

به نام خدا



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید

عنوان
ارائه یک راه کار جدید نظری-تجربی برای ارزیابی اصطکاک در شکل دهی ورق های فلزی

نگارش
حسین جاودانی

استاد راهنما
مهدی گردویی

بهمن ۱۴۰۰

فرم شماره ۶: صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین جاودانی به شماره دانشجویی ۹۷۰۴۷۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان ارائه یک راه کار جدید نظری-تجربی برای ارزیابی اصطکاک در شکل دهی ورق های فلزی که در تاریخ/...../..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

دفاع	☐	قبول (با درجه : امتیاز)
	☐	مردود
	☐	مجدد

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر مهدی گردویی	دانشیار	
۲- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی حیدری	استادیار	
۳- استاد ممتحن اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۴- استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی وحدتی	استادیار	

رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تقدیم نامہ

تقدیم بہ مادر و پدر عزیزم

سپاس‌گزاری

بر خود لازم می‌دانم تا در انتهای این پژوهش، از پدر دلسوز و مادر فداکارم که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یابوری بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند و همچنین از استاد گران‌قدر، جناب آقای دکتر مهدی گردویی به‌منظور راهنمایی‌ها و دلسوزی‌های ایشان در انجام این کار، سپاس‌گزاری نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر حسن غفوریان نصرتی و جناب آقای مهندس شهرام امیرعبدالهیان و جناب آقای مهندس صادق مرادی و جناب آقای مهندس حسن فدایی که در انجام این پژوهش به بنده کمک کرده‌اند، سپاس‌گزاری می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب حسین جاودانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه ارائه یک راه‌کار جدید نظری-تجربی برای ارزیابی اصطکاک در شکل‌دهی ورق‌های فلزی تحت راهنمایی دکتر مهدی گردویی

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 به‌دست 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، نرم‌افزارها 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.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

مطالعه اصطکاک در فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی به علت اثرات شاخص آن بر روی دقت ابعادی، کیفیت سطح محصول، نیرو و انرژی مصرفی دارای اهمیت است. در اختیار داشتن دانش کافی از مقدار اصطکاک تماسی و نحوه اثرگذاری آن بر مولفه‌های فوق کمک شایانی به مدل‌سازی و طراحی فرایند خواهد کرد. در این پژوهش به بررسی تحلیلی-عددی-تجربی ضریب اصطکاک در فرایند اتساع ورق فولادی DC04 به عنوان یک ماده اولیه پرکاربرد در صنعت خودروسازی پرداخته شده است. در بخش تجربی با اجرای آزمون کشش تک‌محوری در زاویه‌های 0° ، 45° و 90° نسبت به راستای نورد، ضرایب ناهمسانگردی پلاستیک، ثوابت سخت‌شوندگی مدل توانی و دیگر مولفه‌های مکانیکی جنس ماده به دست آمد. در ادامه، ضمن ارائه یک روش تحلیلی پلاستیسیته کلاسیک برای فرایند اتساع ورق، مبتنی بر معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل-۴۸ و قانون جریان مرتبط، مولفه‌های تنش و کرنش در نواحی مختلف قطعه محاسبه شد. در این روش با نوشتن معادلات تعادل در سطوح تماسی ورق با اجزای قالب، اثر نیروهای اصطکاکی با استفاده از مدل کولمب بر توزیع تنش بررسی شد. از حل تحلیلی توزیع تنش، کرنش و تغییرات ضخامت در نواحی مختلف و همچنین نیروی شکل‌دهی محاسبه شد. در بخش عددی، فرایند اتساع برای دو حالت شامل قطعه کار سالم و سوراخ‌دار، با ضرایب اصطکاک ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ شبیه‌سازی شد و به کمک آن دو نوع نمودار کالیبراسیون اصطکاکی که به ترتیب مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش و قطر گشودگی قطعه کار سالم و قطعه کار سوراخ‌دار است، معرفی شد. پس از طراحی و ساخت قالب اتساع، کشش نمونه‌های سالم و سوراخ‌دار بدون روان‌کار و با روان‌کار گریس و نایلون برای چند جابجایی مختلف انجام و مقادیر کرنش، تنش، ضخامت و قطر گشودگی دایره‌ای محاسبه شد و به کمک آن مقادیر دقیق ضریب اصطکاک منطبق بر منحنی‌های کالیبراسیون طراحی شده در بخش عددی به دست آمد. همچنین نتایج تحلیلی به کمک نتایج تجربی با دقت قابل قبولی راستی‌آزمایی شد.

واژگان کلیدی: شکل‌دهی ورق فلزی، اصطکاک، فرایند اتساع، منحنی کالیبراسیون، ناهمسانگردی پلاستیک، ورق DC04، مهرزنی.

دستاوردهای مستخرج از پایان نامه

- ۱- ح. جاودانی، م. گردویی، "بررسی تحلیلی-تجربی فرایند اتساع ورق ناهمسانگرد فلزی: مطالعه موردی بر روی فولاد DC04" مجله علمی پژوهشی سازه‌ها و شاره‌ها (در دست داوری)
- ۲- اختراع "دستگاه اندازه‌گیری اصطکاک در فرایند اتساع ورق فلزی" (در حال بررسی)

فهرست عنوان‌ها

تقدیم‌نامه	ث
سپاس‌گزاری	ج
تعهدنامه	ح
چکیده	خ
دستاوردهای مستخرج از پایان‌نامه	د
فهرست عنوان‌ها	ذ
فهرست شکل‌ها	ز
فهرست جدول‌ها	ص
فهرست نشانه‌ها	ض
فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۱
۲-۱ معرفی فرایند اتساع	۱
۳-۱ اصطکاک در شکل‌دهی ورق‌های فلزی	۲
۴-۱ مدل‌های اصطکاک	۳
۵-۱ مکانیزم‌های روان‌کاری	۴
۶-۱ ناهمسانگردی پلاستیک	۷
۷-۱ اندازه‌گیری ناهمسانگردی پلاستیک	۷
۸-۱ معیار تسلیم و مدل سخت‌شوندگی	۹
۹-۱ پیشینه پژوهش	۹
۱۰-۱ معرفی پایان‌نامه، ضرورت و نوآوری	۱۸
فصل ۲ مواد و روش تجربی	۲۱
۱-۲ مقدمه	۲۱
۲-۲ معرفی فولاد DC04	۲۱
۳-۲ معرفی دستگاه کشش-فشار سنتام	۲۲
۴-۲ آماده‌سازی نمونه آزمایش کشش	۲۵

۲۵.....	۵-۲ محاسبه تنش تسلیم و تعیین ثوابت قانون توانی
۲۶.....	۶-۲ محاسبه ضریب ناهمسانگردی ورق فولادی
۲۷.....	۷-۲ طراحی و ساخت قالب
۲۸.....	۸-۲ دستگاه سختی سنج یونیورسال
۲۹.....	۹-۲ دستگاه زبری سنج سطح
۳۱.....	۱۰-۲ آماده سازی بلانک اولیه و شرایط روان کاری
۳۲.....	۱۱-۲ شرح انجام آزمایش

فصل ۳ حل تحلیلی و عددی فرایند اتساع..... ۳۵

۳۵.....	۱-۳ مقدمه
۳۵.....	۲-۳ تحلیل فرایند اتساع
۴۰.....	۳-۳ مدل سازی عددی فرایند اتساع در نرم افزار آباکوس

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۴۷

۴۷.....	۱-۴ مقدمه
۴۷.....	۲-۴ نتایج اتساع بلانک سالم
۴۷.....	۱-۱-۴ نتایج تحلیلی
۵۱.....	۲-۱-۴ مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی
۵۵.....	۳-۱-۴ نتایج شبیه سازی اجزای محدود
۵۸.....	۴-۱-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی
۶۰.....	۳-۴ نتایج اتساع بلانک دارای گشودگی
۶۰.....	۱-۲-۴ نتایج شبیه سازی اجزای محدود
۶۳.....	۲-۲-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها..... ۶۷

۶۷.....	۱-۵ نتیجه گیری
۶۹.....	۲-۵ پیشنهادها

پیوست ۱: نقشه اجزای قالب اتساع..... ۷۱

پیوست ۲: کد متلب حل تحلیلی فرایند اتساع ورق DC04..... ۷۴

مراجع..... ۷۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) نمای برش خورده چیدمان قالب اتساع ساده ۲
- شکل (۲-۱) مدل‌های اصطکاکی ۴
- شکل (۳-۱) تماس سطح ابزار با قطعه کار در شرایط استفاده از روان کار ۵
- شکل (۴-۱) تغییرات ضریب اصطکاک و ضخامت لایه روان کار در شرایط روان کاری مختلف ۶
- شکل (۵-۱) محورهای اصلی ورق‌های فلزی نورد شده ۷
- شکل (۶-۱) هندسه نمونه ۸
- شکل (۷-۱) آزمون کشش تسمه برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ۱۲
- شکل (۸-۱) تجهیزات آزمایشگاهی فیگوریدو و همکاران ۱۴
- شکل (۹-۱) طرحی از شبیه‌ساز آزمون اصطکاک ویلسون ۱۵
- شکل (۱۰-۱) طرح‌واره آزمون اصطکاک OSU ۱۶
- شکل (۱۱-۱) طرح‌واره تجهیزات آزمون اصطکاک تسمه وانگ و همکاران ۱۷
- شکل (۱-۲) نمودار تنش-کرنش مهندسی DC04 ۲۲
- شکل (۲-۲) نمای کلی دستگاه کشش-فشار سنتام STD-600 ۲۳
- شکل (۳-۲) حسگر تغییر طول سنج سنتام ۲۴
- شکل (۴-۲) نمونه در حالت کشش تک‌محوری همراه با حسگر تغییر طول سنج ۲۴
- شکل (۵-۲) نمونه آزمون کشش استاندارد ۲۵
- شکل (۶-۲) محاسبه ثوابت قانون توانی با نمودار لگاریتمی ۲۶
- شکل (۷-۲) نمونه‌های علامت گذاری شده برای محاسبه تغییر طول نمونه ۲۶
- شکل (۸-۲) نمای انفجاری چیدمان قالب ۲۷
- شکل (۹-۲) چیدمان قالب اتساع ۲۸
- شکل (۱۰-۲) دستگاه سختی سنجی یونیورسال ۲۹
- شکل (۱۱-۲) جهت‌های انجام آزمایش تعیین زبری سطح ۳۰

شکل (۱۲-۲) سنجش زبری سطح	۳۱
شکل (۱۳-۲) نمونه مش‌بندی شده با رنگ روغن و نمونه با مش سوراخ‌دار	۳۱
شکل (۱۴-۲) استفاده از دو روان‌کار نایلون و گریس بر روی نمونه	۳۲
شکل (۱-۳) طرح‌واره نمونه اتساع شده و جهات اصلی آن	۳۵
شکل (۲-۳) نیمه راست چیدمان قالب اتساع	۳۶
شکل (۳-۳) بررسی تعادل استاتیکی	۳۹
شکل (۴-۳) نیروهای داخلی و خارجی اعمالی به ورق و سنبه	۴۰
شکل (۵-۳) چیدمان قالب و قطعه‌کار سالم طراحی شده در نرم‌افزار آباکوس	۴۱
شکل (۶-۳) شرایط مرزی اعمالی بر بلانک شبیه‌سازی شده	۴۱
شکل (۷-۳) تنش-کرنش پلاستیک	۴۲
شکل (۸-۳) نحوه مش‌بندی قطعه‌کار سالم در نرم‌افزار آباکوس	۴۳
شکل (۹-۳) مش بهینه قطعه‌کار سالم	۴۳
شکل (۱۰-۳) نحوه مش‌بندی قطعه‌کار سوراخ‌دار در نرم‌افزار آباکوس	۴۴
شکل (۱۱-۳) مش بهینه قطعه‌کار سوراخ‌دار	۴۴
شکل (۱۲-۳) مقایسه انرژی جنبشی با انرژی داخلی	۴۵
شکل (۱-۴) نیروی اتساع نسبت به نفوذ سنبه به‌دست آمده از روش تحلیلی	۴۸
شکل (۲-۴) تغییرات کرنش بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک $0/3$	۴۸
شکل (۳-۴) تغییرات تنش بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک $0/3$	۴۹
شکل (۴-۴) تغییرات فشار بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک $0/3$	۵۰
شکل (۵-۴) تغییرات ضخامت بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک $0/3$	۵۰
شکل (۶-۴) بلانک سالم مش‌بندی شده با چاپ سیلک پس از شکل‌دهی با سه جابجایی مختلف سنبه	۵۱
شکل (۷-۴) نیروی شکل‌دهی نسبت به نفوذ سنبه به‌دست آمده از روش تحلیلی و آزمون اتساع	۵۲
شکل (۸-۴) شکل‌دهی قطعه‌کار سالم	۵۲

- شکل (۹-۴) نمودار کرنش طولی بر روی مسیر طولی نمونه حاصل از روش تحلیلی و تجربی ۵۳
- شکل (۱۰-۴) تغییرات تنش بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک 0.3 و آزمون تجربی اتساع ۵۴
- شکل (۱۱-۴) تغییرات ضخامت بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک 0.3 و آزمون تجربی اتساع ۵۴
- شکل (۱۲-۴) تاثیر اندازه مش بر کرنش پلاستیک معادل در شبیه‌سازی اتساع بلانک سالم ۵۵
- شکل (۱۳-۴) تاثیر اندازه مش بر تنش موثر فون میسز در شبیه‌سازی اتساع بلانک سالم ۵۵
- شکل (۱۴-۴) نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه کار سالم با ضریب اصطکاک 0.3 و نفوذ سنبه 21 ۵۶
- شکل (۱۵-۴) نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه کار سالم با ضریب اصطکاک 0.2 و نفوذ سنبه 21 ۵۷
- شکل (۱۶-۴) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی به‌دست آمده از شبیه‌سازی اتساع بلانک سالم ۵۷
- شکل (۱۷-۴) نیروی شکل‌دهی نسبت به نفوذ سنبه به‌دست آمده از شبیه‌سازی و آزمون تجربی اتساع ۵۸
- شکل (۱۸-۴) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی قطعه کار با مش رنگ روغن ۵۹
- شکل (۱۹-۴) تاثیر اندازه مش بر درصد افزایش شاخص اصطکاک نسبت به درصد نفوذ سنبه در شبیه‌سازی اتساع بلانک سوراخ‌دار ۶۱
- شکل (۲۰-۴) نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه کار سوراخ‌دار در ضریب اصطکاک 0.3 و نفوذ سنبه $15/75$ ۶۱
- شکل (۲۱-۴) نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه کار سوراخ‌دار در ضریب اصطکاک 0.2 و نفوذ سنبه $15/75$ ۶۲
- شکل (۲۲-۴) نمودار کالیبراسیون اصطکاک قطعه کار سوراخ‌دار ۶۲
- شکل (۲۳-۴) قطعه کارهای با مش سوراخ‌دار شده با جابجایی مختلف سنبه ۶۳
- شکل (۲۴-۴) نیروی شکل‌دهی نسبت به نفوذ سنبه به‌دست آمده از شبیه‌سازی و آزمون تجربی اتساع ۶۴
- شکل (۲۵-۴) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی قطعه کار سوراخ‌دار ۶۴

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) ورق فولادی DC04	۲۲
جدول (۲-۲) خواص مکانیکی ورق DC04	۲۲
جدول (۳-۲) مشخصات مکانیکی دستگاه کشش-فشار سنتام STD-600	۲۳
جدول (۴-۲) داده‌های آزمایش زبری سطح سنبه	۳۰
جدول (۵-۲) آزمون‌های طراحی شده فرایند اتساع	۳۳
جدول (۱-۳) بخش‌های مختلف ورق در زمان انجام فرایند اتساع	۳۶
جدول (۲-۳) خواص مکانیکی ورق فولادی DC04	۴۲
جدول (۳-۳) ثوابت مورد استفاده برای تعریف ناهمسانگردی در نرم‌افزار آباکوس	۴۲
جدول (۱-۴) اصطکاک قطعه‌کار با مش رنگ روغن	۶۰
جدول (۲-۴) اصطکاک قطعه‌کار سوراخ‌دار	۶۵

