵۱۴۸۸۰ | ۱۰۲۹۷۵۹ | ۲ | ۳/۴۴ | R_{PF} |
| ۰/۸۹۰ | ۰/۱۲ | ۱۴۴۲۰۰ | ۲۸۸۳۹۹ | ۲ | ۰/۹۶ | APW |

جدول ۴-۱۰: نتایج تحلیل نرم افزار مینی تب برای رده بندی پارامترهای موثر در فرآیند اتصال سرد ورق های

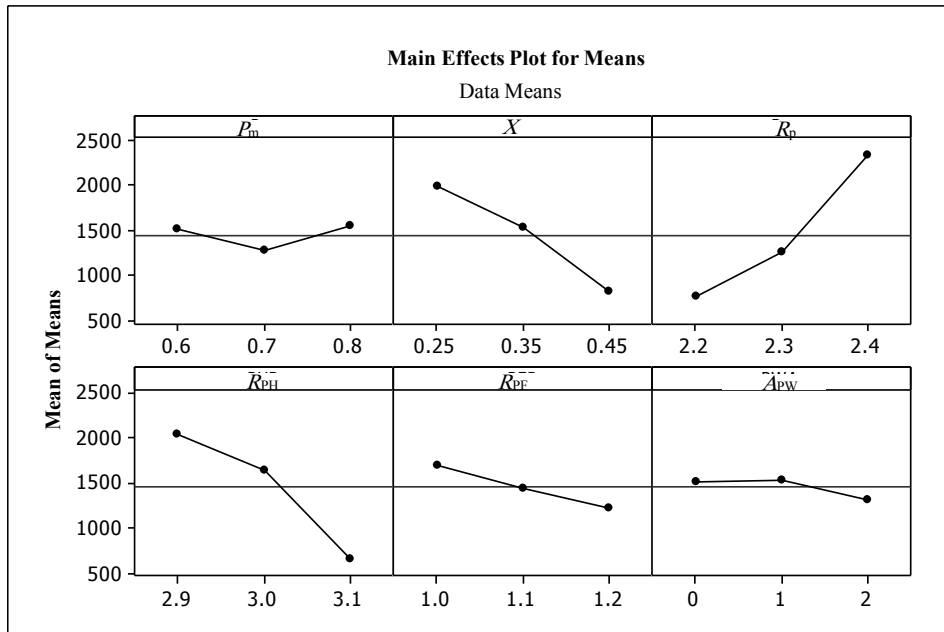
DX51D/DOCOL 1400M استحکام بالا با قالب شیب دار

| Response Table for Means | | | | | | |
|--------------------------|------------------|------------------|---------------|-------------|---------------|-------|
| A_{PW} (°) | R_{PF} (mm) | R_{PH} (mm) | R_p (mm) | X (mm) | P_m (mm) | سطح |
| ۱۵۱۰ | ۱۶۹۴/۴ | ۲۰۴۳/۲ | ۷۵۳/۶ | ۱۹۸۳/۶ | ۱۵۱۱/۱ | ۱ |
| ۱۵۳۰ | ۱۴۳۰ | ۱۶۴۴/۷ | ۱۲۵۰/۲ | ۱۵۳۴/۱ | ۱۲۸۲/۴ | ۲ |
| ۱۳۰۱/۴ | ۱۲۱۷ | ۶۵۳/۶ | ۲۳۳۷/۷ | ۸۲۳/۸ | ۱۵۴۷/۹ | ۳ |
| ۲۲۸/۶ | ۴۷۷/۴ | ۱۳۸۹/۷ | ۱۵۸۴/۱ | ۱۱۵۹/۸ | ۲۶۵/۴ | Delta |
| ۶ | ۴ | ۲ | ۱ | ۳ | ۵ | Rank |

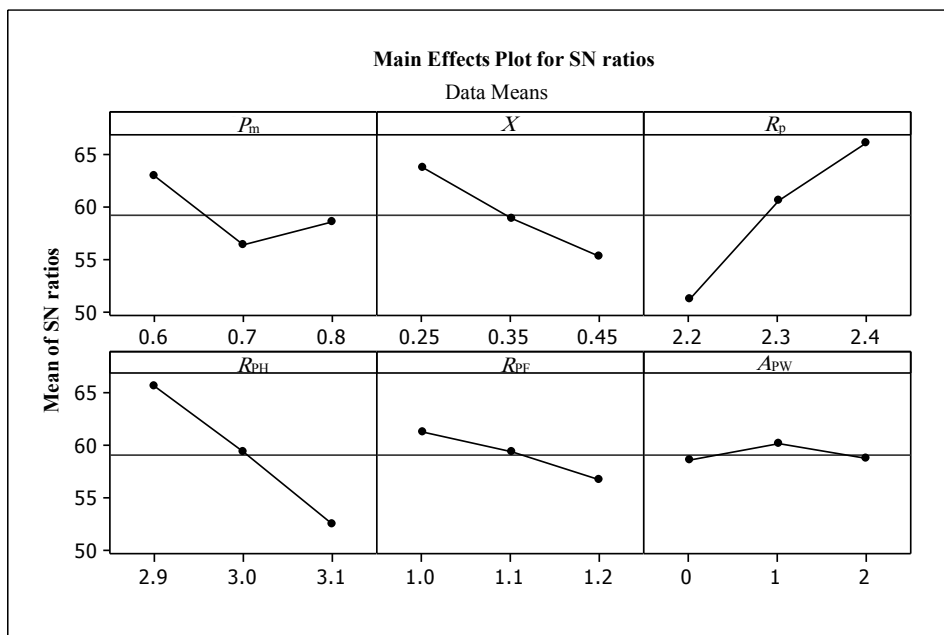
جدول ۴-۱۱: نتایج تحلیل نرم افزار مینی تب بر اساس سیگنال به نویز پارامترهای موثر در فرایند اتصال ورق های

DX51D/DOCOL

| Response Table for Signal to Noise Ratios | | | | | | |
|---|------------------|------------------|---------------|-------------|---------------|-------|
| Larger is better | | | | | | |
| A_{PW} (°) | R_{PF} (mm) | R_{PH} (mm) | R_p (mm) | X (mm) | P_m (mm) | سطح |
| ۵۸/۶۳ | ۶۱/۳۸ | ۶۵/۶۹ | ۵۱/۰۹ | ۶۳/۷۰ | ۶۲/۸۳ | ۱ |
| ۶۰/۱۶ | ۵۹/۴۵ | ۵۹/۳۹ | ۶۰/۵۱ | ۵۸/۷۷ | ۵۶/۲۳ | ۲ |
| ۵۸/۸۰ | ۵۶/۷۷ | ۵۲/۵۲ | ۶۵/۹۹ | ۵۵/۱۳ | ۵۸/۵۴ | ۳ |
| ۱/۵۳ | ۴/۶۱ | ۱۳/۱۸ | ۱۴/۹۰ | ۸/۵۷ | ۶/۶۰ | Delta |
| ۶ | ۵ | ۲ | ۱ | ۳ | ۴ | Rank |



شکل ۴-۱۰: وابستگی بین استحکام اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، با قالب شیب‌دار و هر پارامتر در سه سطح بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار مینیتی‌ت‌ب مطابق آزمون‌ها و داده‌های جدول ۴-۸



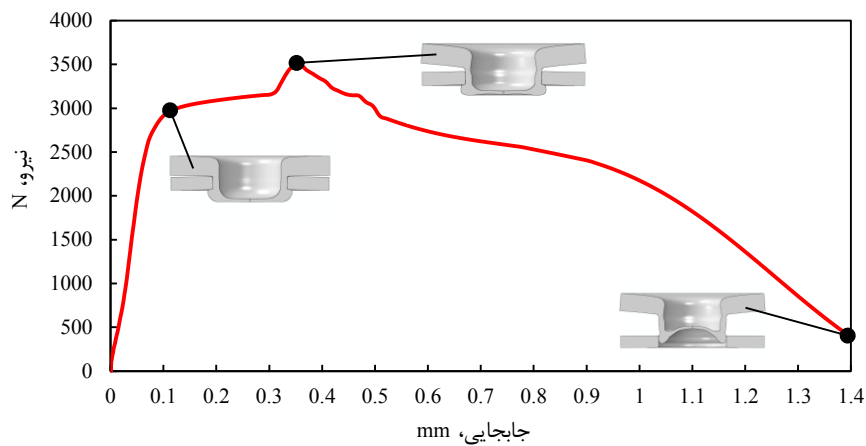
شکل ۴-۱۱: مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف پارامترهای اتصال سرد ورق‌های

DX51D/DOCOL

جدول ۴-۱۲: مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار

بر اساس تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب به روش طراحی آزمایش متعامد

| A_{PW} | R_{PF} | R_{PH} | R_p | X | P_m |
|----------|----------|----------|-------|------|-------|
| (°) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) |
| ۱ | ۱/۰ | ۲/۹ | ۲/۴ | ۰/۲۵ | ۰/۸ |



شکل ۴-۱۲: نتایج شبیه‌سازی المان محدود استحکام کششی ورق‌های DX51D/DOCOL

بر اساس پارامترهای هندسه بهینه ابزار

۴-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی قالب ثابت شیب‌دار و قالب ثابت با حفره‌ی استوانه‌ای شکل

برای مقایسه استحکام کششی اتصال شبیه‌سازی شده بر اساس طرح پیشنهادی، بهینه‌سازی اتصال سرد با قالب ثابت حفره‌ی استوانه‌ای انجام شد. مدل‌سازی فرآیند، مطابق مدل‌سازی اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب ثابت شیب‌دار، انجام شد و با استفاده از روش طراحی آزمایش متعامد، بهینه‌سازی شد. در طراحی آزمایش، پارامتر شعاع قالب R_m ، نیز لحاظ شد. مقادیر سطح R_m ، طوری انتخاب شد که ضخامت تورفتگی در گستره‌ی ۰/۵-۰/۱ mm قرار گیرد. محدوده مناسب برای جدول آرایه‌های متعامد $L_{27}(3^7)$ توسط نرم‌افزار مینی‌تب پیشنهاد شد. تعداد و مقادیر سطوح دیگر، مطابق روش اتصال با قالب شیب‌دار، مطابق جدول ۴-۱۳ تعیین شد.

جدول ۴-۱۳: پارامترهای هندسی ابزار و فرآیند و مقادیر سطوح اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب حفره استوانه‌ای

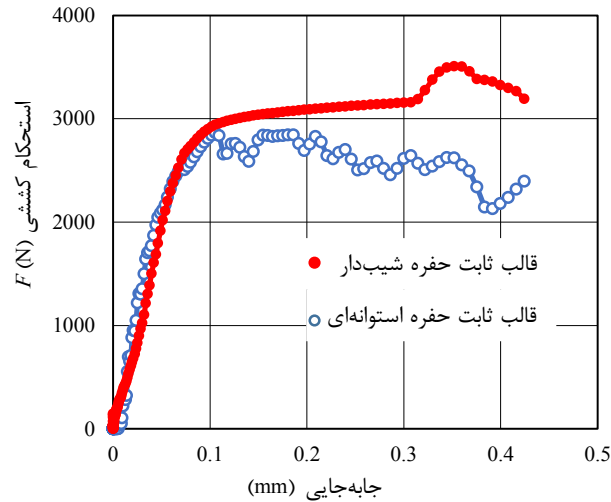
| سطح | R_m (mm) | P_m (mm) | X (mm) | R_p (mm) | R_{PH} (mm) | R_{PF} (mm) | A_{PW} (°) |
|-----|---------------|---------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|
| ۱ | ۳/۲ | ۰/۶ | ۰/۲۵ | ۲/۲ | ۲/۹ | ۱/۰ | ۰ |
| ۲ | ۳/۳ | ۰/۷ | ۰/۳۵ | ۲/۳ | ۳/۰ | ۱/۱ | ۱ |
| ۳ | ۳/۴ | ۰/۸ | ۰/۴۵ | ۲/۴ | ۳/۱ | ۱/۲ | ۲ |

بر اساس جدول ۴-۱۳ تعداد ۲۷ آزمایش طراحی شد. استحکام اتصال برای هر ردیف آزمایش، با استفاده از ابزار مطالعات پارامتریک نرم‌افزار آباکوس بررسی شد. مقدار بهینه هر پارامتر هندسی ابزار و فرآیند بر اساس تحلیل نرم‌افزار مینی‌تب مطابق جدول ۴-۱۴ تعیین شد. بیشینه استحکام برای اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب ثابت حفره استوانه‌ای، پس از تحلیل مدل بر اساس پارامترهای بهینه‌شده، $F = 2866 \text{ N}$ بدست آمد.

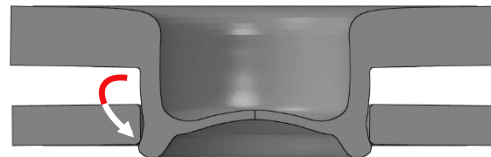
جدول ۴-۱۴: مقدار بهینه پارامترهای هندسی ابزار و فرآیند اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب حفره استوانه‌ای

| R_m (mm) | P_m (mm) | X (mm) | R_p (mm) | R_{PH} (mm) | R_{PF} (mm) | A_{PW} (°) |
|---------------|---------------|-------------|---------------|------------------|------------------|-----------------|
| ۳/۳ | ۰/۷ | ۰/۲۵ | ۲/۴ | ۲/۹ | ۱/۰ | ۰ |

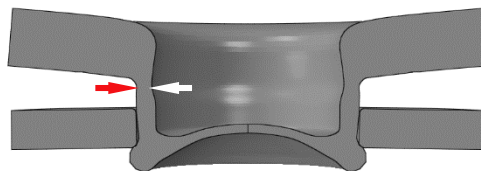
مقایسه استحکام کششی اتصال سرد با استفاده از قالب ثابت حفره شیب‌دار و قالب ثابت حفره استوانه‌ای در شکل ۴-۱۳ نشان داده شد. استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، که مدل‌سازی با قالب طرح پیشنهادی انجام شده، ۱۸٪ بیشتر است. مطابق شکل ۴-۱۴ تغییر وضعیت سازوکار شکست، از حالت درهم‌رفتگی اتصال به حالت شکست ضخامت گلوبی، باعث افزایش استحکام شده است. برای اینکه در سازوکار شکست ضخامت گلوبی، کارسختی رخ داده و استحکام اتصال از رفتار تنش کرنش مومسان حقیقی پیروی می‌کند که در منحنی شکل ۴-۱۳ به درستی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: منحنی استحکام کشش اتصال سرد با قالب ثابت حفره شیب‌دار و استوانه‌ای



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۴: سازوکار شکست اتصال سرد در شبیه‌سازی استحکام کشش (الف) با قالب ثابت حفره استوانه‌ای (ب) با

قالب ثابت حفره شیب‌دار

۴-۴- نتایج تجربی

نتایج پارامترهای بهینه‌شده هندسه ابزار اتصال سرد که از روش طراحی آزمایش متعامد و تحلیل المان محدود به دست آمد بر اساس نتایج تجربی ارزیابی شد. ضخامت گلوبی و ضخامت تورفتگی که از پارامترهای هندسی اتصال هستند از طریق اندازه‌گیری مقطع مرکزی اتصال با دستگاه سایه‌نگار به دست آمد. نتایج آزمون‌های تجربی برای پارامترهای هندسه‌ی اتصال و استحکام آن در مقایسه با نتایج تجربی، مطابق جدول ۴-۱۵ و جدول ۴-۱۶ می‌باشد. نتایج نشان داد که در اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D ضخامت تورفتگی t_s

حاصل از نتیجه شبیه‌سازی به میزان جزیی بیشتر از نتیجه حاصل از آزمون تجربی است. در مقابل ضخامت گلوبی t_n حاصل از شبیه‌سازی اتصال سرد کمتر از نتیجه حاصل از آزمون تجربی است.

در اتصال سرد سوراخ‌دار DX51D/DOCOL 1400M با قالب ثابت شیب‌دار ضخامت تورفتگی t_s و ضخامت گلوبی t_n حاصل از نتیجه شبیه‌سازی اتصال سرد به میزان جزیی بیشتر از نتیجه حاصل از آزمون تجربی است.