فهرست نشانه‌ها

نسبت تنش	α	نیروی سنبه (N)	F_s
نسبت کرنش	β	F, G, H, L, M و N ثوابت معیار تسلیم هیل ۴۸	
ناهمسانگردی صفحه‌ای	Δr	ضریب سختی (MPa)	K
مولفه تانسور کرنش پلاستیک	ε_{ij}	توان کرنش سختی	n
گران‌روی روان کار	η	جهت نرمال	ND
ضریب اصطکاک کولمب	μ	ضریب اصطکاک چسبنده	m_f
تنش نرمال (MPa)	σ_n	فشار وارد نرمال (N/mm^2)	P
مولفه تانسور تنش پلاستیک	σ_{ij}	فشار نرمال بحرانی (N/mm^2)	P^*
تنش برشی اصطکاکی (MPa)	τ	شعاع کمان سنبه (mm)	R
		ناهمسانگردی پلاستیک در نرم‌افزار آباکوس	R
		جهت نورد ورق	RD
		ضریب ناهمسانگردی	r
		ناهمسانگردی نرمال	$\bar{r}$
		جهت عرضی نورد	TD
		ضخامت اولیه ورق (mm)	t_0
		سرعت لغزش روان کار (m/s)	v

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ مقدمه

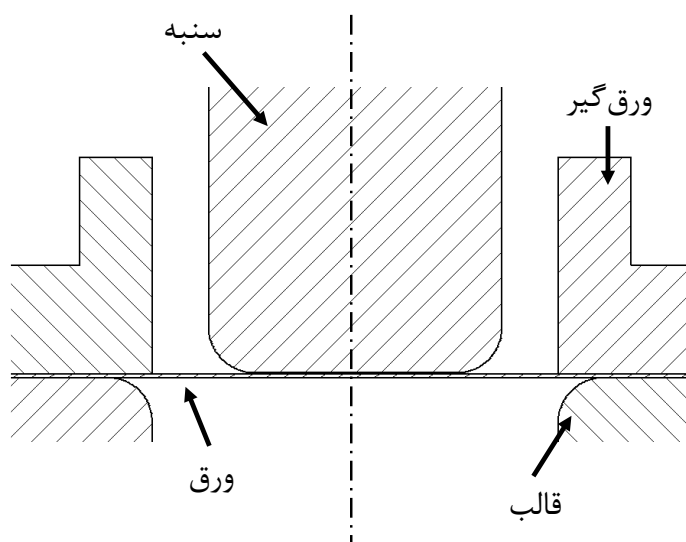
امروزه به دلیل پیشرفت علم و فناوری و ضرورت تولید قطعات صنعتی با دقت و صحت بالا، شناخت و کنترل عوامل موثر بر فرایند تولید از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو مهندسان ساخت و تولید به دنبال ارائه روش‌هایی هستند که به وسیله آن‌ها بتوانند قطعاتی با تolerانس‌های بسته‌تری تولید و عرضه کنند. یکی از این روش‌ها کنترل اصطکاک در فرایندهای مختلف شکل‌دهی از جمله فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی است.

۱-۲ معرفی فرایند اتساع^۱

اتساع، فرایند شکل‌دهی قطعات کم عمق، دقیق و پر استحکام در یک پرس با کشش ورق بر روی یک مجموعه سنبه و ماتریس است. در این مجموعه نیروی ورق‌گیر از سر خوردن ورق (بلانک) جلوگیری می‌کند. طرح‌واره یک قالب اتساع در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. در این نوع قالب، بلانک در لبه‌ها با استفاده از نیروی جک هیدرولیکی (یا پیچ) توسط یک نگهدارنده بلانک مهار می‌شود. در فرایند اتساع تماس سنبه با ابزار در بیشتر موارد فقط در یک طرف ورق صورت می‌گیرد و در بیشتر مناطق فشار تماس در مقایسه با تنش جریان ورق اندک است و معمولاً نادیده گرفتن تنش‌های ضخامت و فرض تغییر شکل تنش صفحه‌ای قابل قبول است.

^۱ Stamping

فرایند اتساع برای شکل‌دهی قطعاتی مناسب است که آن‌ها را نمی‌توان به سادگی با یک خم یا تا شدن بمانند قطعات بدنه خودرو، شکل‌دهی کرد. همچنین این فرایند از نوع فرایندهای شکل‌دهی کششی است که برای ایجاد تأثیر روی ورق خمیده یا مسطح استفاده می‌شود، افزایش سطح ورق در این فرایند به علت کاهش ضخامت تحت فشار می‌باشد [۱، ۲].



شکل (۱-۱) نمای برش خورده چیدمان قالب اتساع ساده

۳-۱ اصطکاک در شکل‌دهی ورق‌های فلزی

اصطکاک یک متغیر پیچیده است که در اثر کنش و واکنش سطح ورق، ابزار شکل‌دهی و روان کار استفاده شده به وجود می‌آید. این تعامل بیشتر تحت تأثیر سرعت، زبری و بافت سطوح تماسی، مکانیزم روان کاری و همچنین نوع فرایند و دمای آن می‌باشد. این مولفه نقش مهمی در تعیین طول عمر ابزار، شکل‌پذیری مواد، کیفیت سطح محصول نهایی، عمر محصول، نیروی شکل‌دهی دارد. اصطکاک بیش از حد منجر به تولید گرما، سایش ابزار، برداشت و جمع شدن مواد بر روی سطح ابزار می‌شود که موجب خرابی زودرس آن می‌شود. همچنین اصطکاک می‌تواند باعث ایجاد غیریکنواختی در هندسه محصول شکل‌دهی شده و منجر به نقص در محصول تولیدی شود [۴، ۵].

با کنترل ضریب اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی، می‌توان نیروی شکل‌دهی را کنترل و از ایجاد پارگی^۱ و چروکیدگی^۲ در قطعات تولید شده جلوگیری کرد. همچنین محاسبه ضریب اصطکاک به‌منظور محاسبه تنش، کرنش، نحوه سیلان ماده و نیروی شکل‌دهی در فرایندها اهمیت ویژه‌ای دارد [۵].

۴-۱ مدل‌های اصطکاکی

ویژگی‌های منحصر به فردی در شکل‌دهی فلزات وجود دارد که رفتار اصطکاکی بین ابزار و قطعه‌کار را تعیین می‌کند. این رفتار به‌صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌شود که رابطه بین نیروها/تنش‌های مماسی و عمود بر سطح را مشخص می‌کند. میزان انطباق این مدل با شرایط واقعی نقش به‌سزایی در دقت نتایج حل تحلیلی و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر آن دارد. در مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی، اغلب یکی از سه مدل اصطکاکی زیر استفاده می‌شود.

۱- بر اساس مدل اصطکاک کولمب^۳ مطابق شکل (۲-۱) (الف)، تنش اصطکاکی τ متناسب با تنش نرمال σ_n بر سطح قطعه می‌باشد. مدل کولمب با رابطه ۱-۱ بیان شده که اغلب نسبت μ در حین انجام فرایندهای شکل‌دهی فلزات ثابت فرض می‌شود [۶].

$$\tau = \mu \sigma_n \quad ۱-۱$$

۲- بر طبق مدل اصطکاکی چسبنده^۴ مطابق شکل (۲-۱) (ب) و رابطه ۲-۱ تنش اصطکاکی معادل ضریبی از استحکام برشی ماده است. در این رابطه، m_f ضریب اصطکاک چسبنده و τ_y تنش تسلیم برشی ماده است. در حالت بدون اصطکاک $m_f = 0$ است، بیش‌ترین مقدار m_f برابر یک است [۶].

$$\tau = m_f \tau_y \quad ۲-۱$$

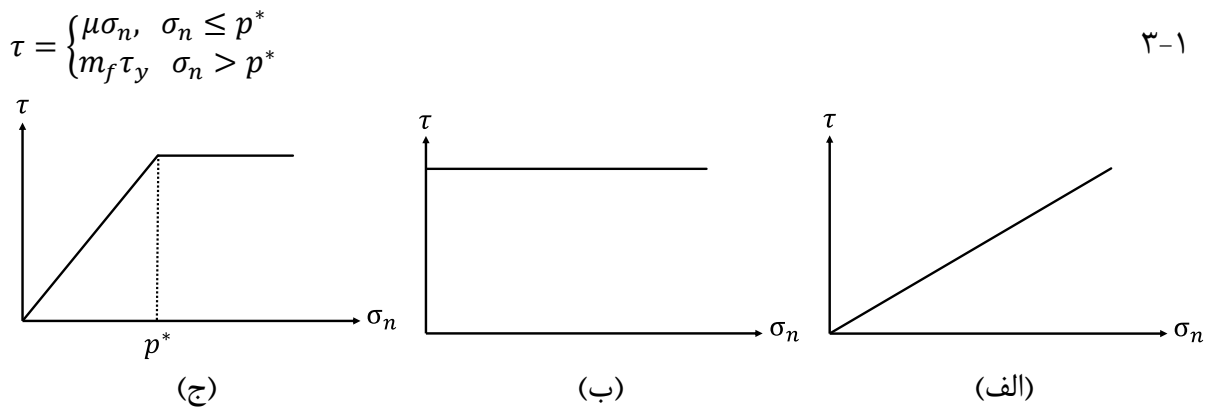
^۱ Tearing

^۲ Wrinkling

^۳ Coulomb's friction model

^۴ Sticking friction model

۳- هرگاه ضخامت فیلم روان کار نازک باشد و تنش اصطکاکی کولمب از مقدار بحرانی خود فراتر رود، در نتیجه مقدار تنش اصطکاکی برشی ثابت و به مدل اصطکاکی ترکیبی^۱ تبدیل می‌شود. مدل اصطکاکی ترکیبی به شکل رابطه ۳-۱ توشته می‌شود که در آن p^* فشار نرمال بحرانی می‌باشد. در شکل (۲-۱) (ج) نحوه افزایش اصطکاک در مدل اصطکاکی مختلط را نمایش می‌دهد [۶].

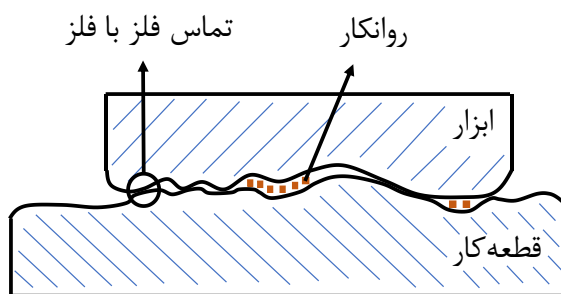


شکل (۲-۱) مدل‌های اصطکاکی، (الف) مدل کولمب (ب) مدل چسبنده، (ج) مدل ترکیبی

۵-۱ مکانیزم‌های روان‌کاری

در شکل (۳-۱) طرح‌واره نحوه تماس ابزار با قطعه کار در شرایط استفاده از روان کار نمایش داده شده است. مطابق شکل یک روان کار مطلوب می‌تواند به صورت موضعی و یا کلی مانع از تماس بین ابزار و قطعه کار شود. استفاده از روان کار مناسب باعث کاهش اصطکاک، توان مصرفی، سایش و دمای موضعی قطعه می‌شود و به دلیل جلوگیری از تماس فلز با فلز از آسیب نامطلوب به سطح ابزار و قطعه کار جلوگیری می‌کند. با این وجود، باید توجه داشت همیشه لازم نیست با استفاده از روان کار، اصطکاک سطحی را به حداقل مقدار آن کاهش داد، زیرا می‌توان با کنترل درست شرایط اصطکاکی، نحوه سیلان ماده را در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، با حداقل نیروی لازم برای ساخت محصول نهایی با کیفیت بهینه کرد. به عنوان نمونه محققین به اثر مفید اصطکاک در فرایندهای نورد، اکستروژن پیوسته و اکستروژن گرم در دستیابی به محصول نهایی اشاره کرده‌اند [۳].

¹ Combined friction model



شکل (۱-۳) تماس سطح ابزار با قطعه کار در شرایط استفاده از روان کار

بر اساس نوع روان کار به کار رفته در فرایندهای شکل دهی، می توان شرایط روان کاری را به پنج حالت کلی زیر دسته بندی کرد [۶].

۱- شرایط خشک^۱ که هیچ روان کاری در سطح مشترک بین سنبه و ماتریس وجود ندارد و تنها لایه های اکسیدی موجود بر روی سطح مواد به عنوان یک لایه جداکننده عمل می کند و در نتیجه نیروی اصطکاک زیاد خواهد بود. این شرایط برای شکل دهی نورد گرم ورق ها، اسلب ها و اکستروژن خشک آلیاژهای آلومینیوم برقرار است. ضریب اصطکاک کولمب در این شرایط برابر $0/3$ است [۶].

۲- شرایط روان کار لایه مرزی^۲، لایه های نازک (معمولا آلی) هستند که به سطح فلز جذب می شوند یا با آن واکنش شیمیایی می دهند تا مانعی در برابر تماس فلز با فلز ایجاد کنند. در شرایط روان کاری لایه مرزی مانند شرایط خشک، نیرو اصطکاک زیاد بوده و ضریب اصطکاک در محدوده $0/1$ تا $0/3$ قرار دارد [۶].

۳- روان کاری با غشای (فیلم) کامل^۳، این حالت زمانی به وجود می آید که یک لایه ضخیم از روکش روان کار جامد یا خشک بین ابزار و قطعه کار وجود داشته باشد. در این حالت، تنش اصطکاکی توسط استحکام برشی لایه روان کار تعیین می شود و اغلب از مدل اصطکاک چسبنده استفاده می شود [۶].

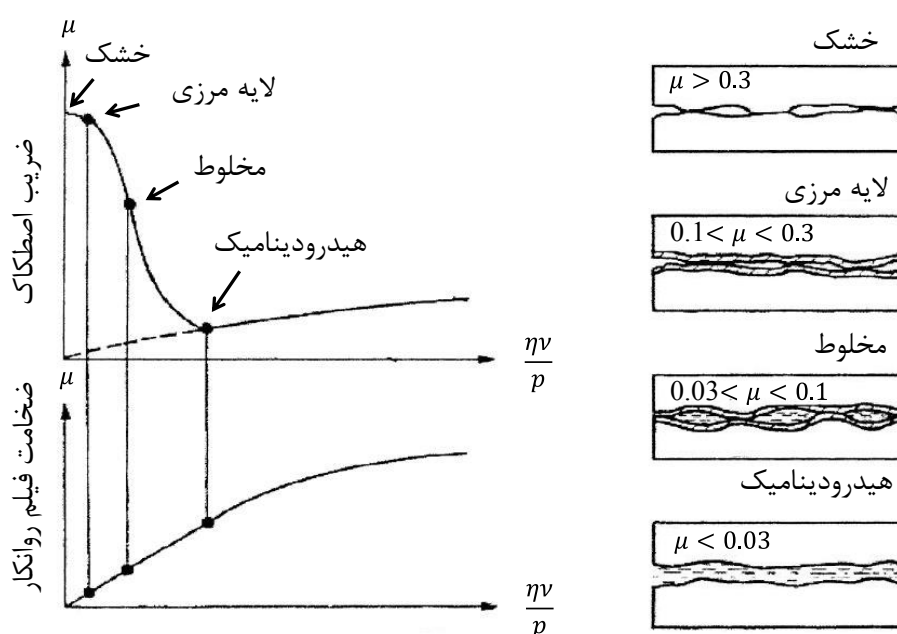
¹ Dry condition

² Boundary lubrication

³ Full film lubrication

۴- شرایط روان کاری هیدرودینامیکی^۱ زمانی پدید می‌آید که یک لایه ضخیم از روان کار مایع بین ابزار و قطعه کار باشد. در این حالت، شرایط اصطکاک توسط گرانروی^۲ روان کار و فشار سطح تماس و سرعت نسبی بین قالب و قطعه کار کنترل می‌شود. در این حالت اصطکاک نسبتاً کم بوده و مقدار آن کم‌تر از 0.03 می‌باشد [۶].

۵- شرایط روان کاری لایه‌ی مخلوط^۳ گسترده‌ترین وضعیت را در شکل‌دهی فلزات دارد. در این حالت قله‌های سطح فلز دارای حالت روان کاری لایه مرزی می‌باشد و به‌عنوان یک محیط هیدرواستاتیک عمل می‌کند، همچنین دره‌های سطح فلز با روان کار مایع پر می‌گردد که دارای شرایط روان کاری هیدرودینامیکی است. ضریب اصطکاک در این حالت از 0.03 تا 0.1 می‌باشد. در شکل (۴-۱) شرایط روان کاری‌های خشک، روان کار لایه مرزی، مخلوط و هیدرودینامیک نشان داده و نسبت ضریب اصطکاک به فشار وارد بر سطح در شرایط روان کاری مختلف در قالب دو نمودار نمایش داده است. در این شکل η گرانروی روان کار، v سرعت لغزش روان کار و p فشار نرمان می‌باشد [۶].



شکل (۴-۱) تغییرات ضریب اصطکاک و ضخامت لایه روان کار در شرایط روان کاری مختلف [۷]

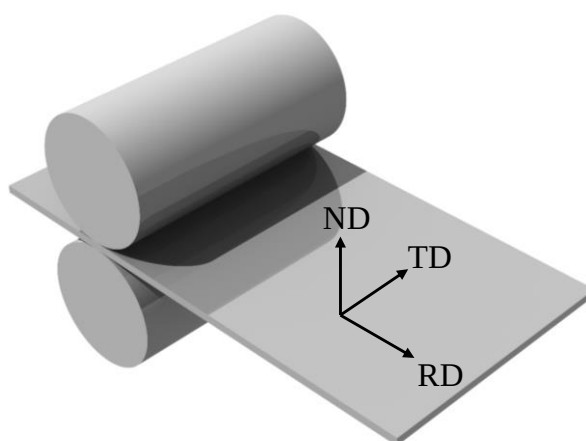
¹ Hydrodynamic conditions

² Viscosity

³ Mixed layer lubrication

۶-۱ ناهمسانگردی پلاستیک^۱

کار مکانیکی (نورد) باعث ایجاد جهت‌گیری‌های ترجیحی با ساختارهای بلورشناسی^۲ در ورق‌های فلزی می‌شود. جهت‌گیری ترجیحی دانه‌ها یا تمایل آماری آن‌ها به داشتن جهت‌گیری خاص، عامل اصلی ایجاد خواص ناهمسانگردی پلاستیک ورق‌های فلزی است [۸]. جهت‌های اصلی در ورق‌های نورد شده مطابق شکل (۵-۱) شامل جهت نورد (RD^3)، جهت عرضی (TD^4) و جهت عمودی (ND^5) است.



شکل (۵-۱) محورهای اصلی ورق‌های فلزی نورد شده

۷-۱ اندازه‌گیری ناهمسانگردی پلاستیک

تغییر رفتار جریان پلاستیک در ورق‌های فلزی با پارامتر لنگفورد^۶ یا ضریب ناهمسانگردی r ارزیابی می‌شود [۹]. نسبت r به‌عنوان نسبت کرنش‌های عرضی به ضخامتی، در رابطه ۴-۱ نوشته شده است، در این رابطه نمی‌توان کرنش ضخامتی یک ورق نازک را به‌طور دقیق اندازه‌گیری کرد. بر این اساس می‌توان کرنش در راستای ضخامتی را از رابطه ۵-۱ محاسبه کرد. این ضریب با آزمایش کشش تک‌محوری روی نمونه‌های ورقی به‌شکل نوار تعیین می‌شود. به‌دلیل یکسان بودن مقدار کرنش عرضی و ضخامتی در مواد همسانگرد^۷، ضریب ناهمسانگردی در آن برابر با یک می‌باشد. اگر ضریب ناهمسانگردی ورق فلزی بزرگ‌تر از یک باشد، کرنش

¹ Plastic Anisotropy

² Crystallographic

³ Rolling Direction

⁴ Transverse Direction

⁵ Normal Direction

⁶ Lankford

⁷ Isotropic

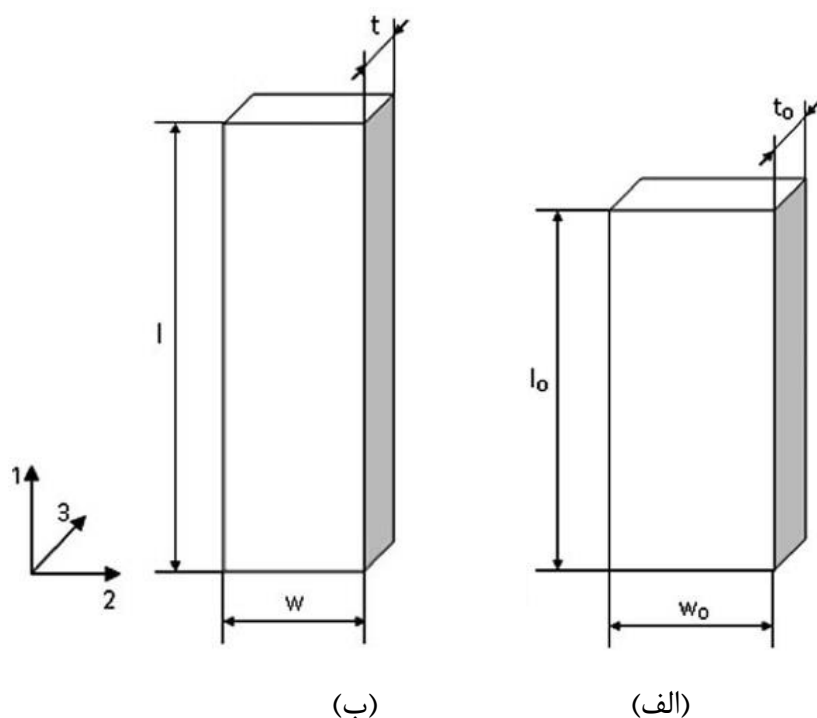
عرضی بیش تر (نمونه در برابر نازک شدن مقاومت بیشتری دارد) و اگر ضریب ناهمسانگردی کم تر از یک باشد، کرنش های ضخامتی برجسته خواهند بود [۹، ۱۰]. میانگین مقدار ضریب ناهمسانگردی برای جهتهای مختلف در صفحه ورق فلزی، ضریب ناهمسانگردی نرمال^۱ نامیده و به شکل رابطه ۶-۱ نشان داده می شود. همچنین تغییر ضریب ناهمسانگردی نرمال نسبت به جهت نورد با کمیتی به نام ناهمسانگردی صفحه ای^۲ که در رابطه ۷-۱ نوشته شده است، بیان می شود [۱۰].

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad ۴-۱$$

$$\varepsilon_t = -(\varepsilon_w + \varepsilon_l) \quad ۵-۱$$

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad ۶-۱$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad ۷-۱$$



شکل (۶-۱) هندسه نمونه، (الف) قبل تغییر شکل، (ب) بعد از تغییر شکل [۹]

ε_l و ε_t به ترتیب کرنش های عرضی، ضخامتی و طولی هستند.

^۱ Coefficient of normal anisotropy

^۲ Planar anisotropy

۸-۱ معیار تسلیم و مدل سخت‌شوندگی

در سال ۱۹۴۸، هیل^۱ یک رفتار کمی از ناهمسانگردی پلاستیک را بدون در نظر گرفتن پایه بلورشناسی مواد به‌عنوان تعمیم معیار هوبر^۲ میسز^۳-هنسکی^۴ پیشنهاد کرد. او موادی را با سه محور متعارف ناهمسانگردی، x ، y و z فرض کرد که خواص تقارن دوگانه متعامد داشتند (صفحه‌های yz ، zx و xy تقارن آینه‌ای دارند) [۹]. معیار تسلیم هیل با یک تابع درجه دو به‌شکل رابطه ۸-۱ بیان می‌شود. در این رابطه σ_{ij} مولفه تانسور تنش است. F ، G ، H ، L ، M و N ثابت‌های خاص حالت ناهمسانگردی ماده هستند و x ، y ، z محورهای ناهمسانگرد اصلی هستند [۸].

$$2f(\sigma_{ij})^2 = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad ۸-۱$$

هنگامی که کرنش ایجاد شده در نمونه آزمایش شده بزرگ باشد، می‌توان با استفاده از منحنی تنش-کرنش موثر جنس نمونه، ضریب سختی K و توان کرنش سختی n را در مدل کرنش سختی توانی محاسبه کرد. مدل توانی^۵ در رابطه ۹-۱ نوشته شده است [۱۱].

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad ۹-۱$$

۹-۱ پیشینه پژوهش

در این بخش مروری بر فعالیت‌های پژوهشی انجام شده مرتبط با موضوع این پایان‌نامه پرداخته می‌شود. انتخاب معیار تسلیم، تاثیر زیادی در صحت انجام حل تحلیلی-عددی در فرایندهای شکل‌دهی ورق فلزی دارد. پانیچ و همکاران، تجزیه و تحلیل تجربی-عددی منحنی حدی و منحنی تنش حدی شکل‌دهی را با استفاده از آزمون شکل‌دهی اتساع ناکازیم^۶ و معیارهای تسلیم هیل-۴۸^۷ و YLD89 و قانون کرنش سختی سوئیفت^۸ برای ورق

^۱ Hill^۲ Huber^۳ Mises^۴ Hencky^۵ Power law model^۶ Nakazima test^۷ Hill-48^۸ Swift hardening law

فولادی پیشرفته با استحکام بالا گرید JAC780Y انجام داده‌اند. ایشان مشاهده کردند که منحنی تنش حدی شکل‌دهی می‌توانند شکست را به‌طور واقعی‌تر و بهتر از منحنی حدی شکل‌دهی مبتنی بر کرنش پیش‌بینی کند [۲]. پاندر و همکاران رفتار فولاد DP590 در شکل‌دهی کشش عمیق، تحت شرایط مختلف روان‌کاری و شکل‌دهی گرم را بررسی کرده‌اند. در پژوهش ایشان از مدل‌های جانسون کوک^۱ و جانسون کوک اصلاح^۲ شده و زیریلی آرمسترانگ^۳ استفاده شده است که در میان آن‌ها مدل زیریلی آرمسترانگ به‌همراه معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل-۴۸ بهترین پیش‌بینی تنش جریان مواد، توزیع ضخامت و عمق کشش را از خود نشان داده است. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که اثر توأم دمای بالا و شرایط روان‌کاری مناسب، به افزایش کشش محدود، یکنواختی توزیع ضخامت در امتداد دیواره‌های فنجان و به کاهش نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی کشش عمیق کمک خواهد کرد [۱۲]. کوبوکی و همکاران، روشی برای پیش‌بینی نمودار تنش-کرنش بر اساس نمودار نیروی ضربه‌ای در شکل‌دهی اتساع ارائه کرده‌اند و خطای پیش‌بینی خود را به‌صورت عددی تعیین کردند و در ادامه تأیید تجربی آن را نیز انجام دادند [۱۳]. لو و همکاران، شکل‌پذیری و شکست انعطاف‌پذیر ورق DP780 را به‌طور کامل با مدل هیل-۴۸ متعامد و مدل شکست مور-کولمب اصلاح شده^۴ بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های اجزای محدود با سه نوع المان مختلف، آزمایش اتساع را شبیه‌سازی کرده و قابلیت کاربرد و صحت مدل‌های شکل‌پذیری هیل-۴۸ و شکست مور-کولمب اصلاح شده را تأیید کردند. با مقایسه نتایج عددی و داده‌های تجربی آزمون‌های شبیه‌ساز اتساع، مشخص شد که المان سه بعدی بهترین پیش‌بینی را در همه جنبه‌ها از جمله مکان-حالت شکست، پاسخ‌های جابجایی نیروی سنبه، تنش ناحیه شکست و زاویه پیچش شکست را ارائه می‌کند [۱۴]. لی و همکاران، کرنش پلاستیک معادل تجمیعی^۵ شده همراه با تنش سه محوری را به‌عنوان یک تابع وزنی در معیار شکست نرم برای شبیه‌سازی اجزای محدود و پیش‌بینی تحلیلی استفاده کردند. روش آن‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه مبتنی بر

¹ Johnson-Cook

² Modified Johnson-Cook

³ Zerilli-Armstrong

⁴ Modified Zerilli-Armstrong

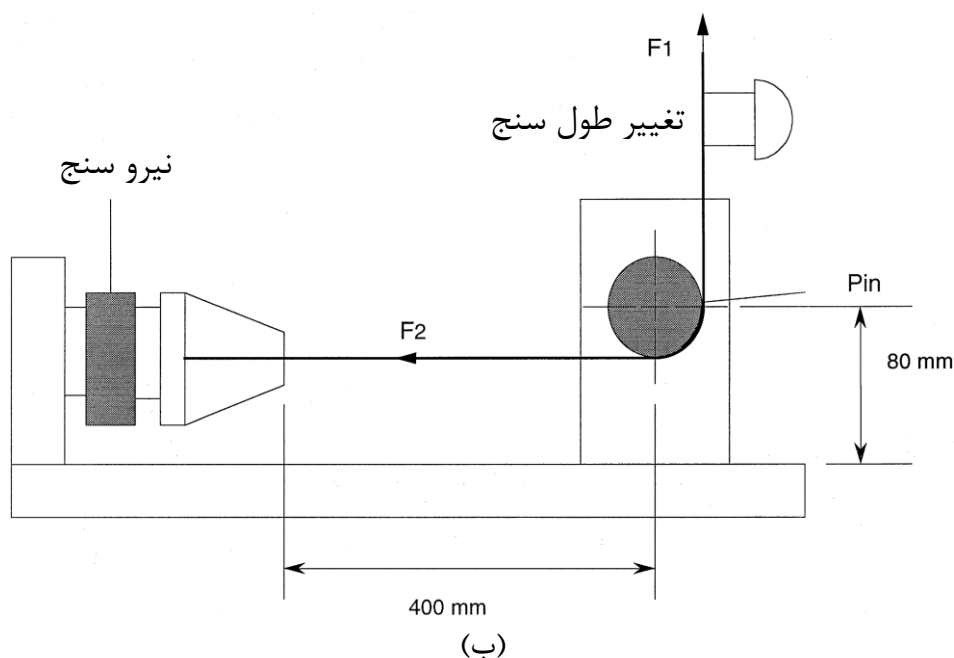
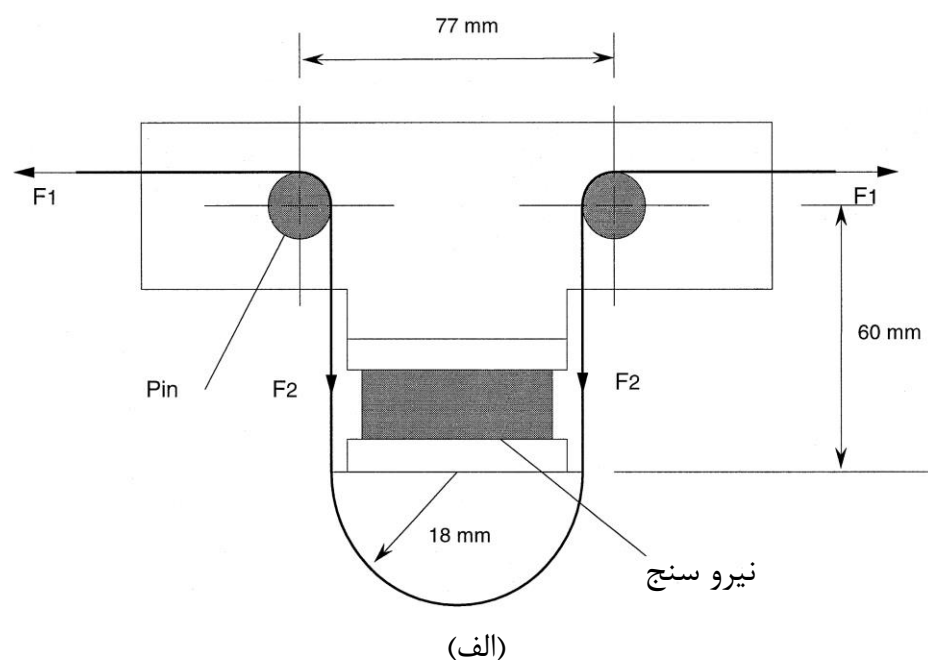
⁵ Accumulated equivalent plastic strain

اندازه‌گیری کرنش در شکل‌دهی نمونه‌های حاوی بریدگی‌های جانبی با شعاع‌های مختلف باشد [۱۵]. گیل‌مور و همکاران، با انجام آزمایش‌های کشش تک‌محوری و دو محوری و ثبت داده‌های تجربی مربوط به آن، یک معیار تسلیم متعامد غیر درجه دوم^۱ با دو روش کالیبراسیون، برای ترکیب‌های خاصی از انواع ضریب ناهمسانگردی تعریف کردند که در آن دقت کالیبراسیون اولیه با استفاده از یک مدل عددی آزمایش کشش سنبه نیم‌کروی ارزیابی شد که دقیق‌ترین پیش‌بینی‌های کرنش، با استفاده از مقادیر ضریب ناهمسانگردی تعیین شده از کرنش پلاستیک به‌دست آمد [۱۶].