جدول ۴-۱۵: مقایسه پارامترهای هندسی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D

| شماره آزمایش | ضخامت گلوبی t_n (mm) | | ضخامت تورفتگی t_s (mm) | | ضخامت باقی‌مانده کف فنجانی اتصال X (mm) | | استحکام اتصال F (N) | |
|--------------|------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---|-----------|-----------------------|-----------|
| | تجربی | شبیه‌سازی | تجربی | شبیه‌سازی | تجربی | شبیه‌سازی | تجربی | شبیه‌سازی |
| ۱ | ۰/۳۰ | ۰/۲۸ | ۰/۲۸ | ۰/۲۸ | ۰/۹۰ | ۰/۹۰ | ۲۲۷۴ | |
| ۲ | ۰/۳۰ | ۰/۲۸ | ۰/۲۸ | ۰/۳۰ | ۰/۹۲ | ۰/۹۰ | ۲۳۰۰ | ۲۳۱۹ |
| ۳ | ۰/۳۲ | ۰/۳۰ | ۰/۳۰ | ۰/۳۰ | ۰/۸۸ | ۰/۹۰ | ۲۲۹۰ | |
| میانگین | ۰/۳۱ | ۰/۲۸ | ۰/۲۹ | ۰/۳۰ | ۰/۹۰ | ۰/۹۰ | ۲۲۸۸ | ۲۳۱۹ |
| انحراف (%) | ۰ | -۹/۵۲ | ۰ | ۴/۴۴ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱/۳۴ |
| انحراف معیار | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۱۰/۷۱ | |

جدول ۴-۱۶: مقایسه پارامترهای هندسی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار

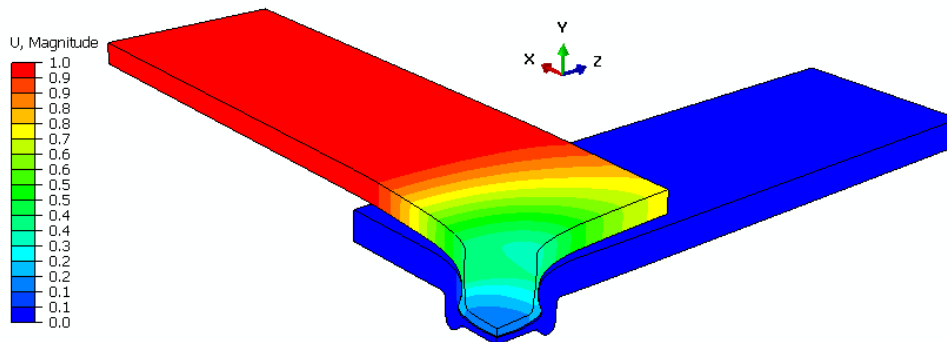
| شماره آزمایش | ضخامت گلوبی t_n (mm) | | ضخامت تورفتگی t_s (mm) | | ضخامت باقی‌مانده کف فنجانی اتصال X (mm) | | استحکام اتصال F (N) | |
|--------------|------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---|-----------|-----------------------|-----------|
| | تجربی | شبیه‌سازی | تجربی | شبیه‌سازی | تجربی | شبیه‌سازی | تجربی | شبیه‌سازی |
| ۱ | ۰/۵۰ | ۰/۴۸ | ۰/۳۶ | ۰/۳۶ | ۰/۲۸ | ۰/۲۸ | ۳۱۰۵ | |
| ۲ | ۰/۴۸ | ۰/۵۰ | ۰/۴۰ | ۰/۴۰ | ۰/۲۶ | ۰/۲۵ | ۳۴۸۰ | ۳۵۰۹ |
| ۳ | ۰/۵۰ | ۰/۴۹ | ۰/۴۲ | ۰/۴۲ | ۰/۲۶ | ۰/۲۵ | ۳۵۷۰ | |
| میانگین | ۰/۴۹ | ۰/۵۰ | ۰/۳۹ | ۰/۴۰ | ۰/۲۷ | ۰/۲۵ | ۳۳۸۵ | ۳۵۰۹ |
| انحراف (%) | ۰ | ۱/۳۳ | ۰ | ۱,۶۷ | ۰ | -۶/۶۷ | ۰ | ۳/۵۳ |
| انحراف معیار | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۲۰۱/۳۷ | |

۴-۵- نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی و متقارن محوری استحکام کششی اتصال سرد

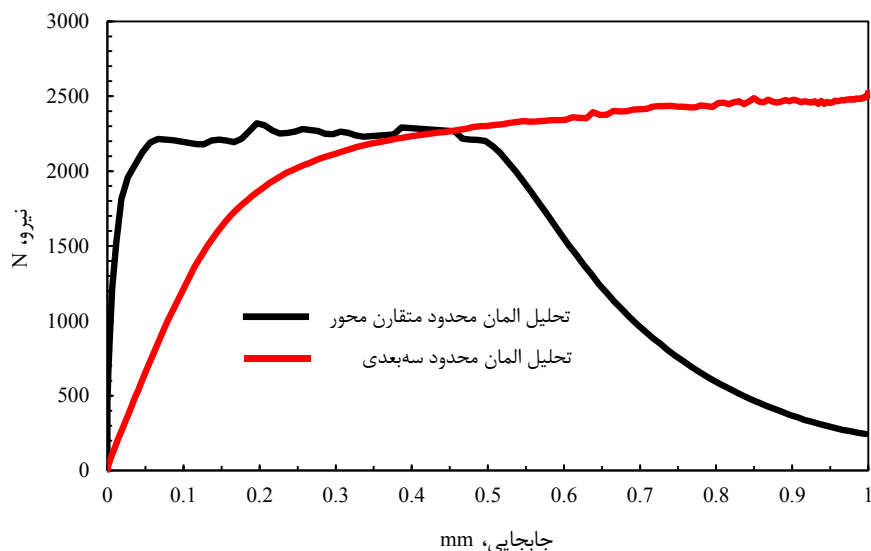
برای بررسی میزان تاثیر خمش ورق‌ها در بیشینه استحکام اتصال سرد و صحه‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی آزمون کششی اتصال به صورت متقارن محوری، نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی و متقارن محوری این فرآیند با هم مقایسه شد.

۴-۵-۱- اتصال DX51D/DX51D

هندسه ورق‌های شبیه‌سازی شده در پایان گام تحلیل استحکام اتصال DX51D/DX51D مطابق شکل ۴-۱۵ است. چنانکه در شکل دیده می‌شود ورق به مقدار کمی دچار خمش شده است. خمش ایجاد شده در ورق‌ها که در مدل سه بعدی دیده می‌شود باعث شده است که منحنی استحکام کششی تحلیل متقارن محوری مطابق شکل ۴-۱۶ دارای شیب کمتری نسبت به منحنی استحکام کششی تحلیل سه بعدی باشد. بیشینه نیروی‌های استحکام کششی اتصال اختلاف کمی با هم دارند برای همین می‌توان نتیجه گرفت که خمش ورق در آزمون استحکام کششی اتصال ورق‌های DX51D/DX51D تاثیر زیادی نداشته و قابل چشم‌پوشی است.



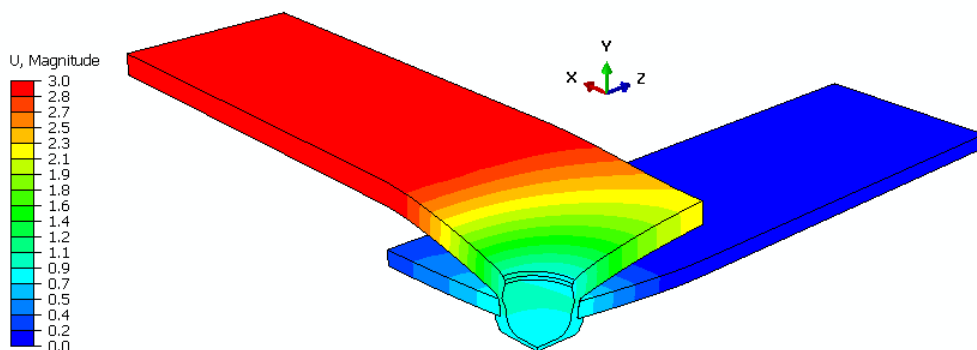
شکل ۴-۱۵: تغییر شکل ورق‌های اتصال DX51D/DX51D در پایان گام تحلیل استحکام کششی



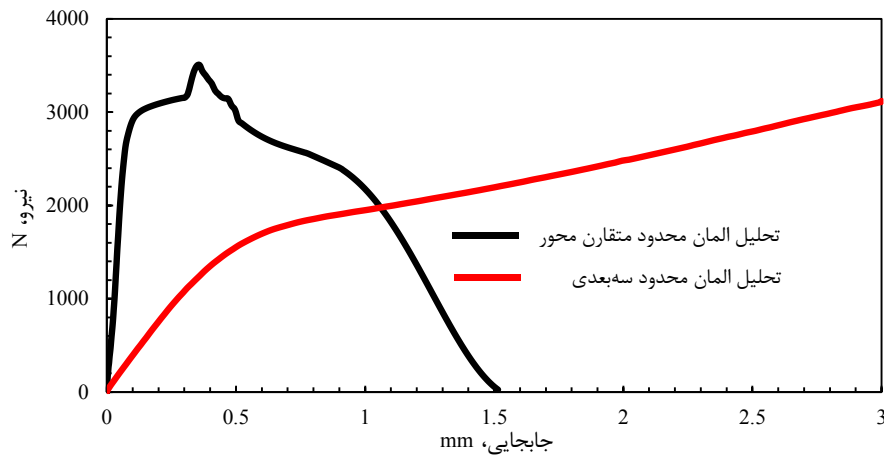
شکل ۴-۱۶: استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D حاصل از تحلیل المان محدود

۴-۵-۲- مقایسه نتایج اتصال DX51D/DOCOL 1400M

هندسه ورق‌های شبیه‌سازی شده در پایان گام تحلیل استحکام اتصال DX51D/DOCOL 1400M مطابق شکل ۴-۱۷ است. چنانکه در شکل دیده می‌شود ورق به مقدار بیشتری نسبت به اتصال ورق‌های DX51D/DX51D دچار خمش شده است. خمش ایجاد شده در ورق‌ها که در مدل سه بعدی دیده می‌شود باعث شده است که منحنی استحکام کششی تحلیل متقارن محوری مطابق شکل ۴-۱۸ دارای شیب کمتری نسبت به منحنی استحکام کششی تحلیل سه بعدی باشد. بیشینه نیروی‌های استحکام کششی اتصال اختلاف کمتر از ۱۰٪ با هم دارند. برای همین می‌توان نتیجه گرفت که خمش ورق در آزمون استحکام کششی اتصال ورق‌های DX51D/DOCOL تاثیر زیادی نداشته و قابل چشم‌پوشی است.



شکل ۴-۱۷: هندسه ورق‌های اتصال DX51D/DOCOL 1400M در پایان گام تحلیل استحکام کششی

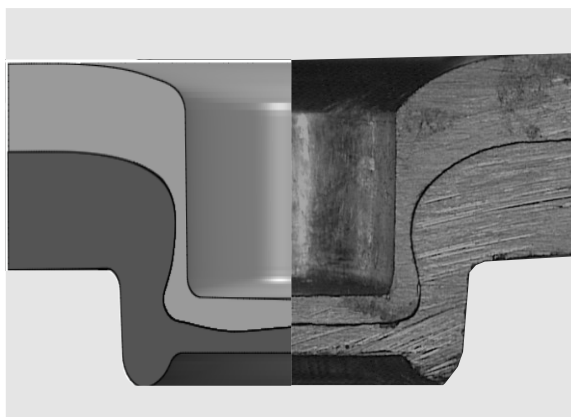


شکل ۴-۱۸: استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M حاصل از تحلیل المان محدود

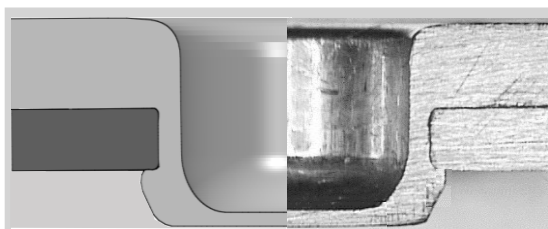
۴-۶- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای طراحی بهینه

استحکام مکانیکی اتصال سرد به پارامترهای هندسی مانند ضخامت گلویی و تورفتگی وابسته است. با مقایسه نتایج عددی و تجربی برای پارامترهای هندسی فوق، مدل المان محدود، صحت‌گذاری می‌شود. مطابق جدول ۴-۱۵ و جدول ۴-۱۶، خطای ضخامت گلویی و تورفتگی در اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D کمتر از ۱۰٪ و در اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار کمتر از ۲٪ می‌باشد که اختلاف کم و قابل قبول بین نتایج عددی شبیه‌سازی و تجربی نشان می‌دهد، مدل‌سازی المان محدود به اندازه کافی برای مطالعه پارامترهای اتصال و در نتیجه طراحی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت، درست و دقیق انجام گرفته است. و برای اینکه در اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، تنها ورق بالایی در ناحیه اتصال، تغییر شکل شدید دارد از دقت بیشتری برخوردار است.

مقطع اتصال سرد تولید شده و شبیه‌سازی شده که بر اساس طرح بهینه شده هندسی ابزار اتصال حاصل از طراحی آزمایش متعامد می‌باشد، در شکل ۴-۱۹ و شکل ۴-۲۰ مقایسه شد. تطابق قابل قبولی، بین نمونه شبیه‌سازی شده با رایانه و نمونه تجربی وجود دارد که نشان می‌دهد مدل المان محدود از دقت کافی برای پیش‌بینی پارامترهای اتصال برخوردار و نیز روش طراحی آزمایش متعامد می‌تواند به عنوان روشی کارا برای بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ابزار به کار گرفته شود.

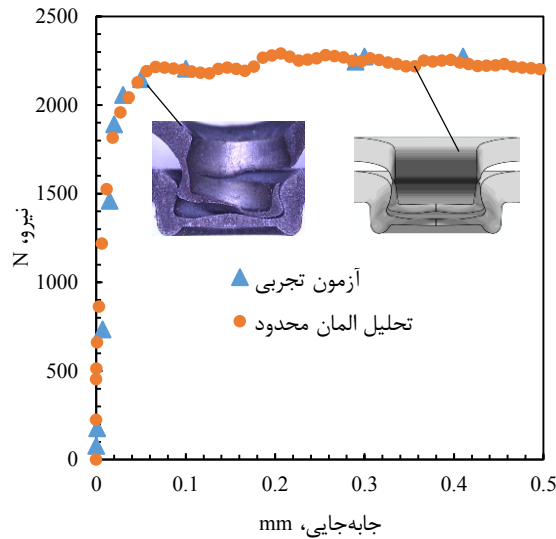


شکل ۴-۱۹: مقایسه مقطع اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D به دست آمده از شبیه‌سازی با نمونه تجربی برای
 هندسه بهینه‌ی ابزار



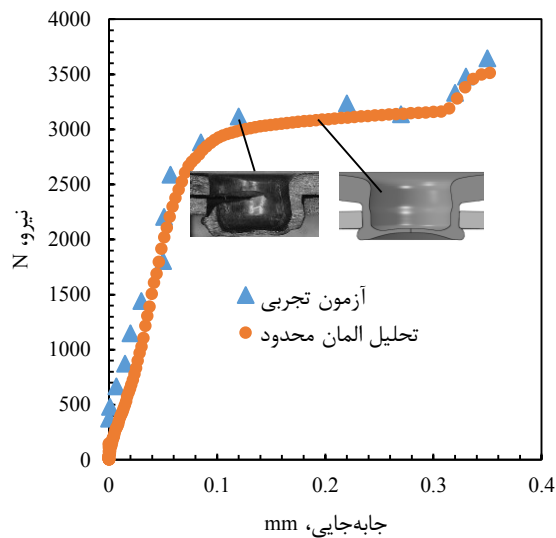
شکل ۴-۲۰: مقایسه مقطع اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار به دست آمده از
 شبیه‌سازی با نمونه تجربی برای هندسه بهینه‌ی ابزار

مطابق شکل ۴-۲۱ و شکل ۴-۲۲ استحکام کششی اتصال سرد حاصل از نتایج تحلیل المان محدود و نتایج آزمون تجربی بر هم منطبق می‌باشند. در اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، انحراف جزئی در قسمت اول نمودار وجود دارد که ناشی از خمش ایجاد شده در ورق‌ها حین انجام آزمون تجربی استحکام کششی به دلیل تحمل نیروی بیشتر و ضخامت میانگین کمتر ورق‌های اتصال، در مقایسه با اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D است.