با توجه به اثر شرایط اصطکاکی بر هندسه محصول، نیروی فرایند و دیگر متغیرهای شکل‌دهی، محققان به بررسی نحوه این اثرگذاری و اندازه‌گیری اصطکاک پرداخته و روش‌های گوناگونی برای محاسبه‌ی آن ارائه کرده‌اند. سنچز در پژوهش خود به تجزیه و تحلیل سیستماتیکی تجهیزات آزمایشگاهی به‌عنوان یک سیستم اندازه‌گیری پدیده اصطکاک پرداخته است. ایشان در پژوهش خود نشان داد که خم شدن چرخه‌ای ورق تحت تنش، که به کشش و نازک شدن قابل توجه ورق می‌انجامد؛ در تعیین پارامترهای اصطکاکی موثر خواهد بود [۱۷]. هاو و همکاران دو مدل فیزیکی و شبیه‌ساز اصطکاک را بر پایه کشش تسمه^۲ در اطراف یک پین برای توصیف اصطکاک شکل‌دهی ورق فلزی ارائه کردند که از اندازه‌گیری مستقیم نیروها برای اندازه‌گیری اصطکاک استفاده می‌کند. ایشان در پژوهش خود اثر کرنش، سرعت کشش، روان‌کار، قطر پین و زاویه پیچش را بر ضریب اصطکاک بررسی کردند [۱۸]. مدل شبیه‌ساز اصطکاک هاو و همکاران در شکل (۱-۷) نمایش داده شده است.

^۱ non-quadratic orthotropic yield criterion

^۲ Stretching of a strip



شکل (۷-۱) آزمون کشش تسمه برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، (الف) طرح‌واره آزمایش U شکل، (ب) طرح‌واره آزمایش L شکل [۱۸]

هان در پژوهش خود با آزمون کشش تسمه اقدام به تعیین اصطکاک با چند ابزار کرده و تأثیر هندسه ابزار را بر رفتار اصطکاک مورد بررسی قرار داد. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی ورق فلزی انجام شد. نتیجه شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که روش آزمایش اصطکاک هان برای ارزیابی رفتار اصطکاکی فرایند شکل‌دهی ورق فلزی بسیار کارآمد است [۱۹]. لی و همکاران به‌منظور

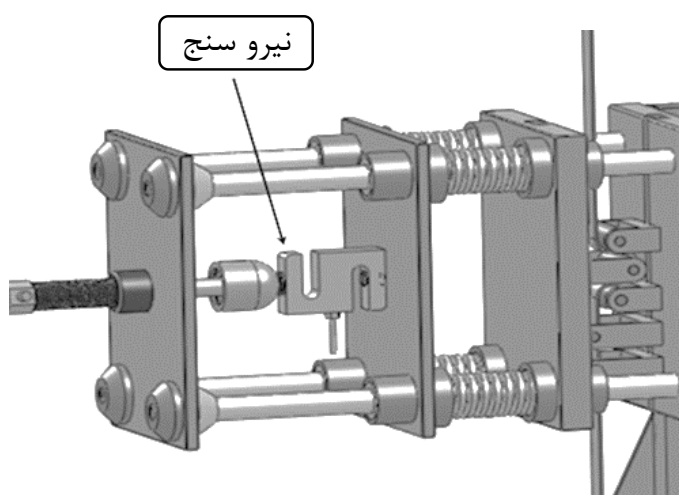
یافتن تاثیر خواص مواد و گرانروی روان کار بر خصوصیات اصطکاکی، آزمایش کشش، زبری سطح و آزمایش اصطکاک با انواع مختلف روان کار را انجام دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که هرچه گرانروی روان کار کم‌تر شود، ضریب اصطکاک بالاتر می‌رود. همچنین هنگامی که زبری سطح بسیار کم یا بسیار زیاد باشد، ضریب اصطکاک بالا می‌باشد [۲۰]. ماتوسزاک عملیات کشش تسمه فلزی را شبیه‌سازی کرد و شرایط اصطکاکی بین ابزار و تسمه فولادی را مورد بررسی قرار داد. ایشان عوامل تأثیرگذار بر اصطکاک را، جهت‌گیری نمونه، روان کار، سرعت جابجایی نمونه، کرنش پلاستیک و فشار تماسی عنوان کرد. ماتوسزاک ضریب اصطکاک را از میانگین داده‌های تجربی محاسبه و یک مدل رگرسیون خطی برای پیش‌بینی اثر پراکندگی متغیرها بر ضریب اصطکاک ارائه نمود [۲۱]. فیگوریدو و همکاران برای ارزیابی اصطکاک از دو روش مختلف استفاده کردند، روش اول آزمایش استوانه متقاطع یک طرفه با افزایش خطی نیرو و روش دوم تجهیززی است که امکان اندازه‌گیری ضریب اصطکاک را در فرایند کشش عمیق فراهم می‌کند. ایشان شرایط تماسی ورق‌های فولاد DP600 نورد سرد شده‌ی استحکام بالا و آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰ در برابر سطح ابزار فولاد AISI D3 را بررسی و اثر ایجاد شده به علت سرعت لغزش، زبری سطح، روان کار و نیروی اعمالی را مطالعه کردند. مطالعه آن‌ها به این نتیجه رسید که آزمایش پویش نیرو^۱ همیشه بیش‌تر از مقادیر ارزیابی شده توسط آزمایش آویزه کششی^۲ است، همچنین زبری جنس قالب نقش مهمی در ضریب اصطکاک دارد [۲۲]. تجهیزات آزمایشگاهی فیگوریدو و همکاران در شکل (۸-۱) نمایش داده شده است.

^۱ Load-Scanning

^۲ Draw bead



(الف)

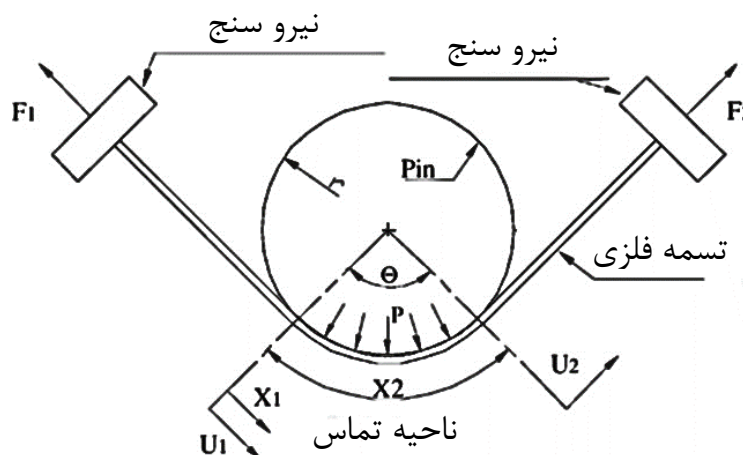


(ب)

شکل (۸-۱) تجهیزات آزمایشگاهی فیگور دو و همکاران، (الف) جزئیات مجموعه آزمون پویش نیرو، (ب) آزمون اصطکاک آویزه کششی [۲۲]

فراتینی و همکاران در پژوهش خود، نتایج چندین آزمایش تجربی را با هدف تعیین ضریب اصطکاک کولمب در عملیات شکل‌دهی ورق فلزی را برای شرایط عملیاتی مختلف بررسی کردند، ایشان به‌طور خاص، چند مقدار

نیروی فشاری و چند نوع روان کار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای انجام آزمایش خود، یک نمونه اختصاصی با استفاده از تئوری ویلسون^۱ طراحی و تنظیم کردند [۲۳]. آزمون طراحی شده فراتینی و همکاران، شکل (۱-۹) نمایش داده شده است.

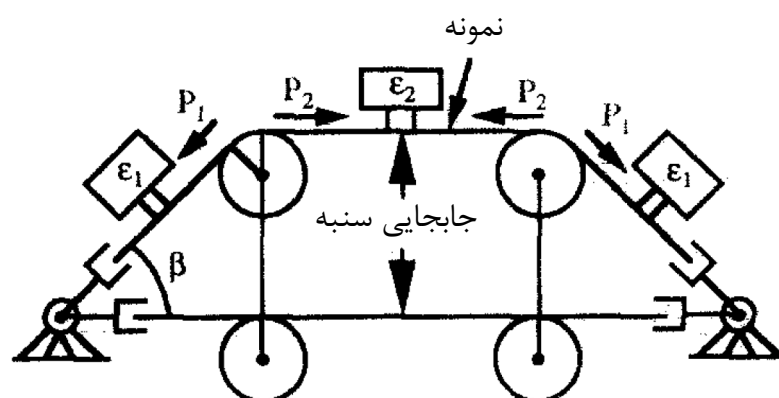


شکل (۱-۹) طراحی از شبیه‌ساز آزمون اصطکاک ویلسون [۲۳]

سایه و همکاران برای بررسی رابطه‌ی بین اصطکاک و متغیرهای فرایند شکل‌دهی از جمله سرعت لغزش، کرنش تسمه و نرخ کرنش در روان کار لایه مرزی، از یک نرم‌افزار شبیه‌ساز شکل‌دهی ورق فلزی استفاده کردند. همچنین اندازه‌گیری‌های خود را با دو ترکیب مختلف ورق و ابزار شامل: ۱- ورق استیل الکتروگالوانیزه بر روی فولاد ابزار صاف A2، ۲- ورق آلومینیوم خالص تجاری بر روی کاربرد سمانته شده انجام دادند. در حالت اول، اصطکاک تماسی با افزایش کرنش، افزایش می‌یابد، بر این اساس تأثیر کرنش پلاستیک در کم کردن استحکام تسمه‌ها در منطقه تماس نمایان می‌شود. در حالت دوم، اصطکاک تماسی با افزایش کرنش، به دلیل کاهش سطح تماس و زبر شدن سطح تسمه در حین تغییر شکل پلاستیک کاهش یافته است [۲۴]. کوبورق و همکاران تعدادی آزمون تجربی برای ارزیابی رفتار اصطکاک و شکل‌پذیری ورق‌های فلزی طراحی کردند، که به اندازه گیری مستقیم نیروهای کششی و تماسی متکی است. آن‌ها برای درک بهتر تعامل ورق و قالب (خم و باز شدن خم ورق)، تماس قالب و ورق را مورد بررسی قرار دادند. ایشان وجود قله‌های فشار خم و باز شدن خم و

¹ Wilson's theory

همچنین میزان زاویه تماس بین ورق و قالب را به صورت آزمایشگاهی با استفاده از یک حسگر پیزوالکتریک^۱ بررسی کردند. شواهد کار آن‌ها نشان داد که مقدار زاویه تماس کمتر از زاویه پیچش^۲ هندسی است و با کشش تسمه افزایش می‌یابد [۲۵]. واگونر و همکاران آزمایش اصطکاک OSU^۳ را که یک تکنیک جدید برای اندازه گیری ضریب اصطکاک سنبه در حین انجام عملیات شکل‌دهی ورق است را طراحی کردند. نتایج آزمایش ایشان و همکارانش نشان می‌دهد که اصطکاک سنبه به زاویه پیچش و به نرخ کرنش ورق فلزی که به ترتیب با جابجایی و سرعت سنبه تغییر می‌کند، بستگی دارد [۲۶]. طرح‌واره آزمون اصطکاک OSU در شکل (۱-۱۰) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۱۰) طرح‌واره آزمون اصطکاک OSU [۲۶]

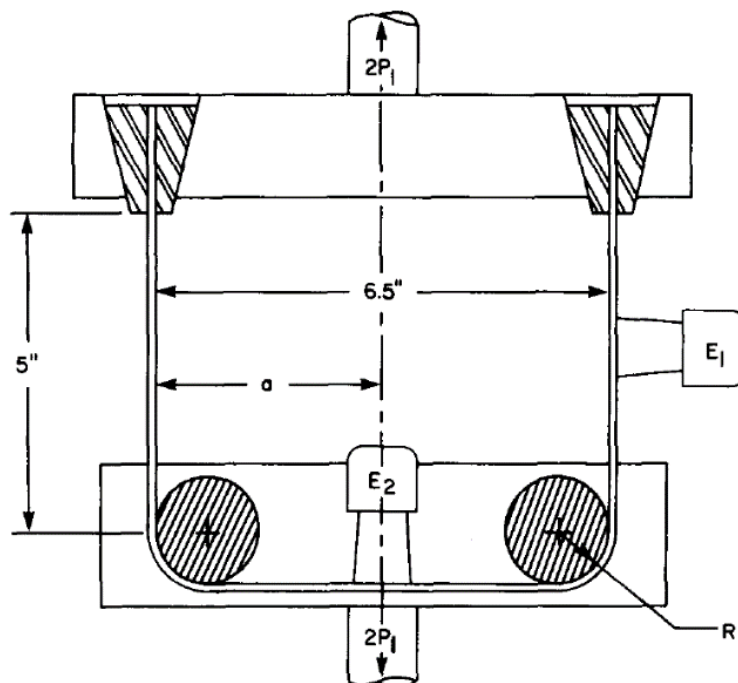
وانگ و همکاران برای مقایسه اثرات اصطکاک در ورق‌های فلزی مختلف، از آزمون اتساع تسمه به عنوان یک ابزار برای شبیه‌سازی کشش ورق بر روی شعاع گوشه سنبه استفاده کردند. در پژوهش ایشان مقادیر مختلفی از فولادها از جمله نمونه‌های گالوانیزه و همچنین ورق‌های آلایژ آلومینیوم نرم و سفت مورد آزمایش قرار گرفت و ضرایب اصطکاک در طیف گسترده‌ای اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان می‌دهد که چگونه روند افزایش کرنش بر روی سنبه توسط هر دو منحنی تنش-کرنش ورق و خصوصیات اصطکاکی آن تحت تأثیر

¹ Piezoelectric sensor

² Angle-of-wrap

³ Ohio State University

قرار می‌گیرد [۲۷]. طرح‌واره تجهیزات آزمون اصطکاک تسمه وانگ و همکاران در شکل (۱-۱۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۱۱) طرح‌واره تجهیزات آزمون اصطکاک تسمه وانگ و همکاران [۲۷]

ترزیپکینسکی و همکاران خلاصه روش‌هایی که برای توصیف شرایط اصطکاک در شکل‌دهی متداول ورق‌های فلزی و شکل‌دهی تدریجی ورق، در طی یک دوره زمانی ایجاد شده‌اند را جمع‌آوری و مطالعه کردند. ایشان پارامترهای تأثیرگذار بر پدیده‌های اصطکاک و نیز نقش آن‌ها بر ضریب اصطکاک بررسی کردند. همچنین آزمون تریبولوژیکی^۱ به آزمایش اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم ضریب اصطکاک طبقه‌بندی و در روش غیرمستقیم، ضریب اصطکاک متوسط بر اساس اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی آزمون محاسبه شد. مطالعات ایشان و همکارانش نشان داد که به‌علت وجود نیرو فشاری موضعی زیاد و تغییر شکل پلاستیک مواد در فرایندهای شکل‌دهی ورق فلزی، حرکت ورق بر روی اجزای قالب به‌سختی و با تشدید اثر چسبندگی انجام

^۱ Tribological

می‌شود. در چنین شرایطی محاسبه ضریب اصطکاک با مدل اصطکاک کولمب ناممکن است. همچنین مدل اصطکاک کولمب، در تعیین ضریب اصطکاک شکل‌دهی گرم ورق فلزی ناتوان است [۲۸].