شکل ۴-۲۱: نمودار مقایسه استحکام کششی F اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D حاصل از تحلیل المان

محدود متقارن محوری و آزمون تجربی در ناحیه قبل از گلویی شدن



شکل ۴-۲۲: نمودار مقایسه استحکام کششی F اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب

شیب‌دار حاصل از تحلیل المان محدود متقارن محوری و آزمون تجربی در ناحیه قبل از گلویی شدن

برای یک اتصال سرد در هنگام آزمون استحکام دو سازوکار خرابی می‌تواند وجود داشته باشد؛ شکست گلویی و یا جدایش دو ورق از یکدیگر. لی و همکاران [۲۱] دو معادله برای تخمین استحکام اتصال سرد با قالب شیاردار، با توجه به نیروی لازم برای شکست گلویی F_n و نیروی لازم برای جدایش اتصال F_p ارائه کرده‌اند که در روابط (۴-۱) و (۴-۲) آمده است.

$$F_n = \bar{\sigma}_f A = \pi(2R_p t_n + t_n^2) \bar{\sigma}_f \quad (۱-۴)$$

$$F_p = \pi(2R_p t_n + t_n^2) \bar{\sigma}_Y \left(\frac{1 + \mu/\tan \alpha}{\mu/\tan \alpha} \right) \left[1 - \left(\frac{t_n}{t_s + t_n} \right)^{\mu/\tan \alpha} \right] \quad (۲-۴)$$

در این معادلات، $\bar{\sigma}_f$ تنش شکست، A سطح تصویر شده‌ی ضخامت گلوبی، $\bar{\sigma}_Y$ تنش متوسط جریان، α زاویه تورفتگی با محور اتصال سرد و μ مقدار ثابت اصطکاک بین دو ورق می‌باشد. در شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D، برای طراحی بهینه، سازوکار شکست گلوبی عامل خرابی اتصال بود. از این رو، استحکام به دست آمده برای اتصال می‌تواند با پیش‌یابی معادله‌ی (۱-۴) مقایسه شود. با قرار دادن $\bar{\sigma}_f = 420 \text{ MPa}$ حاصل از آزمون کشش، $R_p = 2/6 \text{ mm}$ حاصل از طراحی بهینه ابزار و $t_n = 0/31 \text{ mm}$ میانگین به دست آمده از سه آزمون تجربی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DX51D در معادله (۱-۴)، نیروی لازم برای شکست گلوبی $F_n = 2253 \text{ N}$ به دست آمد که در مقایسه با میانگین استحکام بیشینه اتصال سرد حاصل از سه آزمون تجربی $F = 2288 \text{ N}$ ، اختلاف بسیار کمی داشت.

همچنین دو معادله برای تخمین استحکام اتصال سوراخ‌دار با توجه به نیروی لازم برای شکست گلوبی F_n و نیروی لازم برای جداشدن اتصال F_p مطابق روابط (۳-۴) و (۴-۴) ارائه شده است [۱۱].

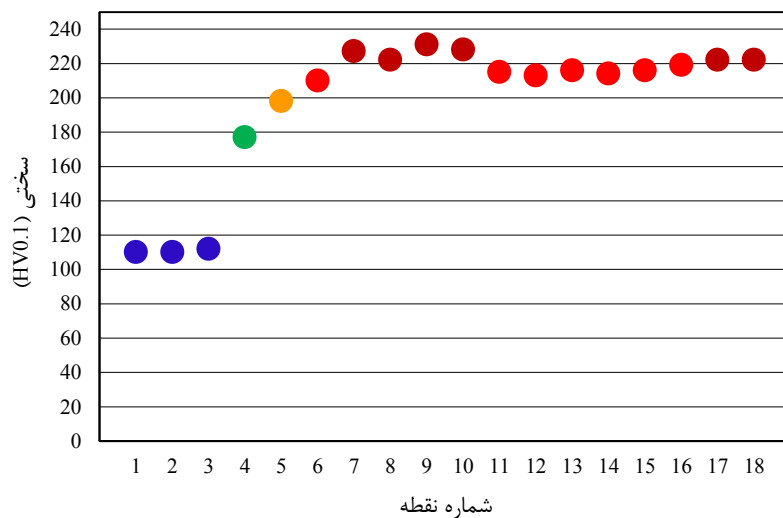
$$F_n = k_f A_n = \pi(2R_p t_n + t_n^2) k_f \quad (۳-۴)$$

$$F_p = k A_p = k 2\pi R_p H P_m \quad (۴-۴)$$

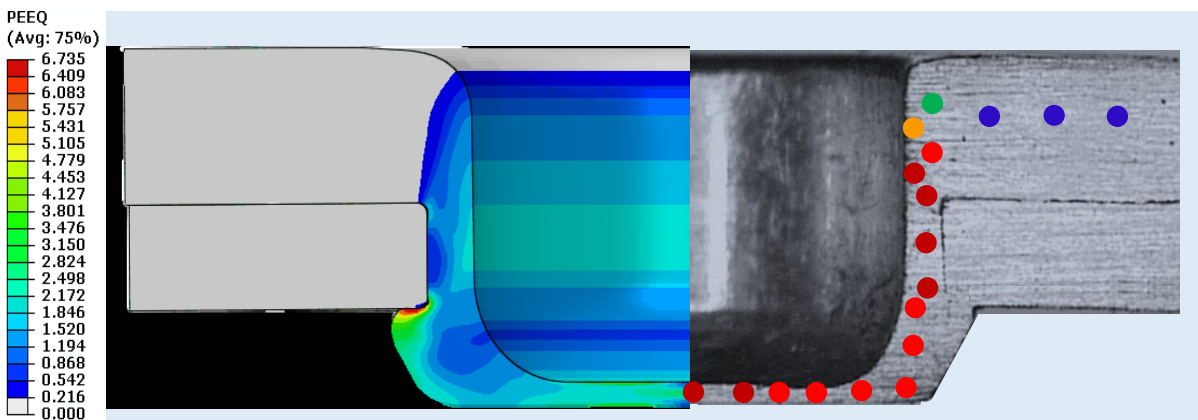
در این معادلات، k_f تنش شکست برشی ورق بالایی، A_n سطح تصویر شده‌ی ضخامت گلوبی، A_p سطح برش ضخامت تورفتگی و k تنش تسلیم برشی ورق بالایی، می‌باشد. در شبیه‌سازی و آزمون‌های تجربی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M انجام شده برای طراحی بهینه، شکست گلوبی عامل خرابی اتصال بود. از این رو، استحکام به دست آمده برای اتصال می‌تواند با پیش‌یابی معادله‌ی (۳-۴) مقایسه شود. به صورت ساده‌شده $k_f = 420 \text{ MPa}$ با قرار دادن [۴۴]. برابر استحکام کششی نهایی در نظر گرفته شد [۴۴]. با قرار دادن $k_f = 420 \text{ MPa}$ حاصل از آزمون کشش، $R_p = 2/4$ حاصل از طراحی بهینه ابزار و $t_n = 0/49 \text{ mm}$ میانگین به دست آمده از سه آزمون تجربی، در معادله (۳-۴)، نیروی لازم برای شکست گلوبی $F_n = 3420 \text{ N}$ به دست آمد که در مقایسه با میانگین استحکام بیشینه اتصال حاصل از سه آزمون تجربی $F = 3385 \text{ N}$ ، اختلاف بسیار کمی دارد.

۴-۶-۱- نتایج ریز سختی سنجی و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی

نتایج سختی نقاط مختلف نمونه در شکل ۲۳-۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲۴-۴ و شکل ۲۳-۴ نقاط ۱-۳ تغییر شکل مومسان نداشته و کرنش سختی در آن صورت نگرفته است. برای همین می‌توان سختی این نقاط را سختی پایه ورق DX51D نامید. در نقطه ۴، تغییر شکل کمی اتفاق افتاده و این نقطه دارای کرنش معادل مومسان می‌باشد. بنابراین کرنش سختی در آن ناحیه اتفاق افتاده و ۶۷ HV1 سختی افزایش یافته است. منحنی تنش حقیقی - کرنش مومسان شکل ۴-۴ نشان داد که بیشینه سختی در کرنش ۰/۲۱۶ اتفاق می‌افتد. برای همین در کرنش‌های بیشتر از این مقدار سختی اشباع می‌شود. تحلیل المان محدود نقاط ۵-۱۸ نشان می‌دهد که کرنش مومسان معادل بیشتر از ۰/۲۱۶ است. بنابراین سختی در این نقاط یکسان می‌باشد. اختلاف کم سختی در این نقاط به دلیل خطای اندازه‌گیری دستگاه و نیروی انسانی است.



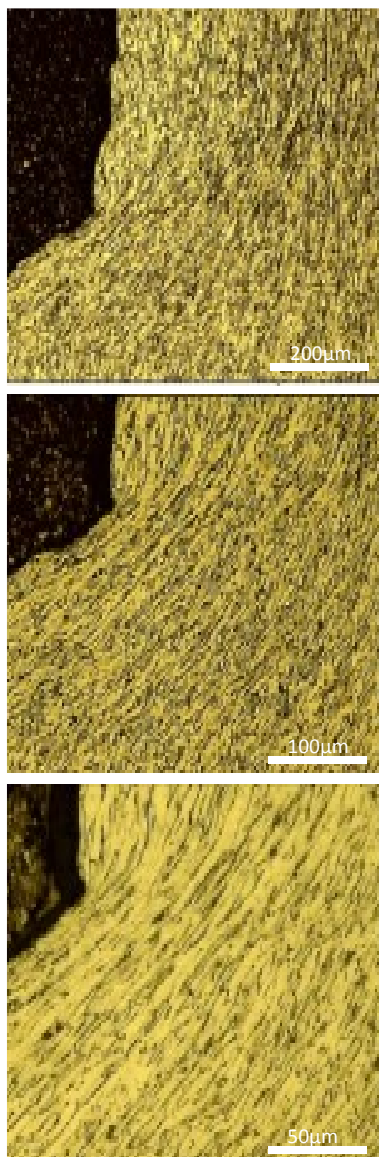
شکل ۲۳-۴: سختی نقاط مختلف نشان داده شده در شکل ۱۴-۳



شکل ۲۴-۴: سختی نقاط نمونه تجربی و کرنش معادل مومسان نظیر آن در نمونه شبیه‌سازی

۴-۶-۲- نتایج بررسی ریزساختار

تصاویر ساختارسنجی گرفته شده با میکرسکوپ نوری ناحیه فنجانی پروفیل نمونه اتصال سرد مطابق شکل ۴-۲۵ و مقایسه آن با ساختار و دانه بندی اولیه فولاد گالوانیزه DX51D نشان داد که در اثر کشش ناشی از فرآیند اتصال سرد در ناحیه فنجانی نوع ساختار تغییر نداشته و در بافت فریتی پایه، کشیدگی زیادی ایجاد شده است. کشیدگی یکنواخت دانه های فریت نشان می دهد در این نواحی کرنش مومسان به بیشینه مقدار خود رسیده و اشباع شده است. بافت مارتنزیتی در ساختار فولاد استحکام بالا DOCOL 1400M در تصاویر میکروسکوپی نوری، نشان می دهد که این نوع فولاد قابلیت شکل پذیری کمی داشته و روش اتصال سرد طراحی شده برای ورق فولاد گالوانیزه، نمی تواند برای اتصال این نوع ورق ها استفاده شود.



شکل ۴-۲۵: تصاویر ریزساختار ناحیه فنجانی پروفیل نمونه اتصال سرد ورق فولادی گالوانیزه DX51D

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل جمع‌بندی نتایج بررسی تحلیل المان محدود و طراحی آزمایش متعامد در مقایسه با آزمون‌های عملی حاصل از بررسی اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M و DX51D/DX51D آورده شده و پاسخ مسئله پژوهش تبیین می‌شود و در پایان پیشنهادهایی برای ادامه مسیر پژوهش توسط علاقه‌مندان ارائه شده است.

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه با روش طراحی آزمایش متعامد، پارامترهای هندسی ابزار اتصال سرد با قالب ثابت و اتصال سرد سوراخ‌دار با قالب شیب‌دار، بهینه‌سازی شد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود نشان داد که طرح پیشنهادی قالب ثابت با حفره شیب‌دار، موجب افزایش ۱۸٪ استحکام کششی اتصال نسبت به اتصال سرد ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب ثابت حفره استوانه‌ای، شده است. آزمون‌های تجربی انجام شده بر روی نمونه‌های اتصال سرد، برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی بر اساس پارامترهای مقطع اتصال شامل ضخامت کف فنجان‌ی اتصال X ، ضخامت گلویی t_n و ضخامت تورفتگی t_s ، نشان داد که سازگاری خوبی بین نتایج وجود دارد. با توجه به مزیت‌ها و استحکام کششی اتصال سرد ورق‌های فولادی گالوانیزه DX51D که بیشتر از استاندارد مورد پذیرش خودروساز است، این روش می‌تواند جایگزین مناسبی در صنعت خودروسازی به جای جوش نقطه‌ای برای این کاربرد خاص و نیز در کاربردهای مشابه، که سطوح قابل دسترسی است، باشد. نتایج نشان داد، اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M، بر اساس طرح قالب پیشنهادی، باعث

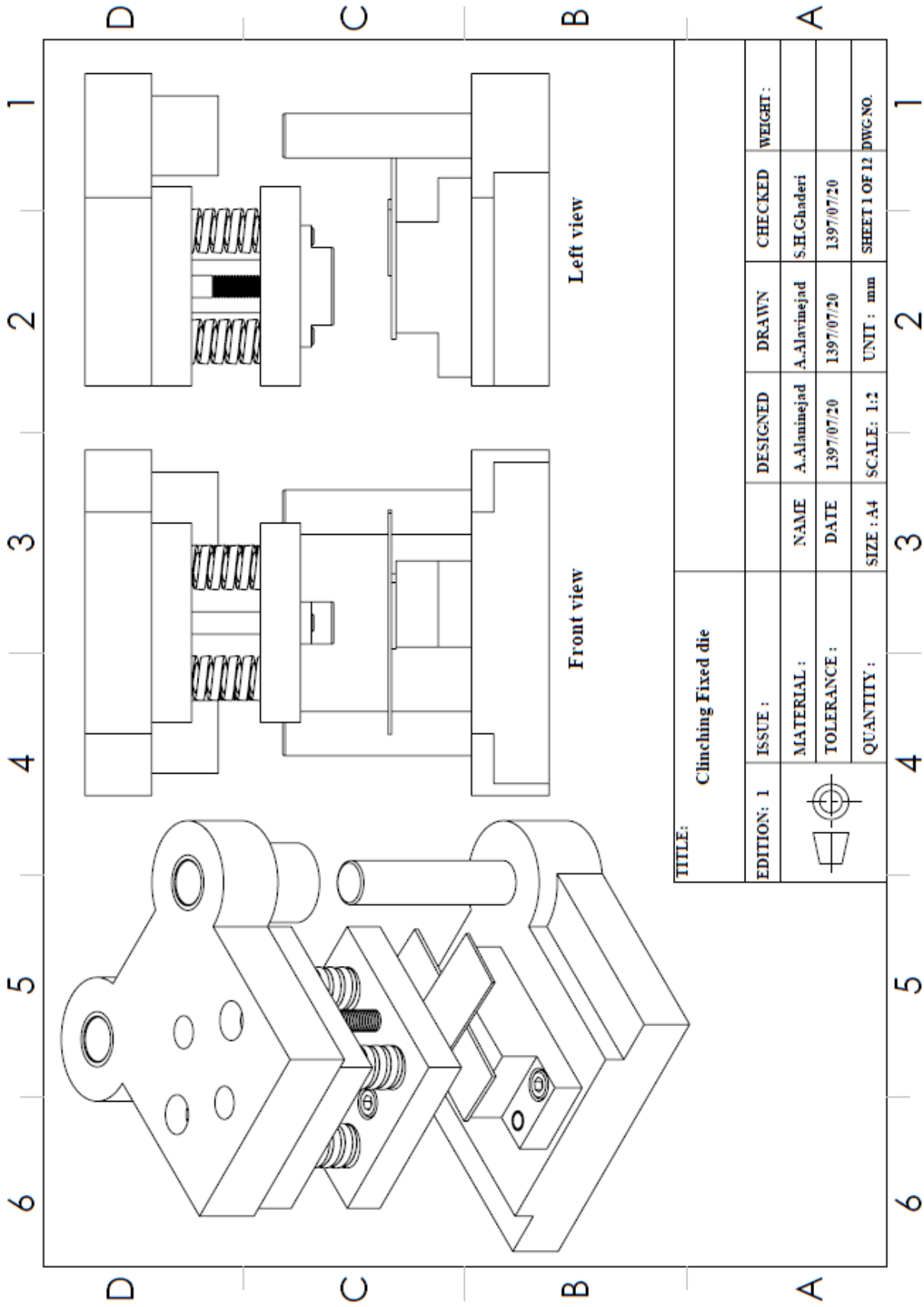
افزایش استحکام اتصال شده است. نتایج نشان داد که کاربرد روش طراحی آزمایش متعامد در شبیه‌سازی و یکپارچگی آن با ابزار مطالعات پارامتریک نرم‌افزار آباکوس روشی کارا برای بهینه‌سازی طراحی هندسی ابزار اتصال سرد، برای کاهش چشم‌گیر هزینه و زمان انجام آزمون‌های تجربی است. برای اتصال سرد ورق‌های فولادی گالوانیزه با قالب ثابت شیاردار، چهار پارامتر اصلی طراحی ابزار اتصال سرد در سه سطح، بررسی و مشخص شد که شعاع سنبه بیشترین و زاویه کف سنبه کمترین اثر را در استحکام اتصال سرد داشته و میزان تاثیر چهار پارامتر به ترتیب عبارتند از: شعاع سنبه، عمق قالب، عرض شیار کف قالب و زاویه کف سنبه. در اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب ثابت شیب‌دار، شش پارامتر اصلی موثر در طراحی ابزار اتصال سرد، در سه سطح، بررسی و مشخص شد که شعاع سنبه R_p ، بیشترین و زاویه دیواره سنبه APW ، کمترین اثر را در استحکام اتصال سرد سوراخ‌دار داشته و میزان تاثیر شش پارامتر به ترتیب عبارتند از: شعاع سنبه R_p ، شعاع سوراخ ایجاد شده در ورق استحکام بالا R_{PH} ، ضخامت باقی‌مانده کف فنجان‌ی اتصال X ، شعاع گوشه سنبه R_{PF} ، عمق حفره‌ی قالب P_m ، و زاویه دیواره سنبه APW .