۱-۱ معرفی پایان‌نامه، ضرورت و نوآوری

اهمیت تحلیل و بررسی اثر اصطکاک به‌علت اثرات شاخص آن بر روی مولفه‌های محصول و فرایند آشکار است. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که از یک سو دقت ابعادی و کیفیت سطح محصول شکل‌داده شده و از سوی دیگر نیرو و انرژی صرف شده برای تولید قطعه متأثر از این عامل مهم است. اصطکاک ناشی از شرایط تماسی بین قالب و قطعه به‌علت تأثیرات میکروسکوپی در ناحیه تماس، منجر به تغییر بافت سطح محصول می‌شود. در اختیار داشتن دانش کافی از میزان اصطکاک تماسی و نحوه اثرگذاری آن بر مولفه‌های مذکور کمک شایانی به مدل‌سازی و طراحی فرایند خواهد نمود. لذا در این پایان‌نامه به اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در فرایند اتساع ورق فلزی DC04 پرداخته خواهد شد. تاکنون پژوهش‌های متعددی برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی حجمی (آهن‌گری، اکستروژن، نورد تسمه و ...) انجام شده است. ولی در روش‌های شکل‌دهی ورق، پژوهش‌های انجام شده اندک بوده و اغلب بر پایه اندازه‌گیری نیروی فرایند می‌باشد که روشی پرهزینه و زمان‌بر است و نیاز به کاربر حرفه‌ای دارد. نوآوری مشخص این پایان‌نامه در اندازه‌گیری اصطکاک ورق و قالب در فرایند کشش ورق فلزی مبتنی بر یک روش جدید با اندازه‌گیری هندسه تغییر شکل در نواحی مختلف قطعه کار می‌باشد. در این راستا دو نمودار کالیبراسیون اصطکاکی برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ورق و قالب در فرایند اتساع مبتنی بر: ۱- اندازه‌گیری کرنش طولی قطعه کار سالم و ۲- اندازه‌گیری قطر گشودگی قطعه کار سوراخ‌دار در نواحی مختلف ارائه شده است.

پایان‌نامه‌ی حاضر شامل پنج فصل است. در فصل دوم به معرفی مواد و روش تجربی تحقیق شامل نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی، جنس آن و ابزارهای به‌کار رفته پرداخته شده است. در فصل سوم، حل تحلیلی فرایند ساده‌شده اتساع برای ورق ناهمسانگرد انجام شده و همچنین چگونگی انجام شبیه‌سازی فرایند در

نرم افزار آباکوس ۶/۱۴ [۲۹] توضیح داده شده است. در فصل چهارم، نتایج تجربی، عددی و تحلیلی پژوهش ارائه و در فصل پایانی به نتیجه گیری کلی از پژوهش و پیشنهادها پرداخته شده است.

فصل ۲ مواد و روش تجربی

۱-۲ مقدمه

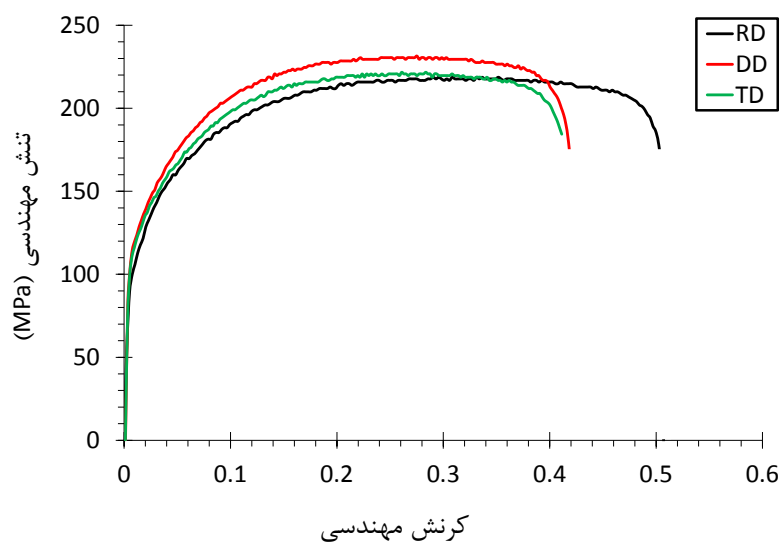
در این فصل، ورق فولادی و ابزارهای استفاده شده و نحوه ساخت نمونه‌های آزمون اتساع و همچنین روش انجام آزمون‌های تجربی و چگونگی محاسبه ثوابت مکانیکی ورق فولادی به کار رفته در این پژوهش، تشریح شده است.

۲-۲ معرفی فولاد DC04

ورق فولاد نورد سرد شده DC04 که در صنعت داخلی به ورق روغنی St14 شناخته می‌شود؛ به علت برخورداری از عنصر منگنز و درصد پایین کربن، ضمن برخورداری از استحکام قابل قبول از چقرمگی بالایی نیز برخوردار است [۳۰، ۳۱]. به همین دلیل از آن برای تولید قطعات پیچیده و پر استحکام با فرایندهای کششی، استفاده می‌شود. عمده‌ترین کاربرد این ورق در مصارفی است که نیاز به پرس‌کاری عمیق وجود دارد. در صنایع خودروسازی از DC04 برای تولید بدنه خودروها و فیلتر روغن آن استفاده می‌شود. در این پژوهش از ورق DC04 به ضخامت ۰/۸ mm خریداری شده از فولاد مبارکه اصفهان با ترکیب شیمیایی و پارامترهای مکانیکی جدول (۱-۲)، جدول (۲-۲) و شکل (۱-۲) استفاده شد.

جدول (۱-۲) ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) ورق فولادی DC04 [۳۲]

C	P	S	Mn	Fe
۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۵	۹۹/۷۵-۹۹/۴۳



شکل (۱-۲) نمودار تنش-کرنش مهندسی DC04

جدول (۲-۲) خواص مکانیکی ورق DC04

S_Y (MPa)	S_U (MPa)	Elongation (%)	r_0	r_{45}	r_{90}	$\bar{r}$	Δr	K (MPa)	n
۱۰۲/۵	۲۱۸	۴۶/۴	۰/۶۶	۱/۱	۰/۸۳	۰/۹۱	-۰/۳۵	۵۳۱	۰/۲۵

۳-۲ معرفی دستگاه کشش-فشار سنتم

دستگاه آزمایش کشش-فشار سری STD-600 شرکت سنتم که در شکل (۲-۲) قابل مشاهده می‌باشد، به منظور انجام آزمایش‌های کشش، فشار، خمش، برش برای انواع مواد با مدول سفتی بالا مانند مواد فلزی، کامپوزیتی و مصالح ساختمانی ساخته شده است. این دستگاه دارای سیستم انتقال قدرت با بال اسکرو^۱ می‌باشد که به این دستگاه توانایی اجرای آزمایش‌های بارگذاری یک جهته کششی و یا فشاری را با دقت و صحت بالایی

^۱ Ball screw

داده است. این دستگاه دارای امکاناتی مانند نیروسنج، حسگر تغییر طول سنج^۱ نمایش داده شده در شکل (۲-۳). فک‌های مستقل، سیستم کنترل دقیق سرعت می‌باشد که دقت و کارایی دستگاه را افزایش می‌دهد. سیستم انتقال قدرت این دستگاه به صورت هیدرولیک می‌باشد که بوسیله آن می‌تواند نرخ باردهی در سرعت‌های بسیار پایین (0.01 mm/s) را بخوبی انجام دهد. در جدول (۳-۲) مشخصات مکانیکی دستگاه کشش-فشار سنتام نمایش داده شده است [۳۳].

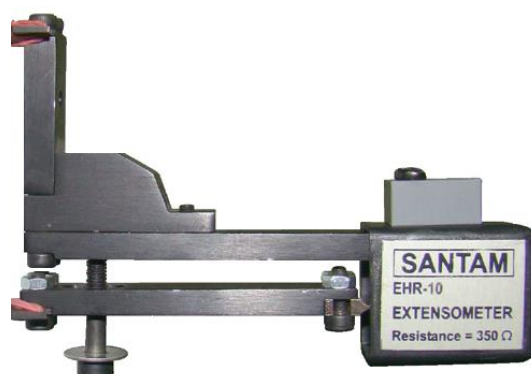
جدول (۳-۲) مشخصات مکانیکی دستگاه کشش-فشار سنتام STD-600 [۳۳]

۱۵۵۰	کورس آزمایش بدون فک (mm)
۸۰۰	کورس آزمایش با فک کشش (mm)
۵۰۰	حداکثر کورس جک (mm)
۶۵۰	فاصله بین دو ستون (mm)



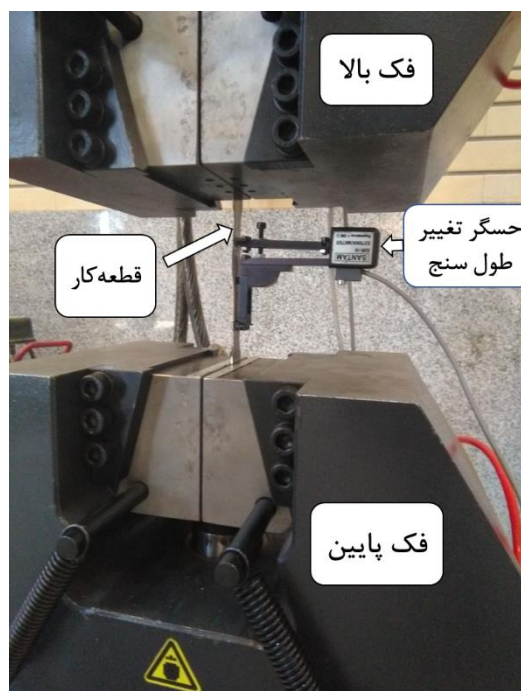
شکل (۲-۲) نمای کلی دستگاه کشش-فشار سنتام STD-600 [۳۳]

¹ Extensometer Sensor



شکل (۳-۲) حسگر تغییر طول سنج سنتام [۳۳]

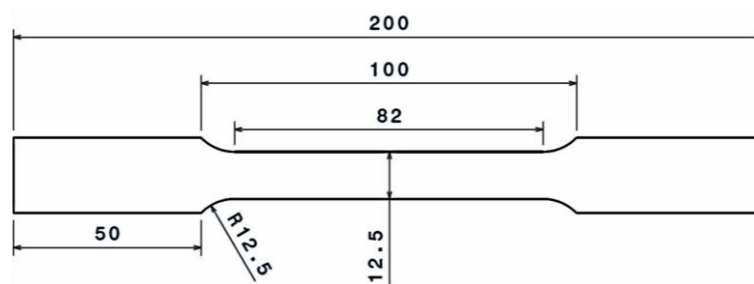
آزمون‌ها با استفاده از دستگاه هیدرولیکی ۶۰ Tonne کشش-فشار سنتام STD-600، با سرعت ۱۰ mm/min انجام گرفت. برای افزایش دقت و بررسی تکرارپذیری در تعیین رفتار مکانیکی، در هر جهت سه نمونه تهیه و آزمایش شد. جهت اندازه‌گیری دقیق تنش تسلیم از حسگر تغییر طول سنج استفاده شد. مجموعه چیدمان آزمون کشش به همراه حسگر تغییر طول سنج در شکل (۴-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۴-۲) نمونه در حالت کشش تک‌محوری همراه با حسگر تغییر طول سنج

۴-۲ آماده سازی نمونه آزمایش کشش

برای دستیابی به خواص مکانیکی ورق فولادی DC04، تعداد ۹ نمونه طبق استاندارد کشش فلزات^۱ در ابعاد شکل (۵-۲) بوسلیه دستگاه وایرکات بریده و استخراج شد [۳۴]. نمونه‌های کشش در سه جهت 0° ، 45° و 90° نسبت به راستای نورد مطابق ابعاد در شکل (۷-۲) نمایش داده شده‌اند.



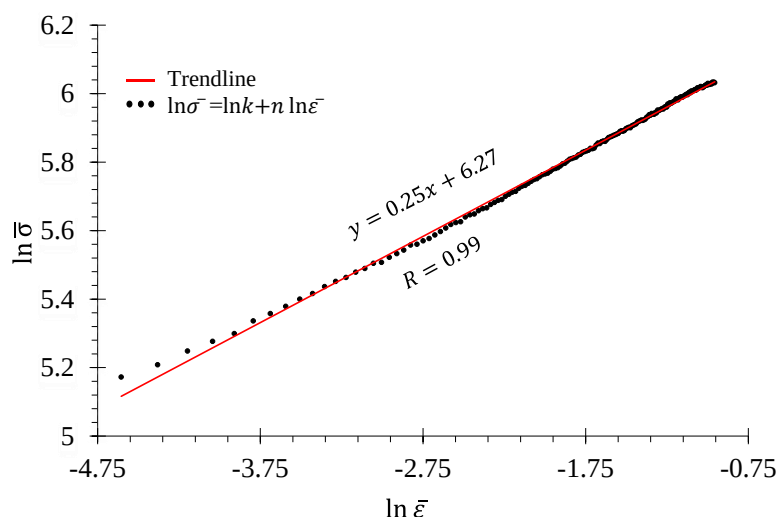
شکل (۵-۲) نمونه آزمون کشش استاندارد (واحد به mm)

۵-۲ محاسبه تنش تسلیم و تعیین ثوابت قانون توانی

از پردازش داده‌های نیرو-جابجایی، نمودار تنش-کرنش مهندسی و حقیقی ورق به دست آمد. ضریب سختی K و توان کرنش سختی n از منحنی لگاریتمی تنش-کرنش حقیقی بعد از تسلیم شدن تا پایان تغییر شکل پلاستیک یکنواخت با استفاده از رابطه ۱-۲ همانند شکل (۶-۲) به دست می‌آید.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \Rightarrow \ln \bar{\sigma} = \ln K + n \ln \bar{\epsilon} \xrightarrow{\text{تغییر متغیر}} y = b + nx \quad ۱-۲$$