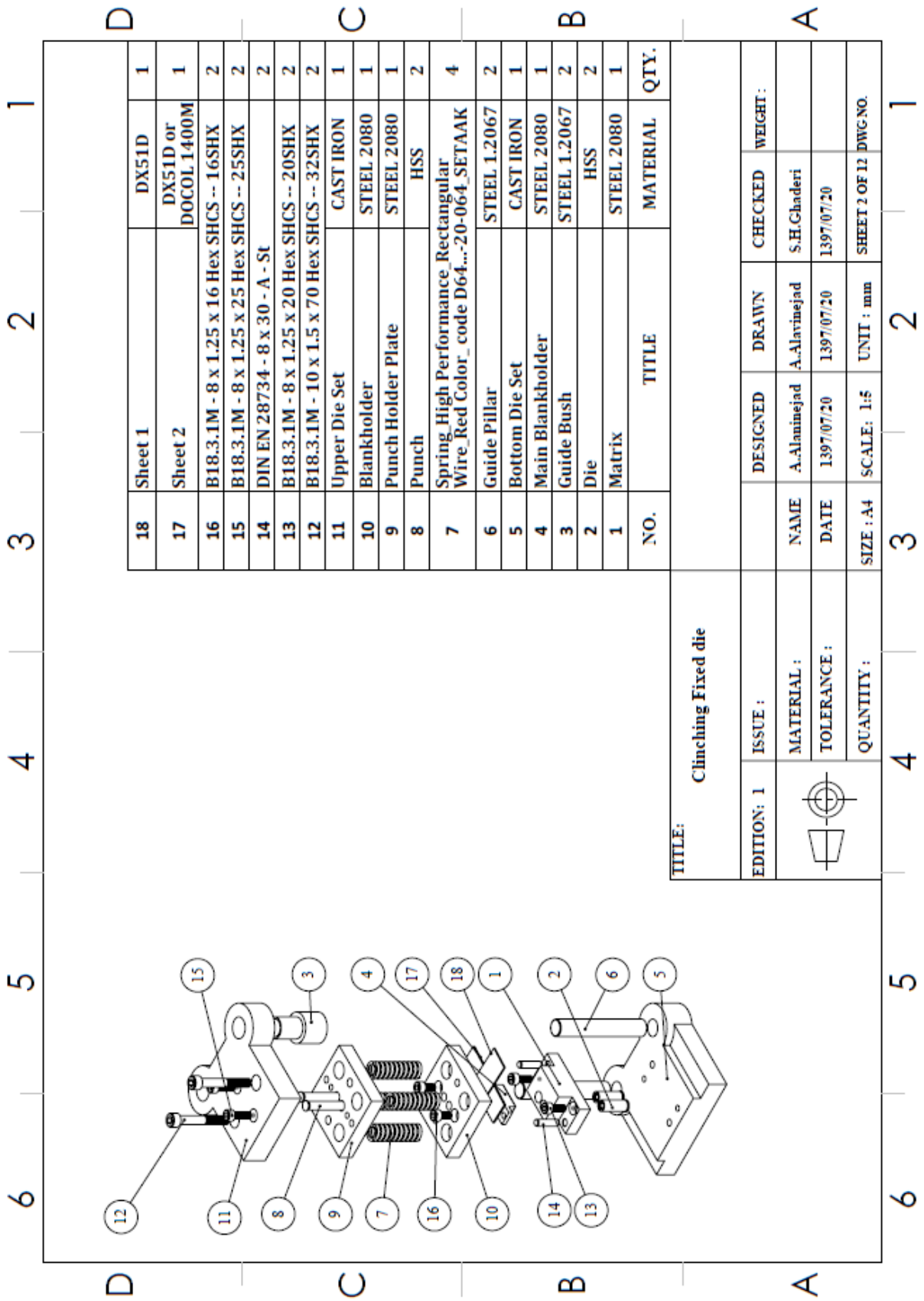
۵-۲- پیشنهادها

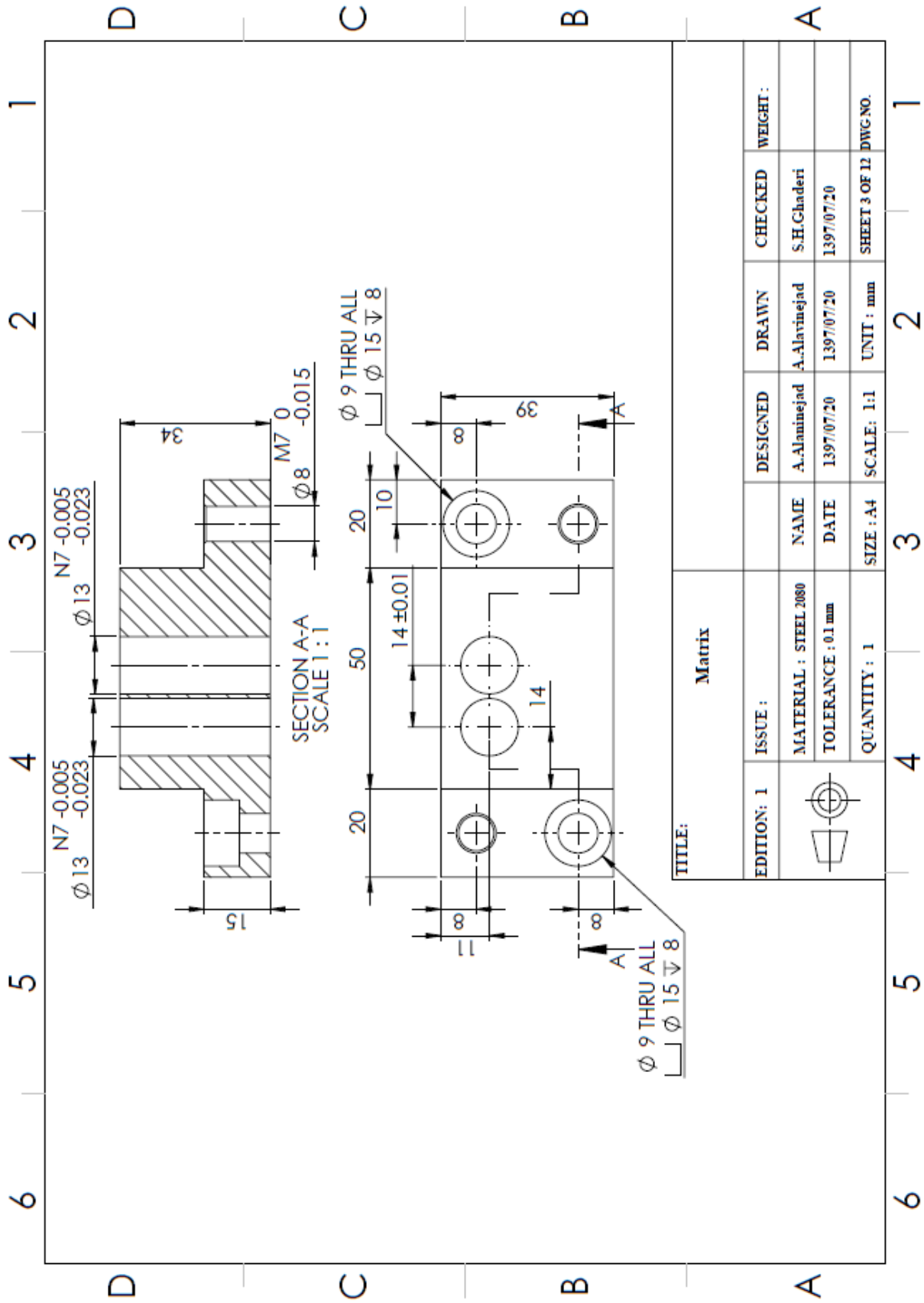
به منظور ادامه پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

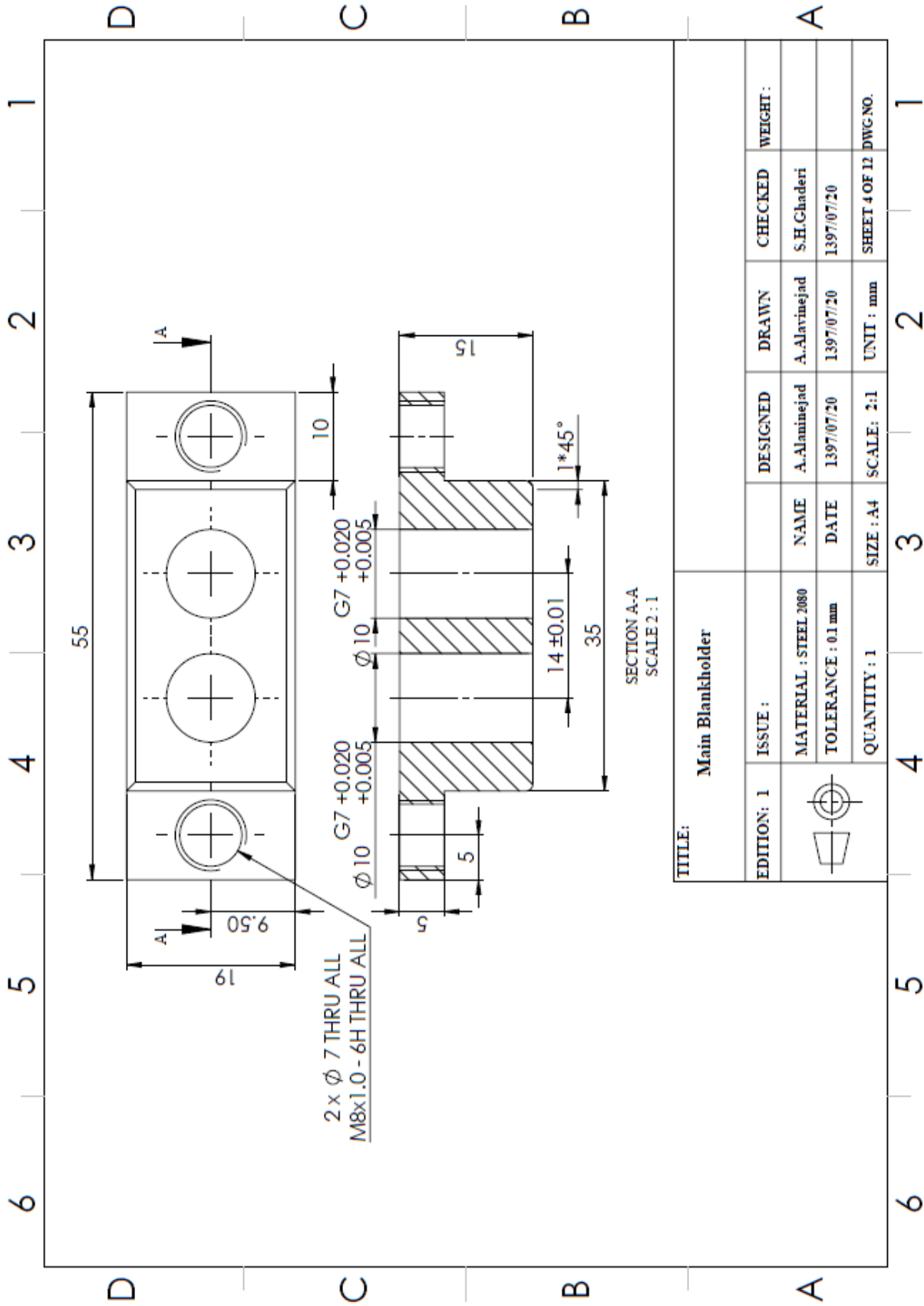
۱. خواص نمونه معرفی شده به نرم‌افزار آباکوس برای تحلیل المان محدود فرآیند اتصال سرد، از آزمون کشش تک محوره استخراج شده و ورق‌های مورد استفاده با فرض رفتار همسانگرد تحلیل شد. پیشنهاد می‌شود اثر نتایج آزمون کشش دو محوره و نیز ناهمسانگردی ورق‌ها بر استحکام اتصال نیز مطالعه شود.
۲. در پایان‌نامه حاضر اتصال سرد سوراخ‌دار ورق‌های DX51D/DOCOL 1400M با قالب شیب‌دار به عنوان طرحی جدید معرفی شد که در ادامه این پژوهش میتوان زاویه شیب قالب را به صورت پارامتری تحلیل، و زاویه بهینه و میزان تاثیر آن بر استحکام اتصال را بررسی نمود.
۳. با توجه به اینکه اتصال سرد به شکل تکی جوابگوی استاندارد مورد پذیرش خودروساز در این کاربرد خاص و کاربردهای مشابه است، ولی به دلیل عدم تحمل گشتاور کافی حول محور اتصال، بایستی به شکل زوج استفاده شود. پیشنهاد مطالعه اتصال سرد با هندسه بیضی‌شکل تکی در ادامه این پژوهش برای رفع مشکل فوق می‌شود.

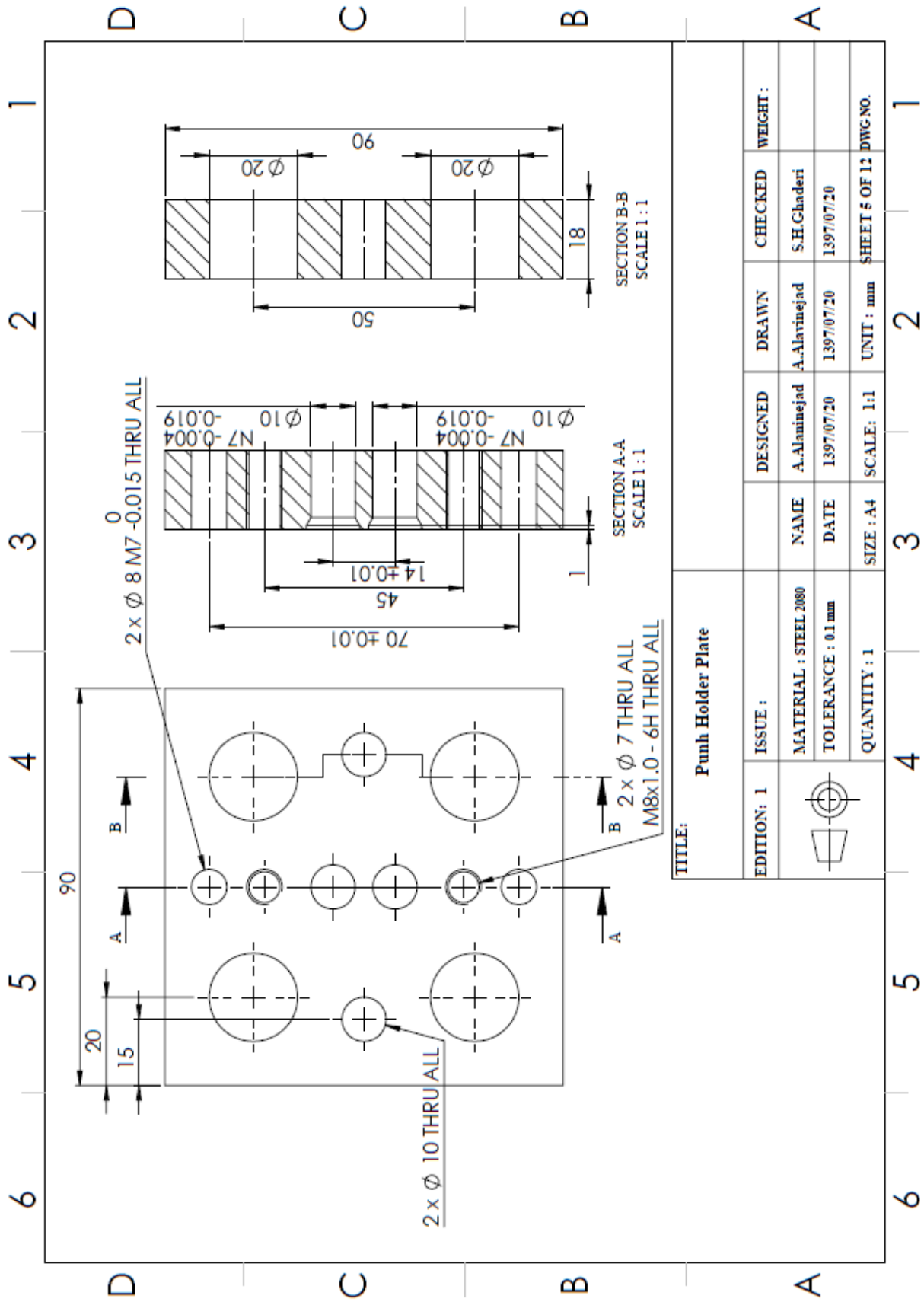
پیوست الف - نقشه‌های قالب و ابزار برای انجام اتصال سرد