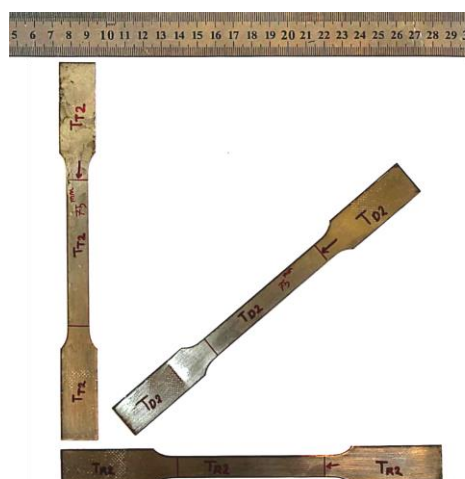
^۱ Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials



شکل (۲-۶) محاسبه ثوابت قانون توانی با نمودار لگاریتمی

۲-۶ محاسبه ضریب ناهمسانگردی ورق فولادی

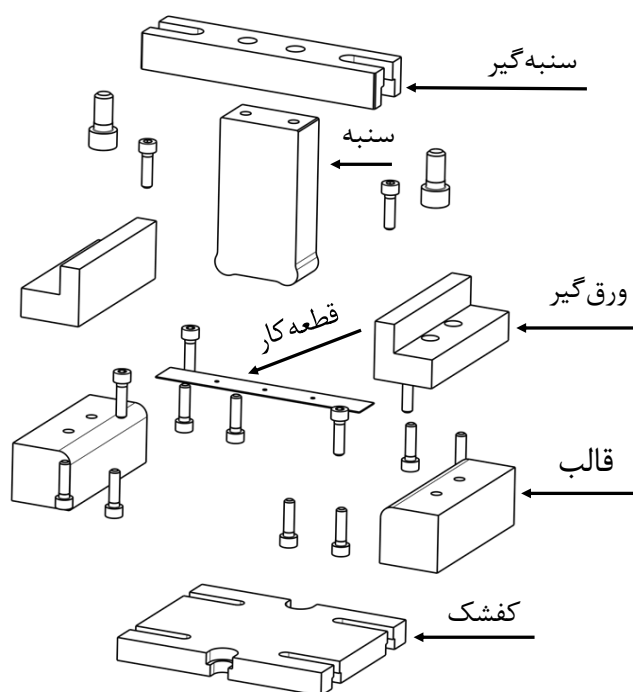
برای محاسبه ضریب ناهمسانگردی، مطابق استاندارد ASTM-E517، مطابق شکل (۲-۷) نمونه‌ها در سه جهت 0° ، 45° و 90° برش داده و طول سنج‌های آن‌ها نشانه گذاری شد [۳۵]. پس از کشش تا ۱۵٪ کرنش شکست آزمون متوقف و کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در راستای طول، عرض و ضخامت اندازه‌گیری و ضرایب ناهمسانگردی مطابق رابطه ۱-۴ متناظر با جهت‌های اصلی به‌دست آمد. همچنین ناهمسانگردی نرمال از رابطه ۱-۶ و ناهمسانگردی صفحه‌ای مطابق رابطه ۱-۷ محاسبه شد.



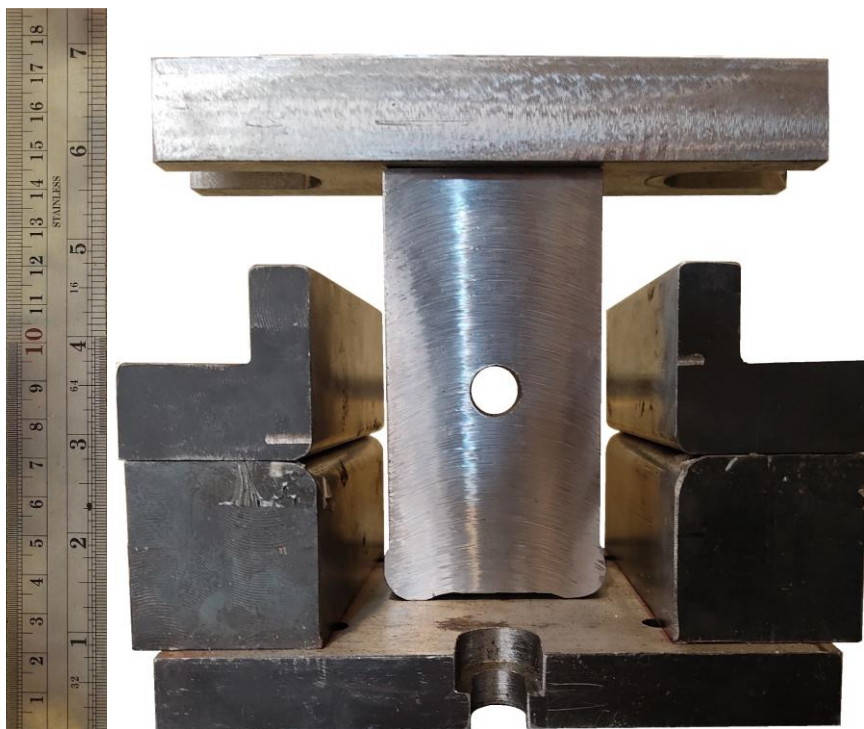
شکل (۲-۷) نمونه‌های علامت گذاری شده برای محاسبه تغییر طول نمونه

۷-۲ طراحی و ساخت قالب

فرایند اتساع با استفاده از قالب سنبه-ماتریس بر روی دستگاه کشش-فشار سنتام STD-600 انجام شد. اجزای چیدمان قالب شامل سنبه و سنبه‌گیر، دو عدد ماتریس و کفشک، به همراه دو عدد ورق‌گیر پیچی و ۴ عدد پیچ آلن M 14 و ۱۴ عدد پیچ آلن M 8 می‌باشد. که همه اجزا از فولاد سردکار آلیاژی ساخته شده است. نمای انفجاری اجزای قالب و قالب ساخته شده به ترتیب در شکل (۸-۲) و شکل (۹-۲) قابل مشاهده می‌باشد. نقشه اجزای قالب در پیوست ۱ ارائه شده است. برای جلوگیری از تماس ورق با پیشانی و دیواره سنبه یک برآمدگی در گوشه سنبه تعبیه شده است.



شکل (۸-۲) نمای انفجاری چیدمان قالب



شکل (۲-۹) چیدمان قالب اتساع

۸-۲ دستگاه سختی سنج یونیورسال^۱

سختی سنبه با اجرای آزمون سختی برینل با استفاده از دستگاه سختی سنج یونیورسال با قطر پراب^۲ $2/5 \text{ mm}$ و کمترین بار $6/25 \text{ Kg}$ بر طبق استاندارد ASTM E10 در سه نقطه سنجیده شد. بر اساس آزمایش انجام شده مقدار متوسط سختی سنبه 202 HB محاسبه شد که بر اساس استاندارد DIN EN ISO 18265 سختی جنس سنبه $683/5 \text{ MPa}$ به دست آمد [۳۶، ۳۷].

^۱ Universal hardness tester

^۲ Probe

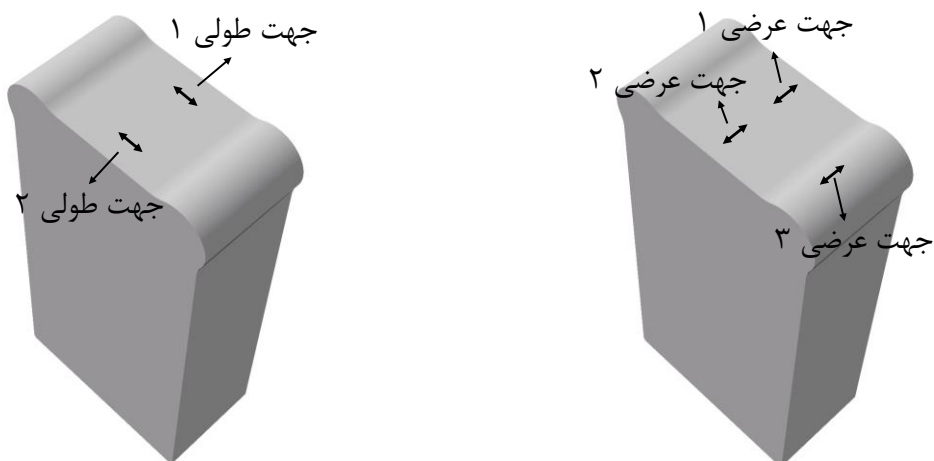


شکل (۲-۱۰) دستگاه سختی‌سنجی یونیورسال

۹-۲ دستگاه زبری‌سنج سطح^۱

سطح سنبه استفاده شده در این پژوهش با استفاده از دستگاه زبری‌سنج Mitutoyo با دقت اندازه‌گیری زبری $0.1 \mu\text{m}$ زبری‌سنجی شد. نکته مهم هنگام استفاده از دستگاه زبری‌سنج کالیبره بودن آن است که برای رسیدن به این هدف از قطعه کالیبراسیونی که برای همین کار در شرکت سازنده دستگاه زبری‌سنج تهیه و ساخته شده است استفاده شد [۳۸]. زبری سطح با پارامترهای مختلفی بیان می‌شود که کاربردی‌ترین و معروف‌ترین آن‌ها Ra ، Rz و Rq می‌باشد که به ترتیب با میانگین حسابی انحراف از خط مورد ارزیابی، جذر متوسط مربع و اندازه ارتفاع ۵ قله بزرگ و عمق ۵ دره عمیق در کل طول نمونه تعیین می‌شوند. زبری سنبه در دو جهت عرضی و طولی در جدول (۲-۴) نمایش داده شده است.

¹ Surface roughness tester



شکل (۲-۱۱) جهت‌های انجام آزمایش تعیین زبری سطح

جدول (۲-۴) داده‌های آزمایش زبری سطح سنبه بر حسب μm

Ra	Rq	Rz	مقطع	راستا
۱/۲۸	۱/۵۳	۶/۲۴	۱	عرضی
۱/۱۹	۱/۴۳	۶/۱۸		
۱/۰۷	۱/۳۲	۶/۰۶		
۰/۴۶	۰/۶	۳/۴	۲	
۰/۴۷	۰/۶	۳/۲۹		
۰/۴۶	۰/۶۲	۳/۳۳		
۱/۲۱	۱/۴۷	۶/۳۸	۳	
۱/۲۲	۱/۴۷	۶/۳۷		
۱/۲۱	۱/۴۶	۶/۳۷		
۰/۹۵	۱,۱۷	۵/۲۹	میانگین مقاطع	
۱/۹۹	۲/۳۶	۹/۲۱	۴	طولی
۱/۸۹	۲/۲۲	۸/۴۷		
۱/۵۹	۲/۰۱	۸/۹۱		
۱/۵۱	۱/۸۴	۷/۷۷	۵	
۱/۵۸	۲/۱	۸/۸۶		
۱/۵۹	۲/۰۱	۸/۹۱		
۱/۶۸	۲/۰۹	۸/۶۹	میانگین مقاطع	



(ب)

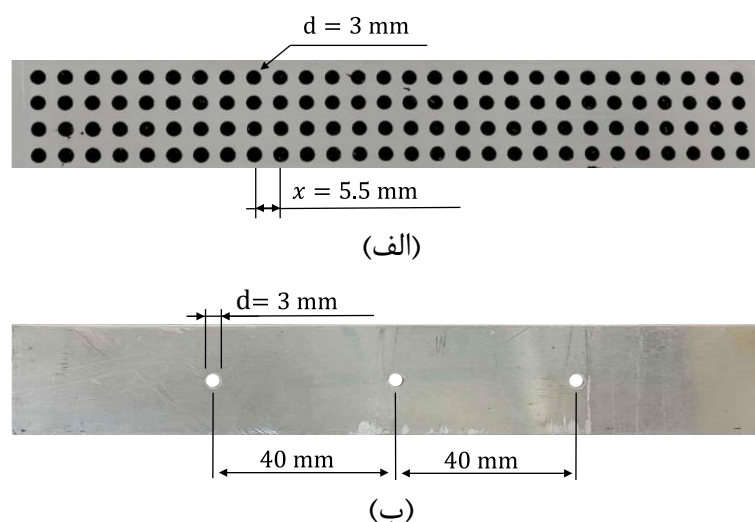


(الف)

شکل (۲-۱۲) سنجش زبری سطح، (الف) دستگاه اندازه‌گیری زبری سطح، (ب) قطعه کالیبراسیون زبری

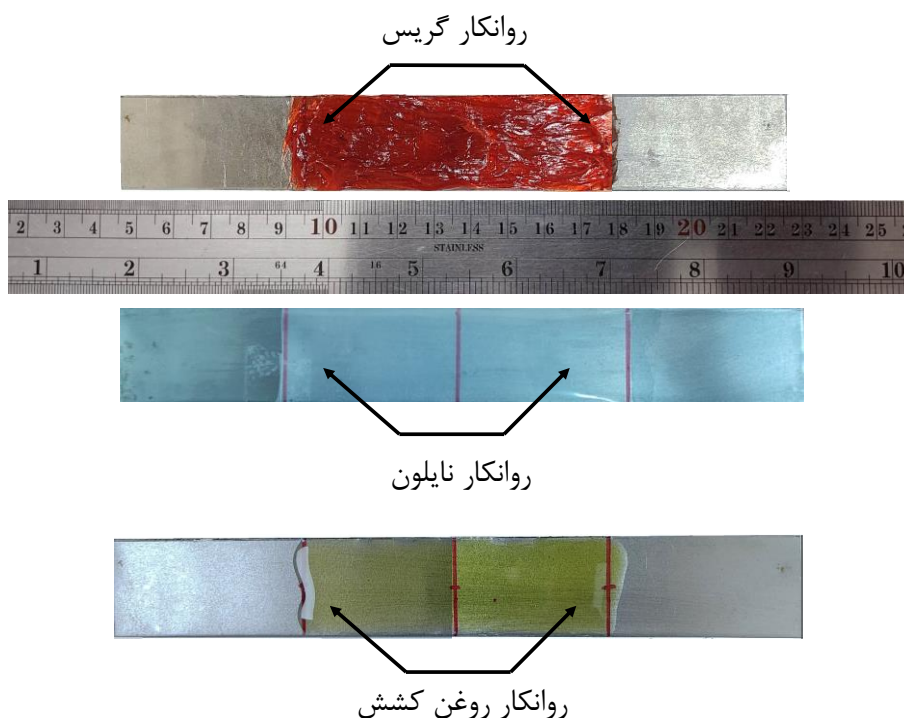
۲-۱۰ آماده‌سازی بلانک اولیه و شرایط روان‌کاری

بلانک اولیه به‌صورت نوار مستطیلی، در ابعاد 170×25 mm در جهت نورد برش زده و از آن دو گروه قطعه‌کار تولید شد. قطعه‌کار گروه ۱ حاوی مش‌بندی دایره‌ای توپر به قطر ۳ mm به روش چاپ سیلک با رنگ روغن و قطعه‌کار گروه ۲ دارای گشودگی دایره‌ای به قطر ۳ mm می‌باشد که با روش مته‌کاری ایجاد شد. نمونه‌های گروه ۱ و ۲ به‌ترتیب در شکل (۲-۱۳)-الف و ب قابل مشاهده است.



شکل (۲-۱۳) نمونه مش‌بندی شده با رنگ روغن و نمونه با مش سوراخ‌دار

فرایند اتساع در حالت خشک، همراه با روان‌کار ورق نایلونی، روغن کشش و گریس اجرا شد. در شکل (۲-۱۴) نمونه‌های روان‌کاری شده با گریس، نایلون و روغن کشش نمایش داده شده‌اند.



شکل (۲-۱۴) استفاده از دو روان کار نایلون و گریس بر روی نمونه

۱۱-۲ شرح انجام آزمایش

پس از قرارگیری بلانک بر روی سطح قالب با استفاده از ۴ پیچ آلن M 8 نیروی ورق گیر تامین می شود. سنبه با ۲ پیچ آلن M 8 بر روی سنبه گیر مقید و مجموعه متحرک با ۲ پیچ آلن M 14 به نحوی بر روی صفحه فوقانی پرس تنظیم می شود که لقی طرفین سنبه با ماتریس برابر باشد. با انجام شبیه سازی فرایند اتساع با لقی قالب مختلف در نرم افزار آباکوس، مشخص شد که با افزایش لقی قالب، تفکیک پذیری نتایج فرایند نیز افزایش می یابد، بر این اساس با توجه به محدودیت ابعادی قالب، لقی قالب ۱۰ mm انتخاب شد. در ادامه طراحی آزمایش ها به صورت سنتی با اعمال جابجایی رم پرس^۱ با سرعت ۱۰ mm/min، فرایند اتساع برای هر دو گروه نمونه سالم و سوراخ دار با سه عمق کشش ۱۰/۵، ۱۵/۷۵ و ۲۱ mm در چهار حالت بدون روان کار، با روان کار روغن کشش، گریس و پلاستیک انجام شد. در حین فرایند اتساع نیروی شکل دهی و جابجایی رم متحرک ثبت شد. در انتها با اندازه گیری تغییر قطر طولی مش های گروه ۱ و گشودگی نمونه های گروه ۲، میزان

^۱ Ram press

اصطکاک در شعاع گوشه سنبه با ورق تعیین شد. جدول (۵-۲) آزمون‌های طراحی شده اتساع را نمایش می‌دهد.

جدول (۵-۲) آزمون‌های طراحی شده فرایند اتساع

نام نمونه	نوع روان‌کار	نوع مش	لقی قالب (mm)	جابجایی رم پرس (mm)
S01	روغن کشش	مش توپر دایره‌ای	۲/۲۵	۱۷
S02	روغن کشش	مش توپر دایره‌ای	۲/۲۵	۱۵
S03	روغن کشش	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۲۱
S04	روغن کشش	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۱۵/۷۵
S05	روغن کشش	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۱۰/۵
S06	نایلون	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۲۱
S07	نایلون	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۲۱
S08	نایلون	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۱۵/۷۵
S09	نایلون	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۱۰/۵
S10	خشک	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۱۰/۵
S11	خشک	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۱۵/۷۵
S12	خشک	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۲۱
S13	گریس	مش توپر دایره‌ای	۱۰	۲۱
S14	نایلون	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۱۵/۷۵
S15	نایلون	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۲۱
S16	نایلون	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۱۰/۵
S17	خشک	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۱۰/۵
S18	خشک	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۱۵/۷۵
S19	خشک	گشودگی دایره‌ای	۱۰	۱۳/۲

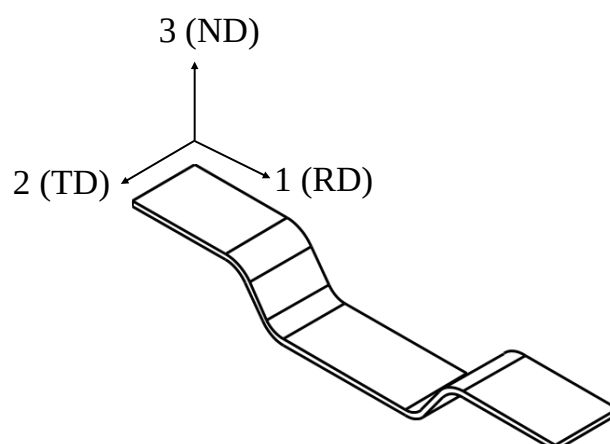
فصل ۳ حل تحلیلی و عددی فرایند اتساع

۱-۳ مقدمه

در ابتدای این فصل، تحلیل فرایند ساده شده اتساع با استفاده از معیار تسلیم هیل-۴۸ انجام شده است. در ادامه چگونگی انجام شبیه‌سازی فرایند اتساع در نرم‌افزار آباکوس تشریح می‌شود.

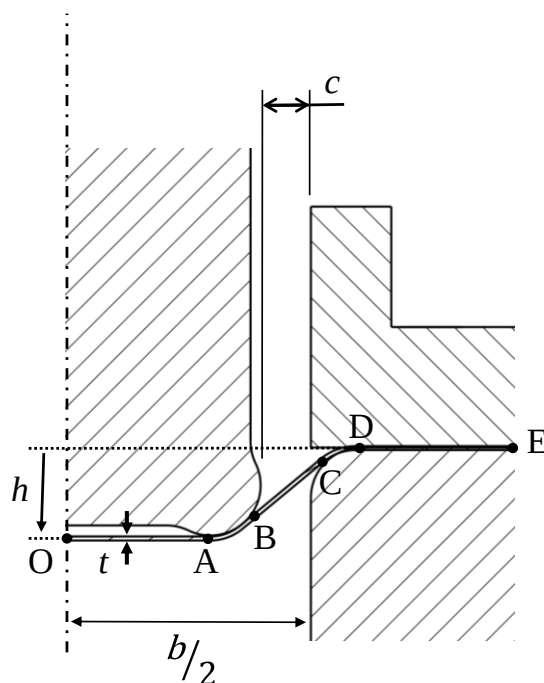
۲-۳ تحلیل فرایند اتساع

مختصات کاری قطعه‌کار به کار رفته در این پژوهش در شکل (۱-۳) نمایش داده شده است. در این شکل جهت نورد ورق در راستای محور ۱ قطعه‌کار می‌باشد.



شکل (۱-۳) طرح‌واره نمونه اتساع شده و جهات اصلی آن

نیمی از چیدمان اجزای قالب در عمق نفوذ سنبه h در شکل (۲-۳)، نمایش داده شده است، توضیح بخش‌های مختلف ورق در هنگام اجرای فرایند اتساع در جدول (۱-۳) فهرست شده است.



شکل (۲-۳) نیمه راست چیدمان قالب اتساع

جدول (۱-۳) بخش‌های مختلف ورق در زمان انجام فرایند اتساع

c	لقی بین سنبه و قالب
h	عمق نفوذ سنبه
$b/2$	نصف دهانه قالب
OA	ورق در پیشانی سنبه
AB	ورق در تماس با کمان گوشه سنبه
BC	ورق جدا از سنبه
CD	ورق در تماس با کمان گوشه قالب
DE	ورق در زیر ورق گیر

در این تحلیل فرض بر این است که تنش حالت صفحه‌ای دارد و محورهای طولی و عرضی ورق محورهای اصلی تانسور تنش و کرنش در نظر گرفته شد. براین اساس از تنش‌های برشی روی صفحه ورق صرف نظر شد. همچنین ماده ناهمسانگرد فرض شده است، مدل ساختاری توانی برای کار سختی برقرار و اصطکاک در طول

تماس ثابت است، همچنین از رفتار الاستیک ماده صرف نظر می‌شود. بر این اساس حالت تنش و کرنش مطابق روابط ۱-۳ و ۲-۳ خواهد بود.

$$\sigma_1, \sigma_2 > 0; \sigma_3 = 0 \quad 1-3$$

$$\varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2, \varepsilon_3 < 0 \quad 2-3$$

نسبت کرنش (β) و نسبت تنش (α) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}; \quad \beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad 3-3$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \rightarrow \varepsilon_3 = -(1 + \beta)\varepsilon_1 \quad 4-3$$

بر اساس شرایط اولیه فرایند نسبت کرنش (β) برابر ۰/۵- فرض می‌شود. ضخامت ورق را می‌توان بر حسب کرنش، به شکل رابطه ۵-۳ نوشت.

$$t = t_0 \exp(\varepsilon_3) \quad 5-3$$

معیار تسلیم هیل ۴۸ به صورت رابطه ۸-۱ بیان می‌شود که می‌توان آن را بر حسب ثوابت ناهمسانگردی لنگفورد در حالت تنش صفحه‌ای به شکل رابطه ۶-۳ بیان کرد [۹].

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}(2r_{45}+1)\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad 6-3$$

با در نظر گرفتن جهت طولی و عرضی به عنوان جهت‌های اصلی تانسور تنش، می‌توان از تنش‌های برشی در این جهت‌ها صرف نظر کرد، یعنی $\sigma_{12} = 0$ که رابطه بالا به شکل زیر ساده می‌شود.

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad 7-3$$

قانون جریان مرتبط به صورت زیر بیان می‌شود:

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad 8-3$$

در این شرایط نسبت کرنش و نسبت تنش با استفاده از روابط ۳-۳، ۶-۳ و ۸-۳ به شکل زیر محاسبه خواهد شد.

$$\beta = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = \frac{\frac{-r_0}{1+r_0}\sigma_1 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2}{\sigma_1 - \frac{r_0}{1+r_0}\sigma_2} \Rightarrow \alpha = \frac{r_{90}[\beta(1+r_0) + r_0]}{r_0[r_{90}(1+\beta) + 1]} \quad 9-3$$

تنش موثر در معیار تسلیم هیل ۴۸ به صورت رابطه ۱۰-۳ نوشته می شود.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{r_0(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + r_{90}(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + r_0 r_{90}(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{r_{90}(r_0 + 1)}} \quad 10-3$$

رابطه تنش طولی σ_1 ، بر حسب تنش موثر $\bar{\sigma}$ برای معیار تسلیم هیل به شکل رابطه ۱۱-۳ به دست خواهد.

$$\sigma_1 = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{\frac{(r_0\alpha^2 + r_{90} + r_0 r_{90} + r_0 r_{90}\alpha^2 - 2r_0 r_{90}\alpha)}{r_{90}(r_0 + 1)}}} \quad 11-3$$

و رابطه کرنش موثر $\bar{\varepsilon}$ برای این معیار به شکل رابطه ۱۲-۳ نوشته خواهد شد [۸].

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{\sqrt{\frac{r_0 + 1}{r_0}}}{r_0 + r_{90} + 1} \right) \sqrt{[r_{90}(\varepsilon_2 - r_0\varepsilon_3)^2 + r_0(r_{90}\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (r_0\varepsilon_1 + r_{90}\varepsilon_2)^2]} \quad 12-3$$

همان طور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است، نیروی کششی مماسی در واحد عرض ورق، از جای گذاری

روابط ۳-۵، ۱۱-۳ و ۱۲-۳ در رابطه ۱۳-۳ محاسبه خواهد شد.

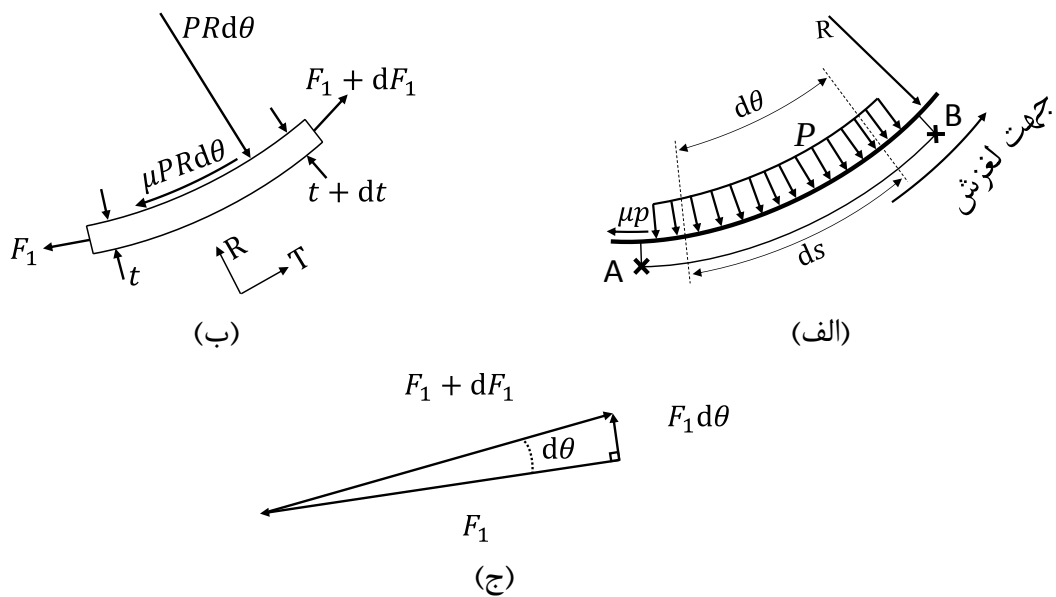
$$F_1 = \sigma_1 t \quad 13-3$$

$$F_1 = \frac{K \left(\varepsilon_0 + \left(\frac{\sqrt{\frac{r_0 + 1}{r_0}}}{r_0 + r_{90} + 1} \right) \sqrt{[r_{90}(\varepsilon_2 - r_0\varepsilon_3)^2 + r_0(r_{90}\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (r_0\varepsilon_1 + r_{90}\varepsilon_2)^2]} \right)^n}{\sqrt{\frac{(r_0\alpha^2 + r_{90} + r_0 r_{90} + r_0 r_{90}\alpha^2 + 2r_0 r_{90}\alpha)}{r_{90}(r_0 + 1)}}} \times t_0 \exp(-\varepsilon_1) \quad 14-3$$

برای بررسی تعادل استاتیکی در یک جزء لغزنده بر روی سطح اصطکاکی، یک جزء بزرگتر از طول قوس ds

را در شکل (۳-۳) الف در نظر می گیریم. در شکل (۳-۳) الف سطح ابزار، خمیده فرض می شود و p فشار

تماس، μp تنش برشی اصطکاکی و μ ضریب اصطکاک است. در شکل (۳-۳) ب کشش و ضخامت به دلیل نیروی اصطکاک تغییر می کند. طول المان را می توان بر حسب شعاع ابزار و زاویه چرخش نوشت، در شکل (۳-۳) ج نیروی وارد بر المان به شکل شعاعی و به سمت خارج است و نیروی مماس بر ورق در اثر اصطکاک ایجاد می شود. در این شکل نیروهای کششی F_1 و $F_1 + dF_1$ هستند. همان طور که در شکل (۳-۳) ج نشان داده شده است، جهت نیروهای کششی با زاویه $d\theta$ متفاوت است، بنابراین یک جزء نیرو شعاعی $F_1 d\theta$ به داخل وجود دارد.



شکل (۳-۳) بررسی تعادل استاتیکی، (الف) لغزش یک جز از ورق بر روی سطح ابزار، (ب) نمایش ضخامت و نیروهای المان، (ج) بردار نیروهای کششی و شعاعی به سمت داخل

از شکل (۳-۳) در شرایط تعادل نیروها در طول ورق، اگر نیروی کشش در یک بخش مانند نقطه A مشخص باشد، با انتگرال گیری از رابطه ۳-۱۶ می توان نیروی کشش را به کمک رابطه ۳-۱۷ در نقطه دیگر مانند نقطه B تعیین کرد.

$$\sum F_R = 0 \rightarrow F_1 d\theta = PR d\theta \rightarrow P = \frac{F_1}{R} \quad ۱۵-۳$$

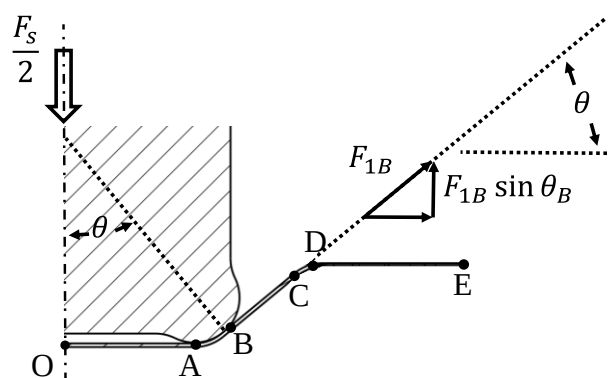
$$\sum F_T = 0 \rightarrow (F_1 + dF_1) - F_1 = \mu PR d\theta \rightarrow dF_1 = \mu PR d\theta \rightarrow \frac{dF_1}{F_1} = \mu d\theta \quad ۱۶-۳$$

$$\int_{F_A}^{F_B} \frac{dF_1}{F_1} = \int_{\theta_A}^{\theta_B} \mu d\theta \rightarrow F_B = F_A \exp(\mu \theta_{AB}) \quad ۱۷-۳$$

همانطور که در شکل (۳-۳) نشان داده شده است نیروی وارد بر سنبه با نیروی کشش دیوار جانبی در تعادل است، جزء عمودی این نیرو، نیروی کششی $F_{1B} \sin \theta$ است که زاویه θ_B دیواره را می‌توان از روابط هندسی به دست آورد. بنابراین نیروی وارد به سنبه در واحد عرض ورق، با در نظر گرفتن هر دو طرف ورق از رابطه ۳-۱۸ به دست خواهد آمد.

$$F_S = 2F_{1B} \sin \theta_B$$

۳-۱۸



شکل (۳-۴) نیروهای داخلی و خارجی اعمالی به ورق و سنبه

توزیع کرنش در طول ورق از حل ۳-۱۴ به دست خواهد آمد.