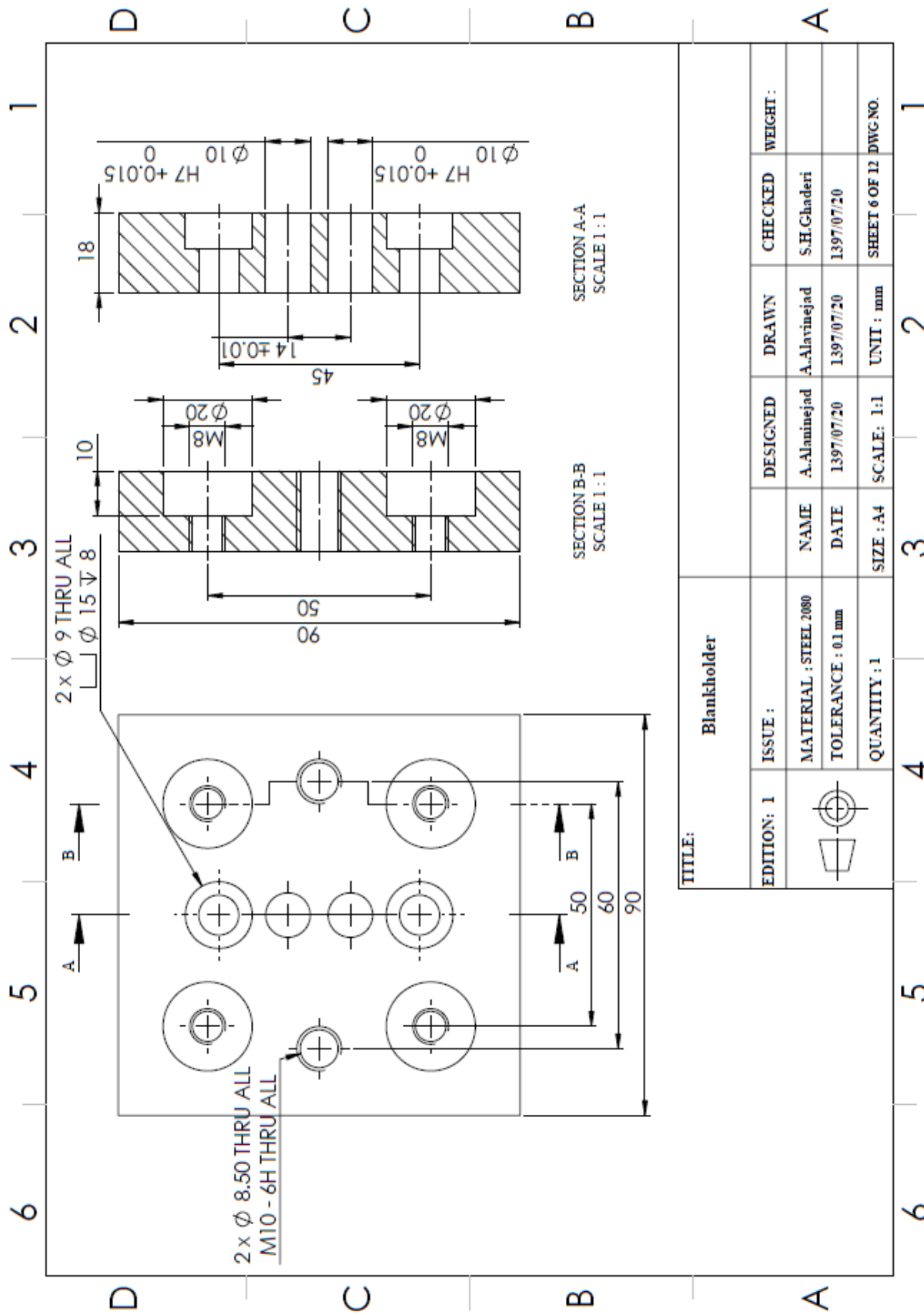


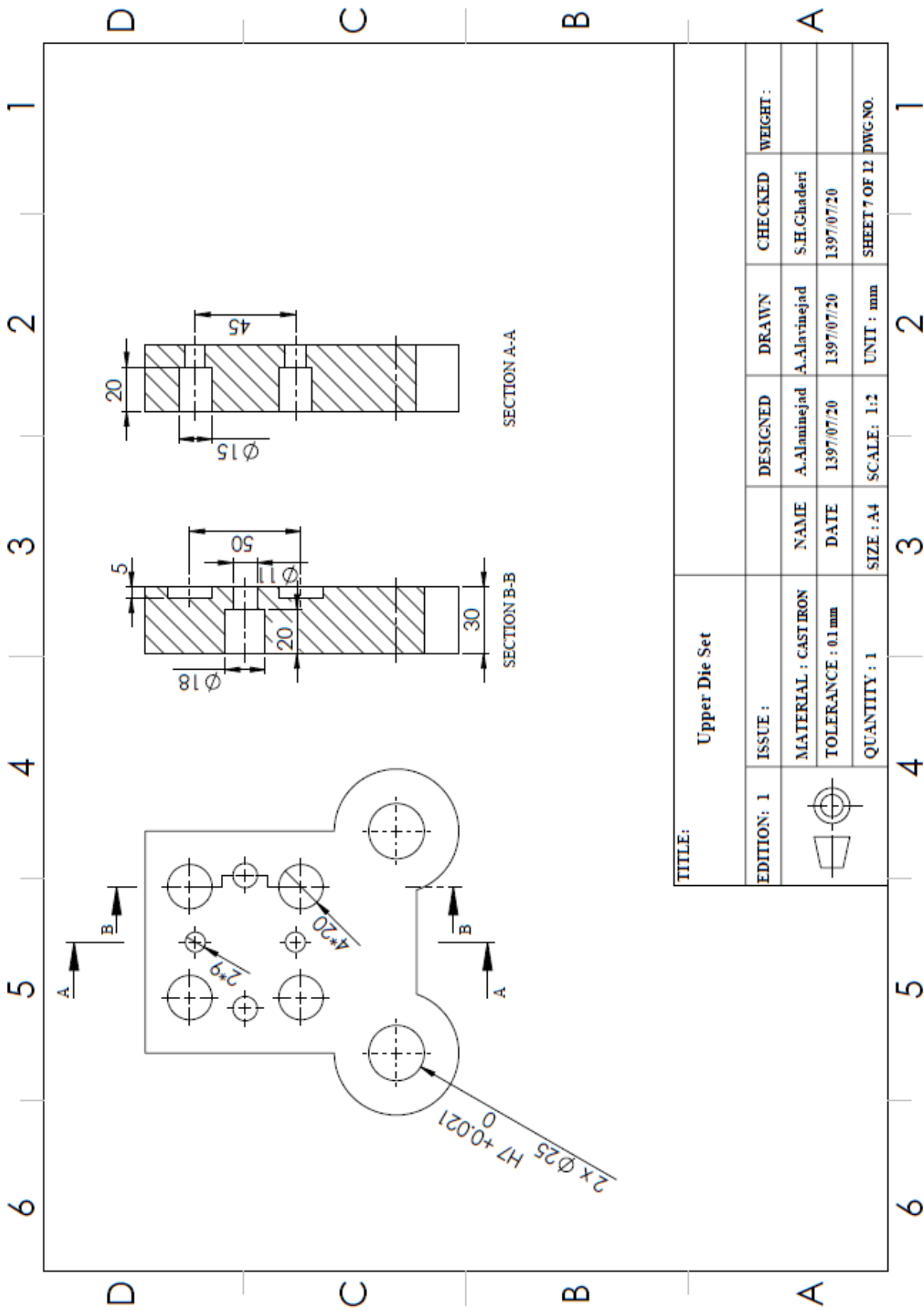


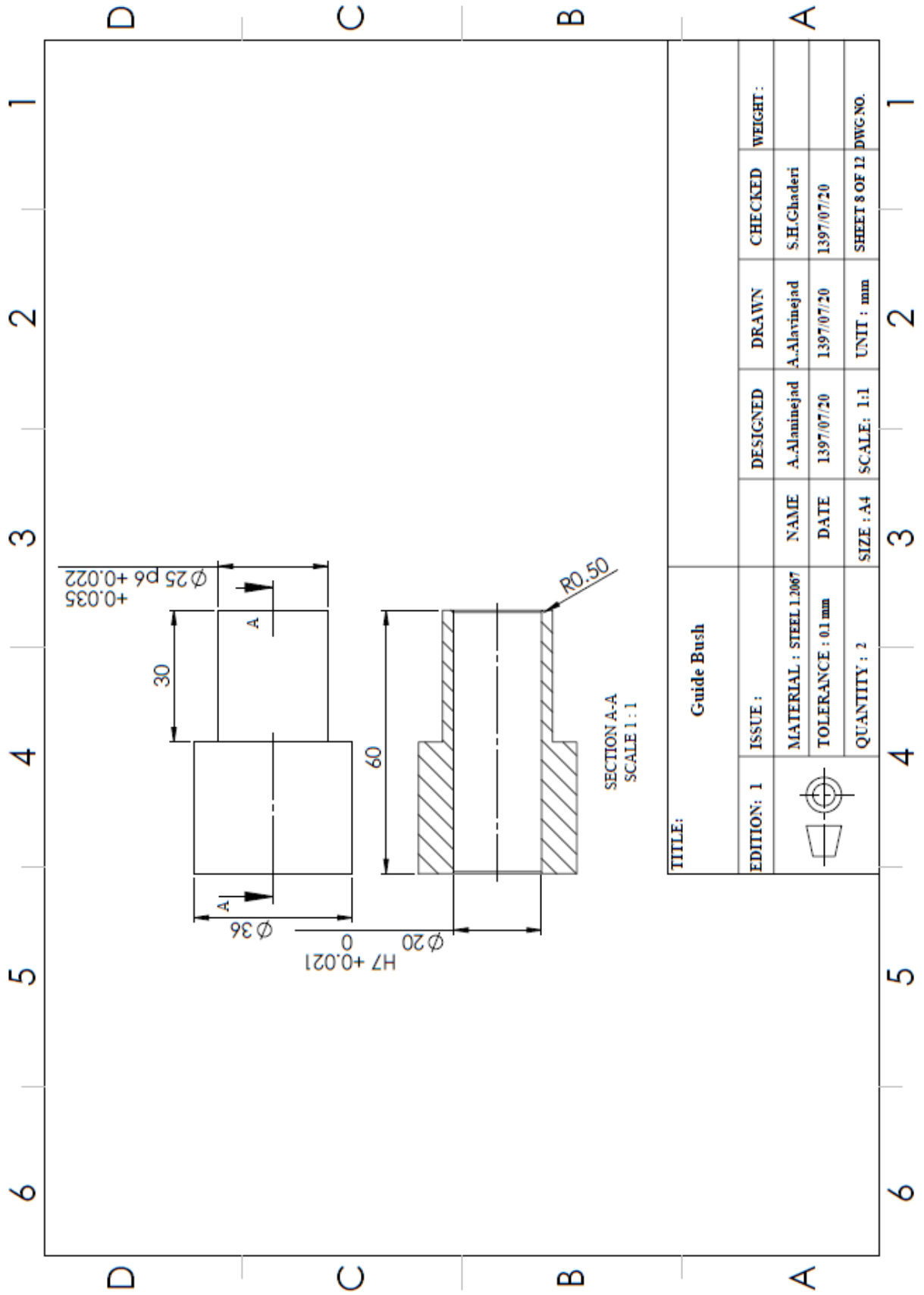


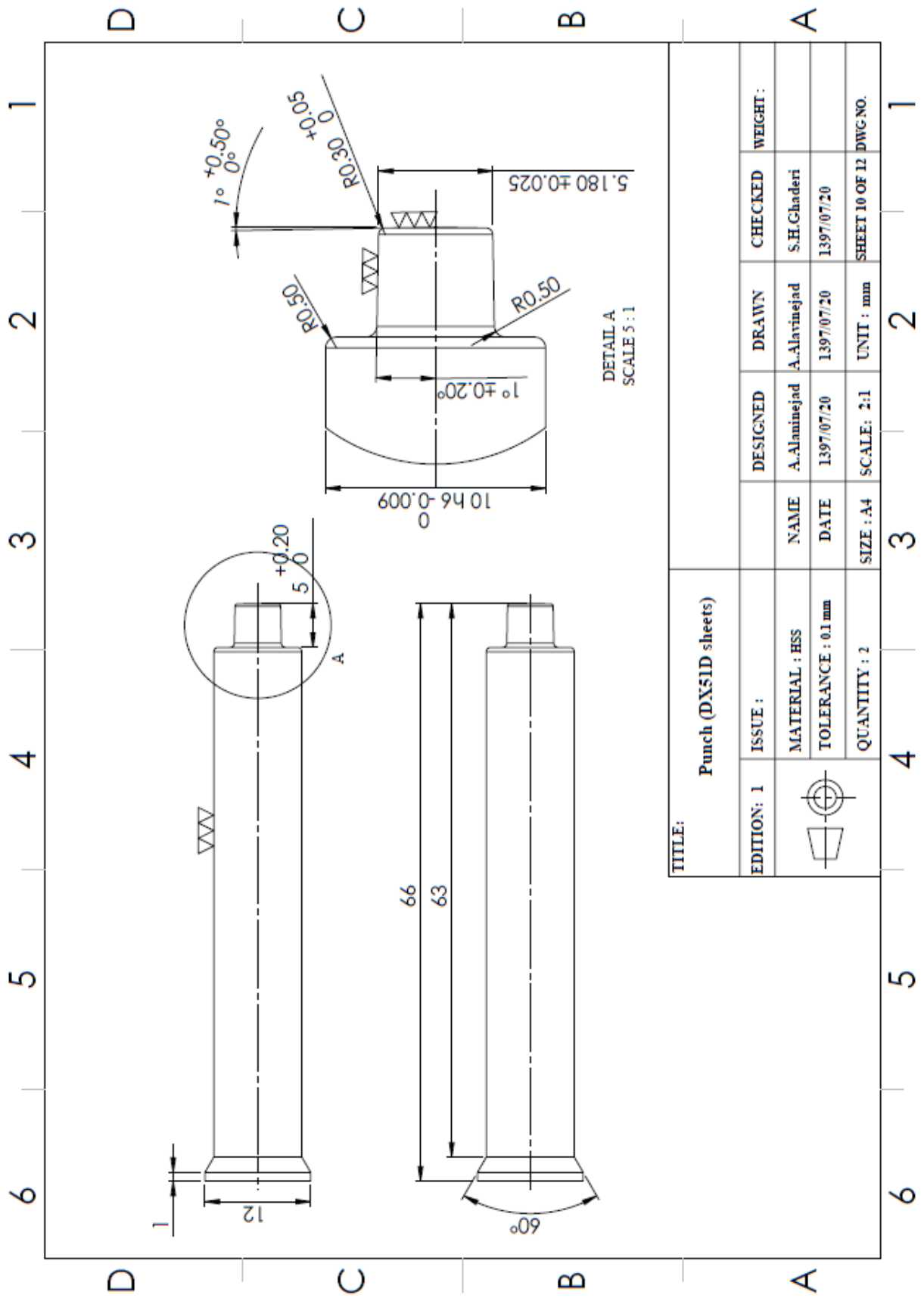






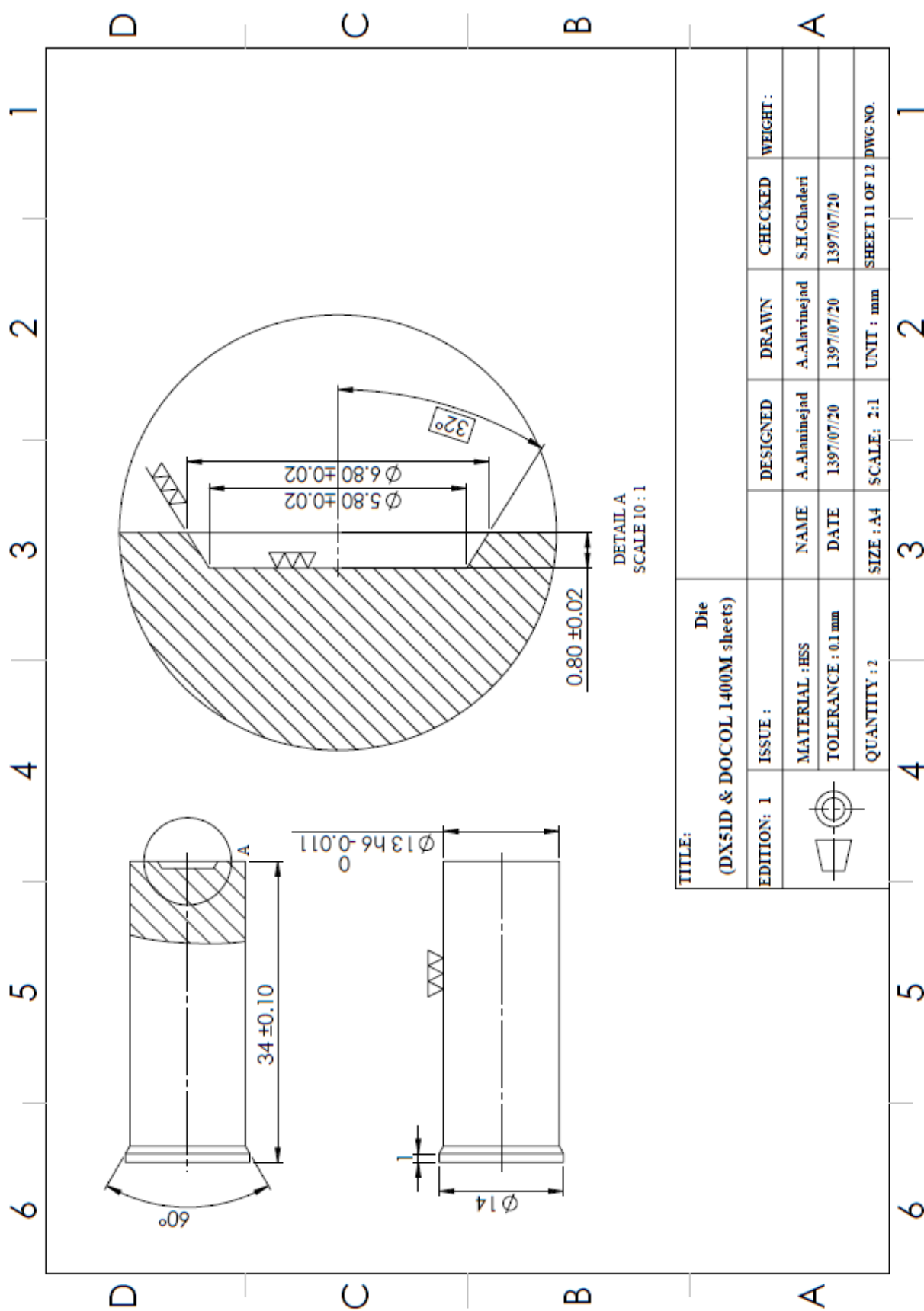




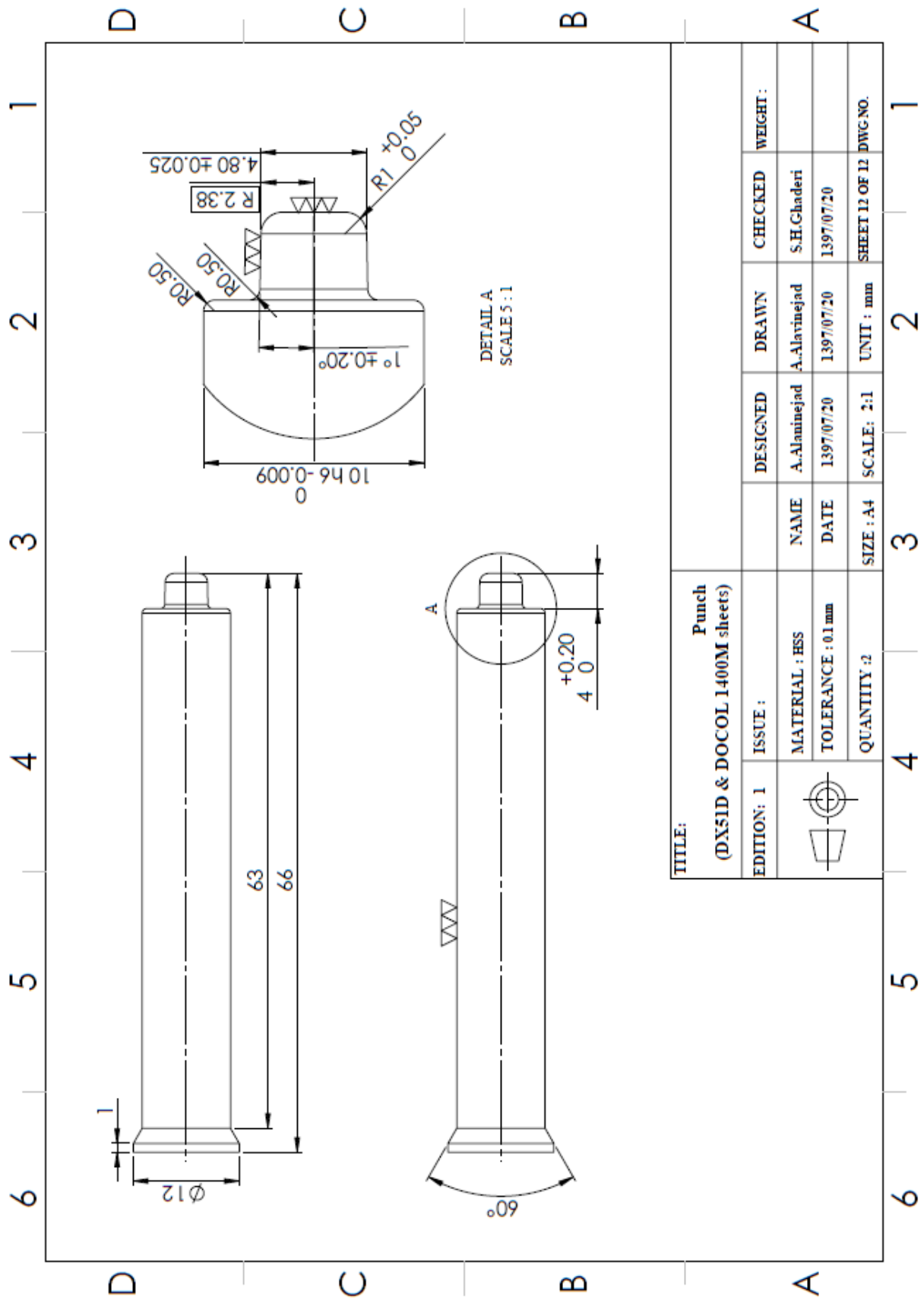


TITLE:
Punch (DX51D sheets)

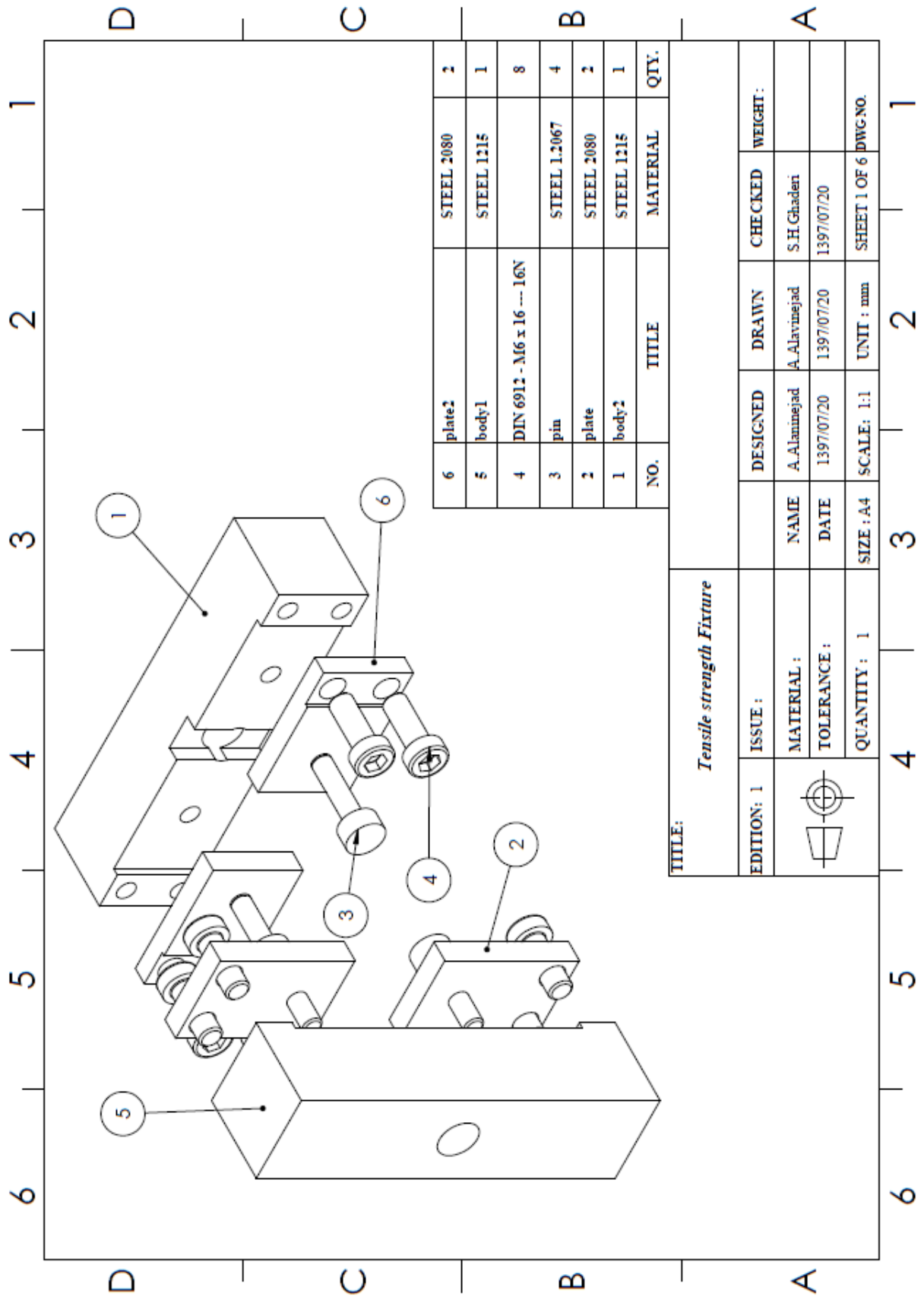
| | | | | | |
|---|--------------------|---------------|---------------|----------------|----------|
| EDITION: 1 | ISSUE : | DESIGNED | DRAWN | CHECKED | WEIGHT : |
|  | MATERIAL : HSS | A. Alavinejad | A. Alavinejad | S.H. Ghaderi | |
|  | TOLERANCE : 0.1 mm | 1397/07/20 | 1397/07/20 | 1397/07/20 | |
| | QUANTITY : 2 | SCALE : 2:1 | UNIT : mm | SHEET 10 OF 12 | DWG NO. |



| TITLE: | | Die (DX51D & DOCOL 1400M sheets) | | EDITION: | 1 | ISSUE: | NAME | DESIGNED | DRAWN | CHECKED | WEIGHT: |
|--------|--|-------------------------------------|--|----------|---|--------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|---------|
| | | | | | | MATERIAL : HSS | A.-Alaminejad | A.-Alaminejad | A.-Alavinejad | S.H.Ghaderi | |
| | | | | | | TOLERANCE : 0.1 mm | 1397/07/20 | 1397/07/20 | 1397/07/20 | 1397/07/20 | |
| | | | | | | QUANTITY : 2 | SIZE : A4 | SCALE: 2:1 | UNIT : mm | SHEET 11 OF 12 DWG.NO. | |

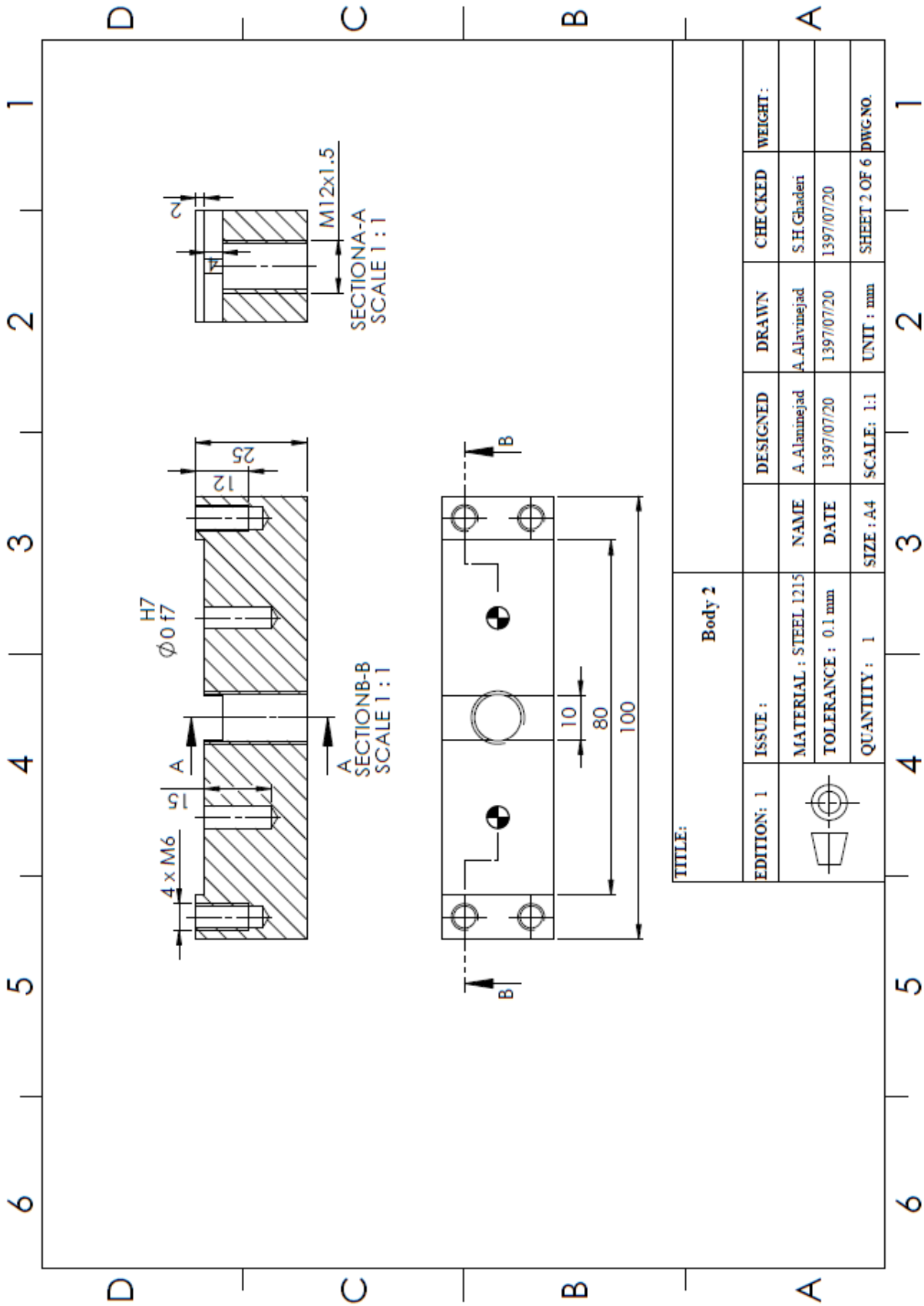


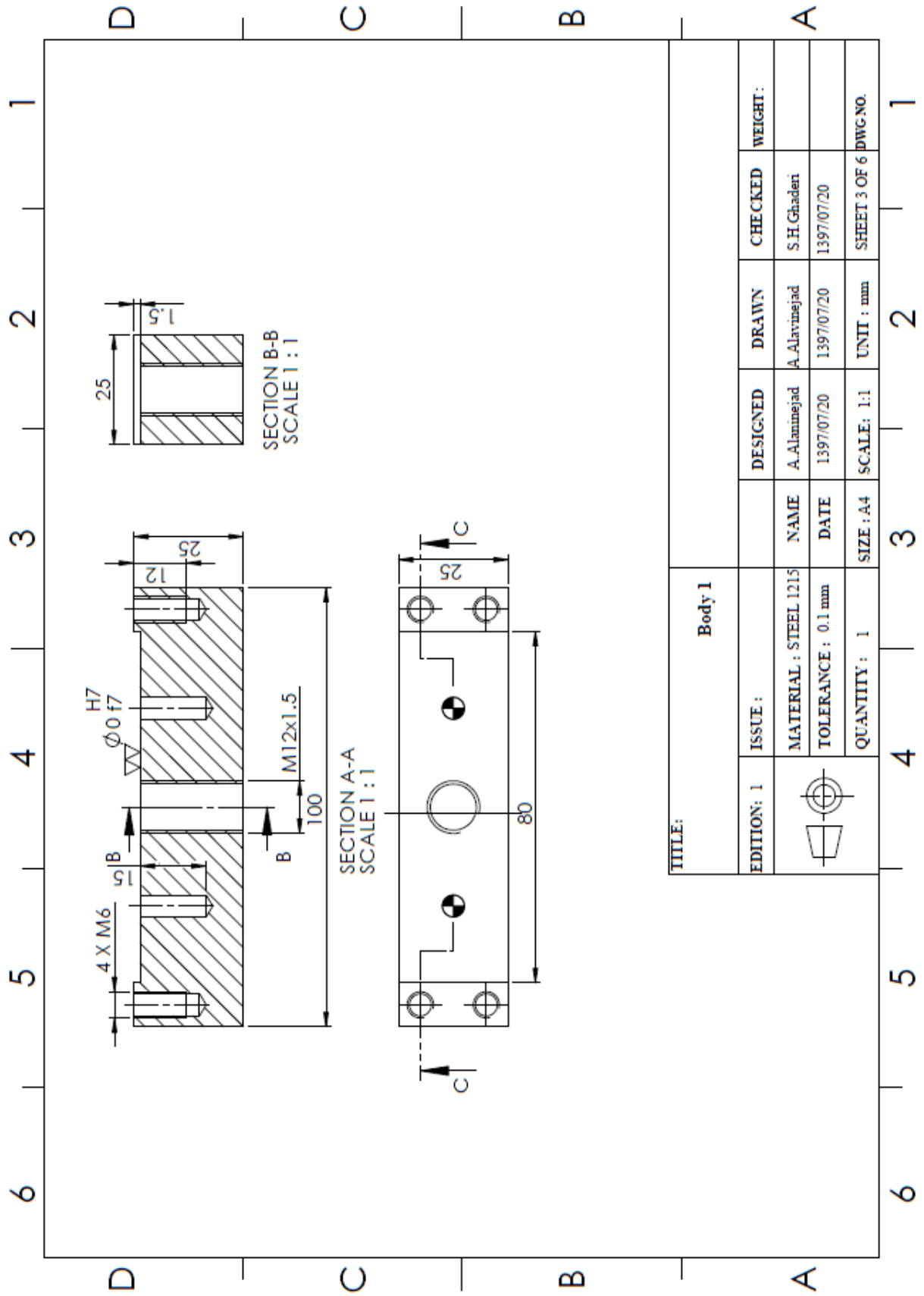
پیوست ب - نقشه‌های قید و بند برای انجام آزمون استحکام اتصال سرد

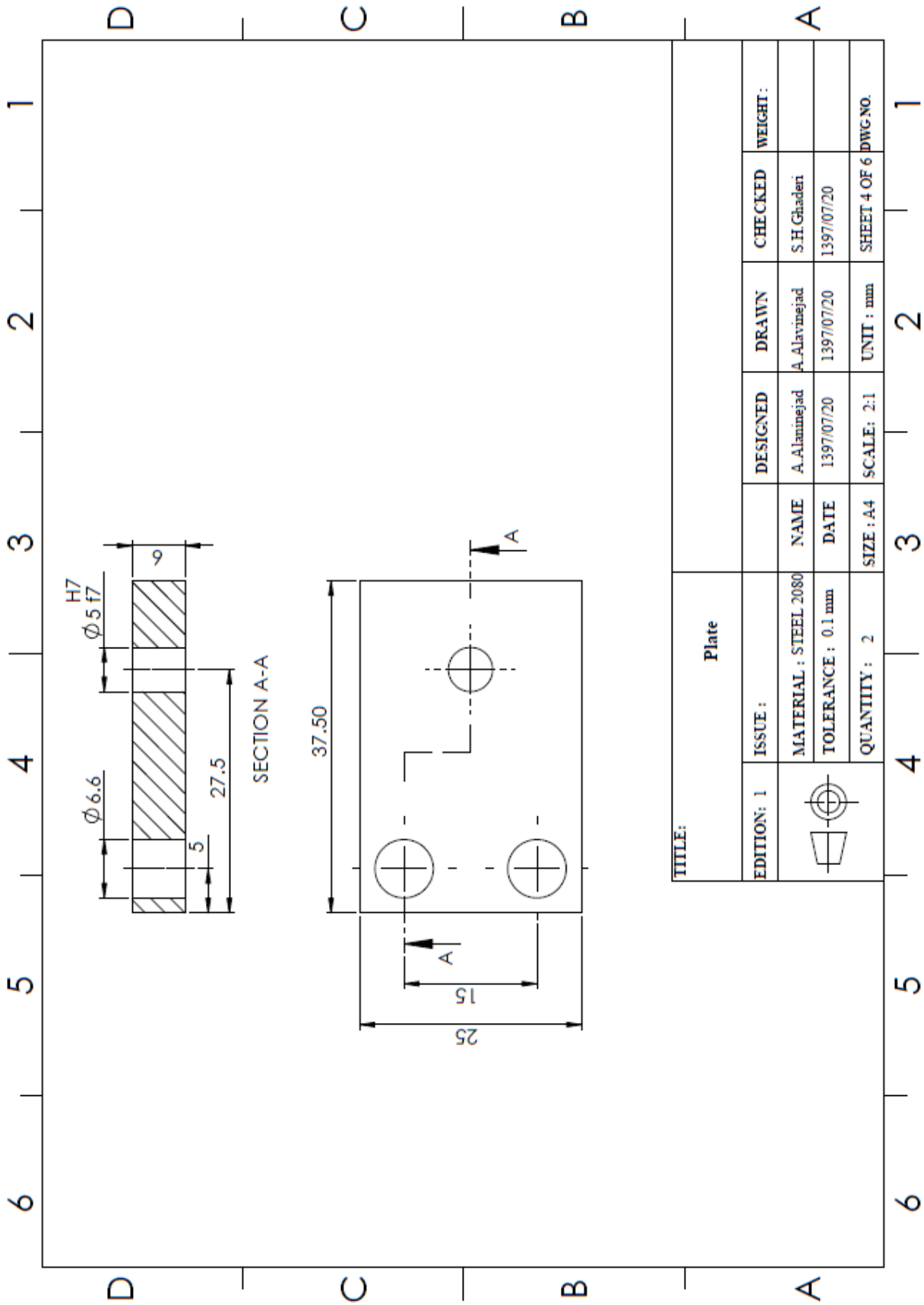


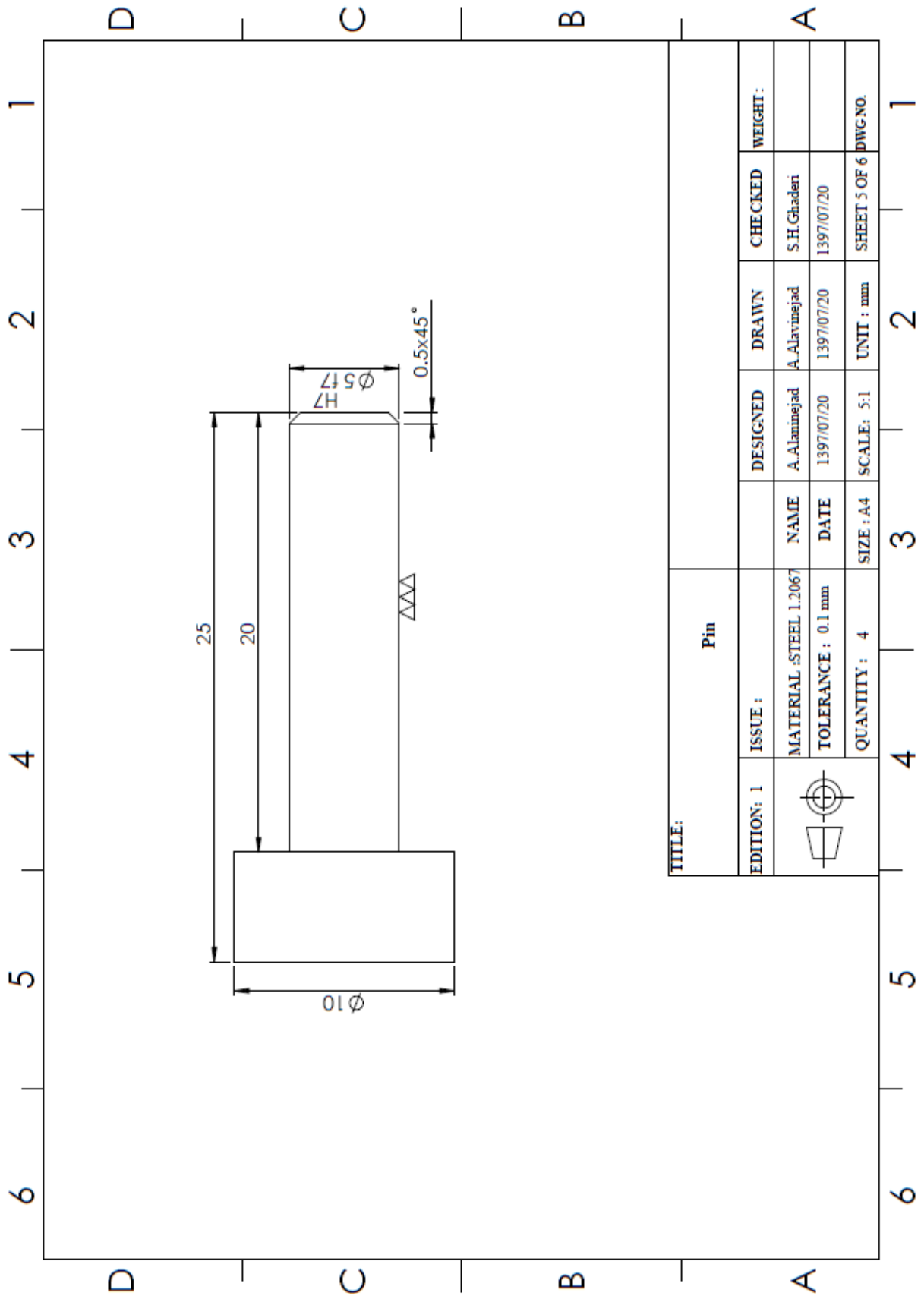
| NO. | TITLE | MATERIAL | QTY. |
|-----|----------------------------|--------------|------|
| 6 | plate2 | STEEL 2080 | 2 |
| 5 | body1 | STEEL 1215 | 1 |
| 4 | DIN 6912 - M6 x 16 --- 16N | | 8 |
| 3 | pin | STEEL 1.2067 | 4 |
| 2 | plate | STEEL 2080 | 2 |
| 1 | body2 | STEEL 1215 | 1 |

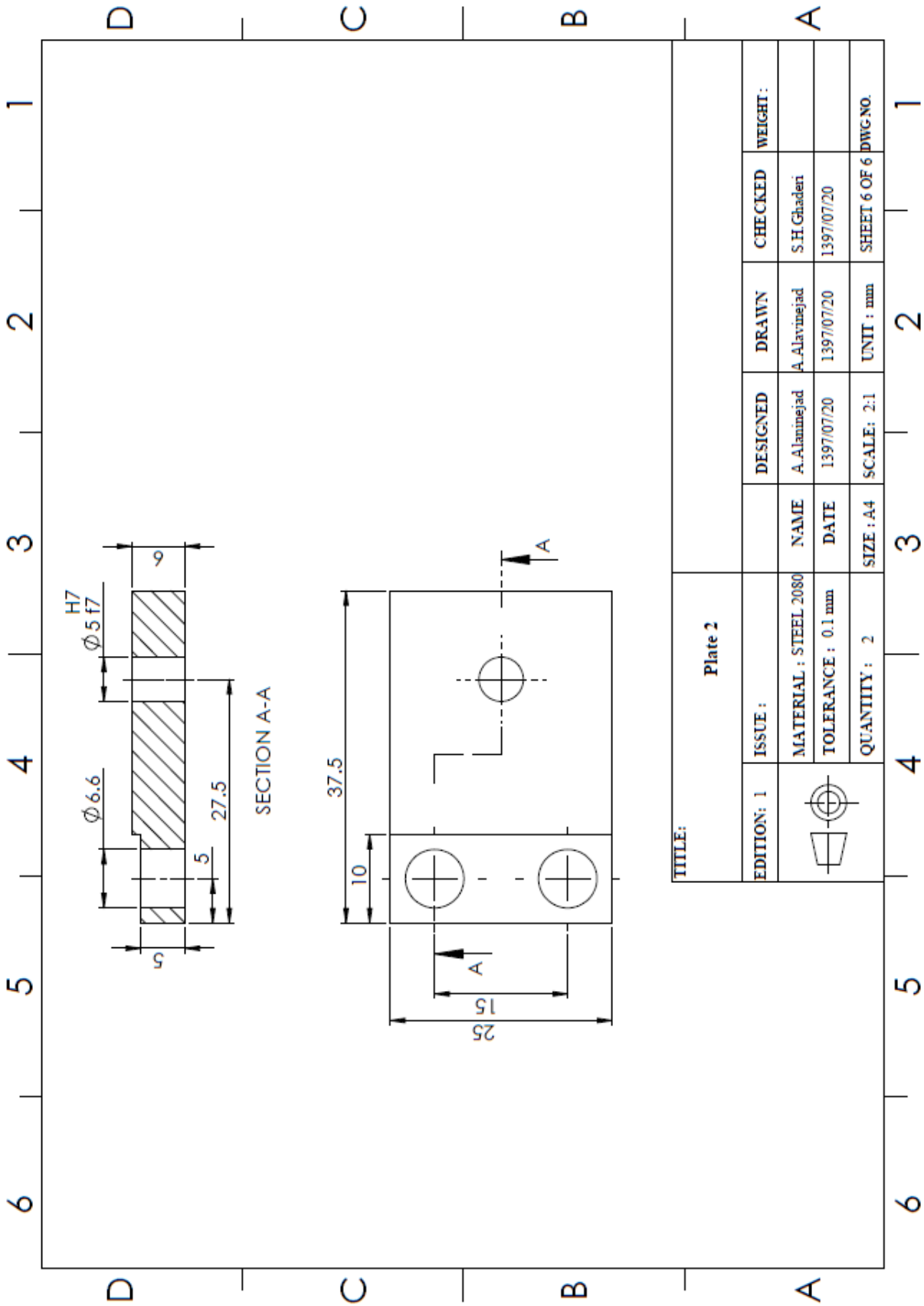
| EDITION: 1 | | ISSUE : | DESIGNED | DRAWN | CHECKED | WEIGHT : |
|---------------------------------|--|---------|---------------|---------------|----------------------|----------|
| TITLE: Tensile strength Fixture | | | A. Alavinejad | A. Alavinejad | S.H. Ghaderi | |
| MATERIAL : | | | 1397/07/20 | 1397/07/20 | 1397/07/20 | |
| TOLERANCE : | | | SCALE: 1:1 | UNIT : mm | SHEET 1 OF 6 DWG.NO. | |
| QUANTITY : 1 | | | | | | |











پیوست ج - برگه مشخصات خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی ورق DOCOL 1400M

DOCOL[®]
THE AUTOMOTIVE STEEL

Data sheet 2139 Docol 1400M 2018-08-22

Docol 1400M

General Product Description

Docol 1400M martensitic steel helps improve crashworthiness and ensure a lightweight design and cost-efficient production methods for the automotive industry. Docol is one of the strongest cold rolled advanced high-strength steels on the market and has become the material of choice for automotive applications such as side impact beams, bumpers and structural components.

Dimension Range

Cold rolled / UC: thickness 0.50-2.10 mm, width up to 1527 mm.

Cold rolled / EG: thickness 0.80-1.80 mm, width up to 1200 mm.

Slit strip and cut to length sheets are available upon request.

Grade and coating specific restrictions on available dimensions may occur.

Mechanical Properties

| Steel grade | Standard | Coating | Test direction | Yield strength R _{0.2} (MPa) | Tensile strength R _m (MPa) | Elongation A ₈₀ (min %) | Min. inner bending radius for 90° |
|---------------------------|----------|---------|----------------|---|---|---------------------------------------|---|
| Docol CR1150Y 1400T-MS | SSAB | UC, EG | T | 1150 - | 1400 - 1600 | 3 | 4.0 x t |

The testing of mechanical properties of electrogalvanized products is conducted without coating.

Chemical Composition (Ladle analysis)

| Steel grade | Coating | C (max %) | Si (max %) | Mn (max %) | P (max %) | S (max %) | Al (min %) | Nb+Ti (max %) |
|-------------------------------|---------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|------------------|
| Docol CR 1150Y1400T- MS | UC, EG | 0.20 | 0.40 | 1.60 | 0.020 | 0.010 | 0.015 | 0.10 |

Tolerances

Cold rolled (UC, EG): Tolerances in accordance to EN10131.

Customized dimension tolerances available upon request.

Following improved flatness tolerances are available upon request: ¹⁾

| Thickness (mm) | Max height ²⁾ (mm) |
|----------------|-------------------------------|
| 0.80 - 0.99 | 8 |
| 1.00 - 1.39 | 7 |
| 1.40 - 1.59 | 6 |
| 1.60 - 1.79 | 5 |
| 1.80 - 2.10 | 4 |

¹⁾ EG coated martensitic grades are supplied with improved flatness tolerances.

²⁾ Distance from the top surface of the strip normal to a flat surface. Measured with a ruler on sheets of mother coil width and minimum length 1500 mm. Cross bow and coil set excluded.

SSAB

Coatings and Surface Treatments

Coatings

The metal coating options for Docol products include:

Electrogalvanized coating (EG) is applied continuously by electro deposition. The coating consists of zinc (>99%). Electrogalvanized steel is characterized by its excellent surface quality and uniform coating thickness.

Grade specific availability of metal coatings for Docol products is given in the Mechanical properties table (Coating).

| Coating type | Coating class | Standard | Closest in EN10346, informative | Coating mass per side, Single spot test (g/m ²) | Thickness per side, informative (μm) |
|--------------|---------------|----------|---------------------------------|---|--------------------------------------|
| EG | ZE25/25 | EN 10152 | - | 12 - | 1,7 - |
| EG | ZE50/50 | EN 10152 | - | 29 - | 4,1 - |
| EG | ZE75/75 | EN 10152 | - | 47 - | 6,6 - |
| EG | ZE100/100 | EN 10152 | - | 65 - | 9,1 - |

Docol metal coated products are available with surface quality for unexposed applications.

In addition to these coating masses, OEM specific coatings and single sided EG coatings are available upon request.

Surface Treatments

Uncoated (UC): available as oiled

Electrogalvanized (EG): available as oiled and/or chemically passivated or phosphated

All surface treatments are in accordance with RoHS directive (2011/65/EU) and do not contain Chromium VI (Cr⁶⁺). Surface treatments provide only temporary surface protection during transportation and storage. In order to avoid corrosion damages, care must be taken to keep the products dry during transportation and storage. If they become wet, they must be separated and situated so that they are dried quickly.

Fabrication and Other Recommendations

For information concerning fabrication, see SSAB's brochures on www.ssab.com or consult Tech Support, techsupport@ssab.com.

Appropriate health and safety precautions must be taken when bending, welding, cutting, grinding or otherwise working on the product.

Contact Information

www.ssab.com/contact

منبعها

- [1] F. Heßeln and M. C. Wanner, "Ultrasonic Assisted Clinching of Aluminium Alloy Sheets," *Adv. Mater. Res.*, vol. 966–967, pp. 641–650, 2014.
- [2] J. Osten, P. Söllig, M. Reich, J. Kalich, U. Füssel, and O. Keßler, "Softening of High-Strength Steel for Laser Assisted Clinching," *Adv. Mater. Res.*, vol. 966–967, pp. 617–627, 2014.
- [3] K. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, and A. E. Tekkaya, "Joining by plastic deformation," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 62, no. 2, pp. 673–694, 2013.
- [4] P. Groche, S. Wohletz, M. Brenneis, C. Pabst, and F. Resch, "Joining by forming—A review on joint mechanisms, applications and future trends," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 10, pp. 1972–1994, 2014.
- [5] M. M. Eshtayeh, M. Hrairi, and A. K. M. Mohiuddin, "Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 82, no. 1–4, pp. 179–195, 2016.
- [6] "Deutsches Reichspatent (1897) DRP-No. 98517 (in German)."
- [7] J. Varis, "Ensuring the integrity in clinching process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 174, no. 1–3, pp. 277–285, 2006.
- [8] F. Lambiasi, "Influence of process parameters in mechanical clinching with extensible dies," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 9–12, pp. 2123–2131, 2013.
- [9] E. Roux and P. O. Bouchard, "Kriging metamodel global optimization of clinching joining processes accounting for ductile damage," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 7, pp. 1038–1047, 2013.
- [10] S. Lee, C. Lee, B. Kim, M. Ahn, B. Kim, and D. Ko, "Effect of Tool Shape on Hole Clinching for CFRP with Steel and Aluminum Alloy Sheet," *Key Eng. Mater.*, vol. 622, pp. 476–483, 2014.
- [11] C. J. Lee, J. M. Lee, H. Y. Ryu, K. H. Lee, B. M. Kim, and D. C. Ko, "Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials - Al6061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 10, pp. 2169–2178, 2014.
- [12] X. Han, S. Zhao, C. Chen, C. Liu, and F. Xu, "Optimization of geometrical design of clinching tools in clinching process with extensible dies," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 231, no. 21, pp. 3889–3897, 2017.
- [13] Y. Abe, T. Kato, and K. Mori, "Joining of Aluminium Alloy and Mild Steel Sheets Using Mechanical Clinching," *Mater. Sci. Forum*, vol. 561, pp. 1043–1046, 2007.
- [14] Y. Abe, M. Kishimoto, T. Kato, and K. Mori, "Joining of hot-dip coated steel sheets by mechanical clinching," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 2, no. 1, pp. 291–294, 2009.
- [15] T. Balawender, "Experimental Investigation of Clinch Joining Process," *Acta Mech. Slovaca*, vol. 16, no. 1, pp. 52–56, 2012.
- [16] K. Mori, Y. Abe, and T. Kato, "Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 9, pp. 1900–1905, 2012.
- [17] X. He *et al.*, "Numerical and experimental investigations of extensible die clinching,"

- Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 74, no. 9–12, pp. 1229–1236, 2014.
- [18] L. Zhao, X.-C. He, and Y. Lu, “Study on clinching of titanium alloy,” in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 633–634, p. 86–89, Switzerland.
- [19] Y. Gao, Z.-X. Liu, and P.-C. Wang, “Effect of aging on the strength of clinching galvanized SAE1004 steel-to-aluminum AA6111 joints,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 136, no. 4, p. 41016, 2014.
- [20] J. Varis, “Economics of clinched joint compared to riveted joint and example of applying calculations to a volume product,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 172, no. 1, pp. 130–138, 2006.
- [21] C. J. Lee, J. Y. Kim, S. K. Lee, D. C. Ko, and B. M. Kim, “Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 4, pp. 1854–1861, 2010.
- [22] Y. Abe, K. Mori, and T. Kato, “Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 4, pp. 884–889, 2012.
- [23] T. Wen, Q. Huang, Q. Liu, W. X. Ou, and S. Zhang, “Joining different metallic sheets without protrusion by flat hole clinching process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 85, no. 1–4, pp. 217–225, 2016.
- [24] C. J. Lee, S. H. Lee, J. M. Lee, B. H. Kim, B. M. Kim, and D. C. Ko, “Design of hole-clinching process for joining CFRP and aluminum alloy sheet,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 15, no. 6, pp. 1151–1157, 2014.
- [25] K. R. Jagtap, S. Y. Ghorpade, and S. E. Chopade, “Finite Element Analysis of Mechanical Clinching Process,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 8104–8110, 2017.
- [26] X. Han, S. Zhao, C. Chen, C. Liu, and F. Xu, “Optimization of geometrical design of clinching tools in flat-clinching,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 231, no. 21, pp. 4012–4021, 2017.
- [27] B. Maier, M. Klingler, S. Böhm, and B. Awiszus, “Simulation-Based Investigation of the Influence of Process Parameter Deviations on the Quality of Clinch Connections with Preformed Hole,” in *Materials Science Forum*, 2019, vol. 949, p. 112–118, Switzerland.
- [28] S. Busse, M. Merklein, K. Roll, M. Ruther, and M. Zürn, “Development of a mechanical joining process for automotive body-in-white production,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. 1, pp. 1059–1062, 2010.
- [29] J. Mucha, “The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 10, pp. 4943–4954, 2011.
- [30] F. Lambiase and A. Di Ilio, “Optimization of the clinching tools by means of integrated FE modeling and artificial intelligence techniques,” *Procedia Cirp*, vol. 12, no. 32, pp. 163–168, 2013.
- [31] E. M and M. Hrairi, “Multi objective optimization of clinching joints quality using Grey-based Taguchi method,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 1–4, pp. 233–249, 2016.
- [32] T. Wen, H. Wang, C. Yang, and L. T. Liu, “On a reshaping method of clinched joints to reduce the protrusion height,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 71, no. 9–12, pp. 1709–1715, 2014.
- [33] Y. Abe, T. Kato, K. I. Mori, and S. Nishino, “Mechanical clinching of ultra-high strength

- steel sheets and strength of joints,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 10, pp. 2112–2118, 2014.
- [34] L. Kascak, E. Spisak, and J. Mucha, “Mechanical Joining of Various Materials by Clinching Method,” in *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 662, p. 205–208, Switzerland.
- [35] ی. حصارى، محمدامین، هانف، سرداری و محمدعلی، مدل سازی و آنالیز با نرم افزار آباکوس. انتشارات فروزش، ۱۳۸۶.
- [36] خلخالی، ا. تحلیل اجزای محدود به کمک آباکوس. انتشارات دیباگران تهران، ۱۳۸۹.
- [37] J. P. Varis, “The suitability of round clinching tools for high strength structural steel,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 40, no. 3, pp. 225–238, 2002.
- [38] C. Lee, J. Kim, S. Lee, D. Ko, and B. Kim, “Parametric study on mechanical clinching process for joining aluminum alloy and high-strength steel sheets,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 123–126, 2010.
- [39] T. Kato, Y. Abe, and K. Mori, “Plastic joining of dissimilar material of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets steel and aluminium alloy sheets,” *Weld. Int.*, vol. 22, no. 9, pp. 575–581, 2008.
- [40] B. T. Sadowski T, “Technological Aspects of Manufacturing and Numerical Modelling of Clinch-Adhesive Joints,” in *Technological Aspects of Manufacturing and Numerical Modelling of Clinch-Adhesive Joints*, 2015, pp. 1–59.
- [41] R. Majji, Y. Xiang, S. Ding, and C. Yang, “Case Studies on Chain-die Forming for AHSS,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1063, no. 1, p. 12174, 2018.
- [42] M. Eshteyah, M. Hrairi, M. S. Dawood, and A. K. M. Mohiuddin, “Finite Element Modeling of Clinching Process for Joining Dissimilar Materials,” in *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1115, p. 109–112, Switzerland.
- [43] *B28 4250, ELECTRICALLY OPERATED CABLE GLASS LIFT, PSA PEUGEOT - CITROEN TRANSLATED STANDARD, Normes véhicules, 2006, Page14.* .
- [44] C. Lee, G. Shen, B. Kim, F. Lambiase, and D. Ko, “Analysis of Failure-Mode Dependent Joint Strength in Hole Clinching from the Aspects of Geometrical Interlocking Parameters,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 12, p. 1020, 2018.

Abstract

Nowadays, concerns regarding reducing the weight of automobiles to reduce fuel consumption has made the automotive industry more inclined to use high strength steel sheets. Joining these types of steel sheets to similar and dissimilar steel sheets is a challenge for their application. Sheet metal clinching process is a forming-based method for mechanical joining of metal sheet parts. In this dissertation, first, clinching of DX51D galvanized steel sheets of 1.5 and 2 mm in thickness (DX51D/DX51D joint), as an alternative for spot welding process in a special application for car manufacturing industry, using a grooved die was studied. Then, a new method for hole clinching of 1 mm thick Docol sheet to 1.5 mm thick DX51D sheet (Docol/DX51D joint) using a conical die was presented. In order to make sure about the strength of the joint, the tooling should have optimum design. Consequently, after characterizing the mechanical properties of raw materials, based on orthogonal experimental design (OED), and finite element analysis, most influencing parameters of the forming tool were optimized for achieving maximum joint strength. Nine tests for clinching process of DX51D/DX51D sheets and 27 experiments for hole clinching process of DX51D/DOCOL sheets were designed using Minitab software. Parametric studies tool and explicit solver of Abaqus software were used to analyze the designed experiments. Parametric input files were generated and used to change the process parameters in the simulations. After running the experiments designed based on the OED in computer, optimal values of the important parameters affecting the tool design were obtained for both methods of clinching. The maximum tensile strengths of 2319 N and 3509 N were obtained for clinching of DX51D / DX51D and DX51D / DOCOL, respectively. Next, clinching tools were designed and fabricated based on these optimum geometric parameters. The clinching and hole clinching process were successfully done using the fabricated tooling. Tensile strength and geometry profiles of clinched samples were measured. Comparison of the experimental and simulation results shows a good agreement between them. Based on the demands of car manufacturing standards, DX51D/DX51D clinch joint using grooved die, can replace the conventional spot welding method in the particular case studied. Further, the results showed that using conical fixed die as a new design, for hole clinching DX51D/DOCOL, the joint strength can increase by 18% compared to the hole clinching using cylindrical die.

Keywords: Clinching, Orthogonal experimental design method, Optimization, Finite element analysis, joining strength



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Title

Experimental and analytical study on clinching of advanced high strength steel sheets

by

S. A. Alavinejad

Supervisor

Dr. S. H. Ghaderi

September 2019