۳-۳ مدل‌سازی عددی فرایند اتساع در نرم‌افزار آباکوس^۱

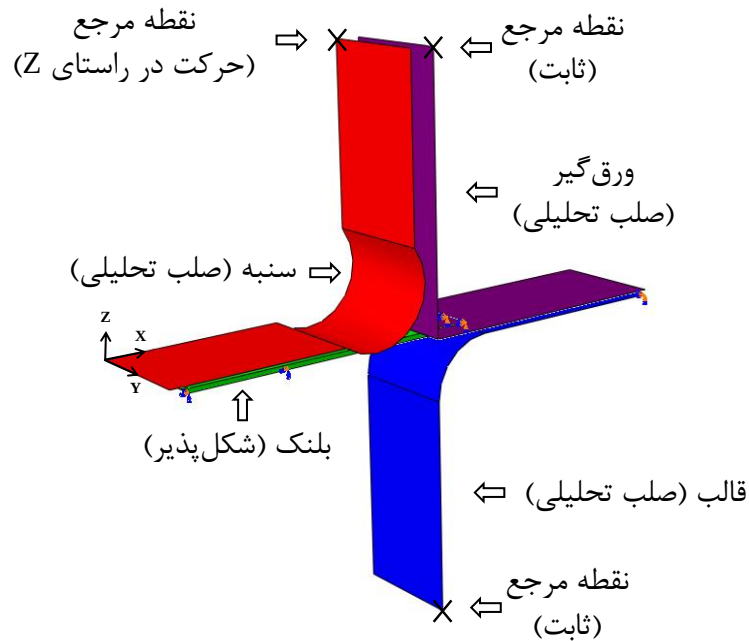
فرایند اتساع با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ۶/۱۴ مدل‌سازی شد. اجزای مدل شامل سنبه، قالب و ورق گیر به صورت پوسته‌ی صلب تحلیلی^۲ و قطعه‌کار تغییر شکل پذیر^۳ می‌باشد. مطابق شکل (۳-۵) به علت تقارن فرایند اتساع، $\frac{1}{4}$ بلانک مدل شد. شرایط تماسی سطح به سطح^۴ با مدل اصطکاکی پنالتی و ضرایب ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ شبیه‌سازی شد.

^۱ Abaqus

^۲ Analytical rigid

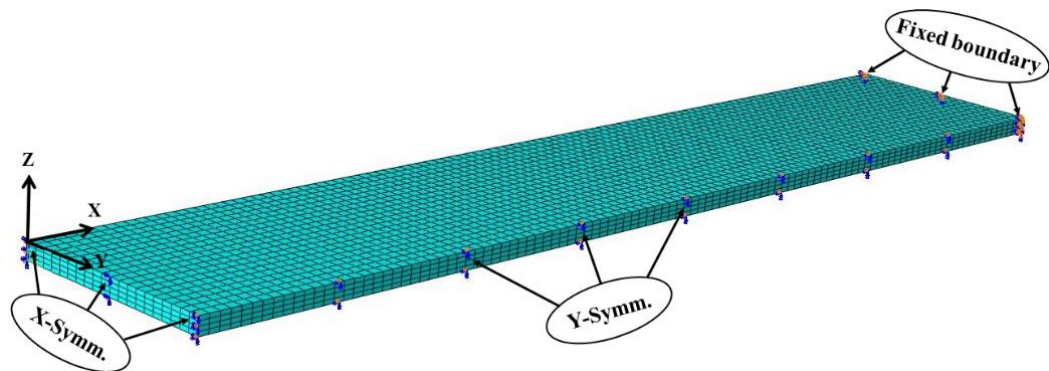
^۳ Deformable

^۴ Surface to surface contact



شکل (۳-۵) چیدمان قالب و قطعه کار سالم طراحی شده در نرم افزار آباکوس

شکل (۳-۶) روش المان بندی بلانک سالم را نشان می دهد. در این شکل از قیدهای تقارن روی صفحه های ZY و ZX استفاده شده است. نیروی زیاد ورق گیر از جابجایی ورق در این ناحیه زیر ورق گیر جلوگیری می کند. لذا بخشی از ورق که در زیر ورق گیر قرار دارد حذف و قید ENCASTRE بر روی سطح جانبی ورق اعمال شد.

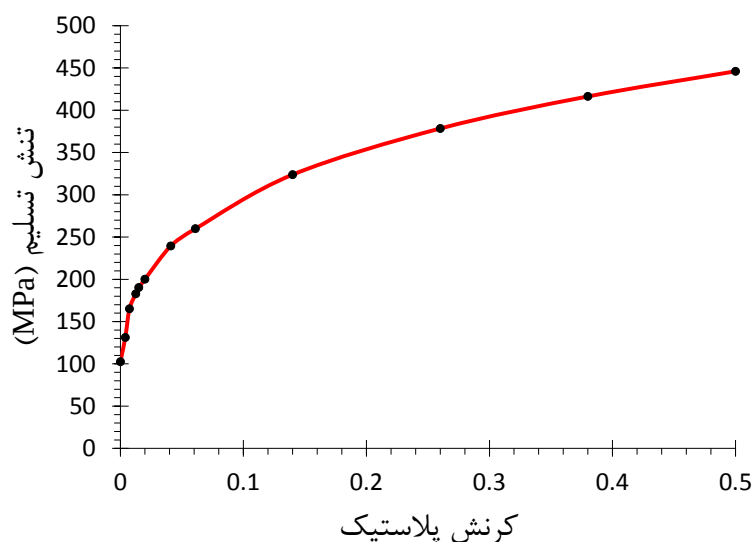


شکل (۳-۶) شرایط مرزی اعمالی بر بلانک شبیه سازی شده

ورق به صورت الاستیک-پلاستیک با خواص مکانیکی مطابق جدول (۳-۲)، منحنی تنش-کرنش پلاستیک شکل (۳-۷) مدل شد.

جدول (۲-۳) خواص مکانیکی ورق فولادی DC04 [۳۹]

۷۸۰۰	چگالی (Kg/m ³)
۲۱×۱۰ ^۴	مدول یانگ (MPa)
۰/۳	نسبت پواسون



شکل (۷-۳) تنش-کرنش پلاستیک

ثوابت ناهمسانگردی ورق در بخش پتانسیل از نرم افزار آباکوس با جای گذاری ضرایب ناهمسانگردی محاسبه شده از آزمایش کشش تک محوری در روابط ۱۹-۳، ۲۰-۳ و ۲۱-۳ به دست آمد [۲۹].

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)}} \quad ۱۹-۳$$

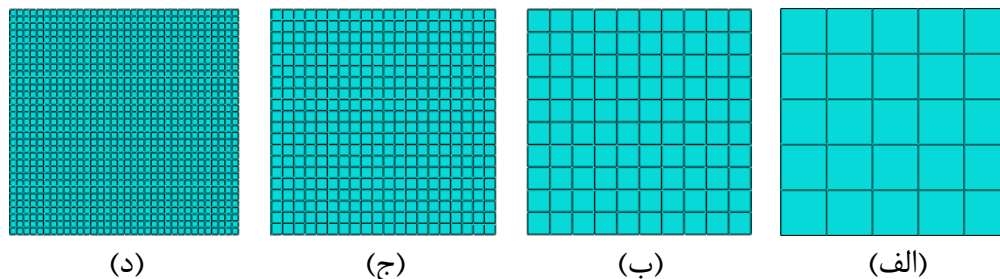
$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0 + r_{90}}} \quad ۲۰-۳$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90}(r_0 + 1)}{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}} \quad ۲۱-۳$$

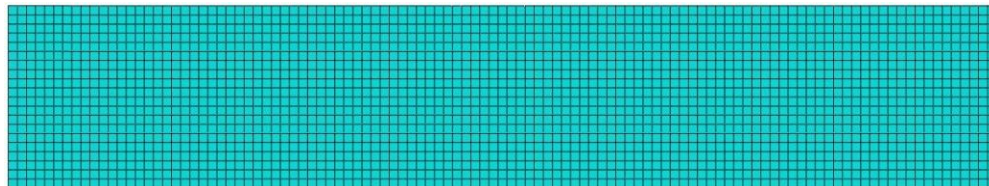
جدول (۳-۳) ثوابت مورد استفاده برای تعریف ناهمسانگردی در نرم افزار آباکوس

R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
۱	۱/۰۶۸	۰/۹۶	۱/۱۲	۱	۱

برای المان‌بندی قطعه‌کار سالم از المان جامد سه بعدی ۸ گره‌ای، با روش انتگرال‌گیری کاهش یافته و کنترل پدیده ساعت شنی (C3D8R) استفاده شد. برای بررسی اثر حساسیت به اندازه المان مطابق شکل (۳-۸) چهار نوع المان‌بندی درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز پیاده‌سازی و شبیه‌سازی انجام شد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده که جزئیات آن در فصل ۴ ارائه خواهد شد المان‌بندی ریز که در شکل (۳-۸) ج نمایش داده شده است، انتخاب شد. با توجه همگرا شدن نمودارهای تنش-کرنش نمایش داده شده در شکل (۴-۱۲) و شکل (۴-۱۳) در اندازه المان ریز و خیلی ریز، قطعه‌کار سالم با اندازه المان ریز و چهار المان در ضخامت شبیه‌سازی شد. مش بهینه قطعه‌کار سوراخ‌دار در شکل (۳-۹) نمایش داده شده است.



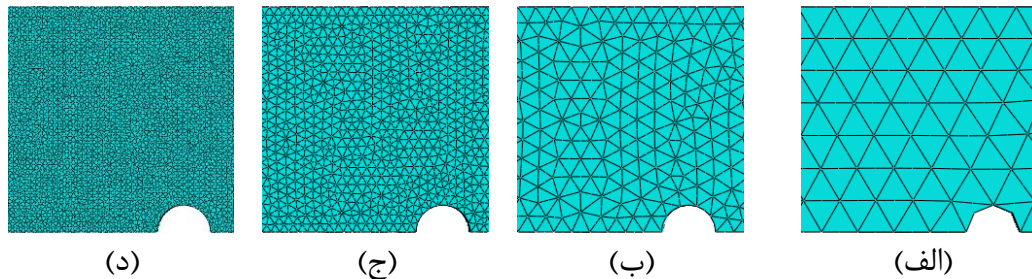
شکل (۳-۸) نحوه مش‌بندی قطعه‌کار سالم در نرم‌افزار آباکوس، (الف) مش با اندازه المان درشت، (ب) مش با اندازه المان متوسط، (ج) مش با اندازه المان ریز، (د) مش با اندازه المان خیلی ریز



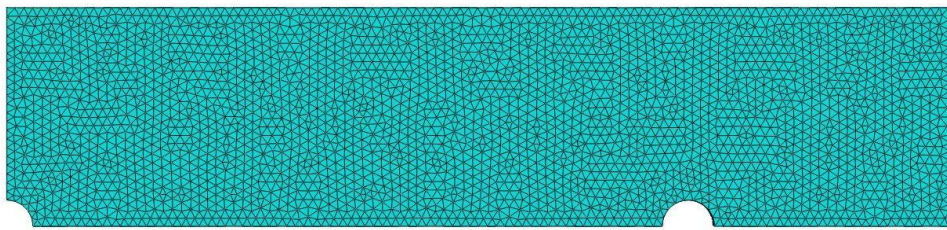
شکل (۳-۹) مش بهینه قطعه‌کار سالم

برای المان‌بندی قطعه‌کار سوراخ‌دار از المان جامد سه بعدی ۱۰ گره‌ای، (C3D10M) استفاده شده است. المان C3D10M توانایی بالایی در حل مسائل با تغییر شکل بزرگ و مسائل تماسی گره به سطح سنتی و گسسته‌سازی تماس سطح به سطح و نمایش حداقل تنش برشی و قفل شدگی حجمی را دارد. برای بررسی اثر حساسیت به اندازه المان مطابق شکل (۳-۱۰) چهار نوع المان‌بندی درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز پیاده‌سازی و شبیه‌سازی انجام شد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده که جزئیات آن در فصل ۴ ارائه خواهد شد المان‌بندی ریز که در شکل (۳-۱۰) ج نمایش داده شده است، انتخاب شد. با توجه همگرا شدن نمودار

کالیبراسیون اصطکاکی نمایش داده شده در شکل (۴-۱۹) در اندازه المان ریز و خیلی ریز، قطعه کار سوراخ دار (دارای گشودگی دایره‌ای) با اندازه المان ریز و چهار المان در ضخامت شبیه‌سازی شد. مش بهینه قطعه کار سوراخ دار در شکل (۳-۱۱) نمایش داده شده است.



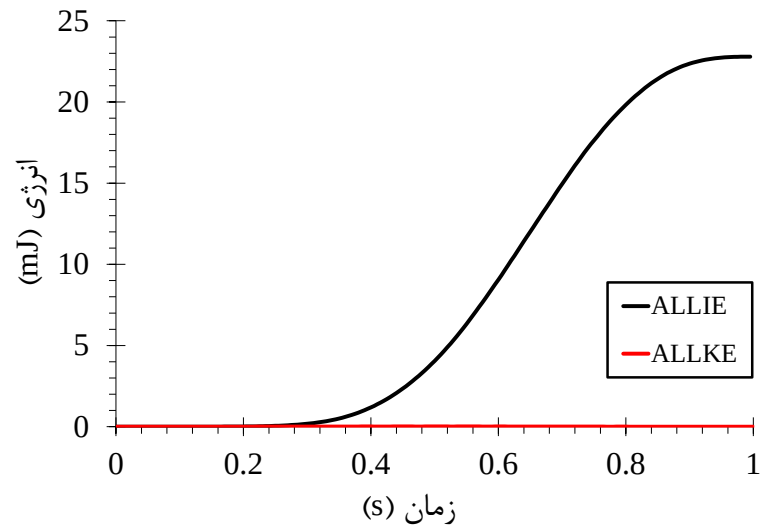
شکل (۳-۱۰) نحوه مش‌بندی قطعه کار سوراخ دار در نرم‌افزار آباکوس، (الف) مش با اندازه المان درشت، (ب) مش با اندازه المان متوسط، (ج) مش با اندازه المان ریز، (د) مش با اندازه المان خیلی ریز



شکل (۳-۱۱) مش بهینه قطعه کار سوراخ دار

فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی در دسته فرایندهای شبه‌استاتیکی قرار می‌گیرند. حلگر صریح آباکوس مسائل شبه‌استاتیکی را با سرعت و سهولت بیشتری نسبت به حلگر ضمنی آباکوس، حل می‌کند. همچنین در مقایسه با روش ضمنی به منابع سخت‌افزاری کمتری نیاز دارد. بر این اساس در این پایان‌نامه از حلگر صریح در شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد [۲۹].

در شبیه‌سازی حاضر از روش بزرگ‌نمایی جرم برای بهبود بازده محاسباتی با دقت قابل قبولی، استفاده شد. بر این اساس مدل انرژی درونی-جنبشی نمایش داده شده در شکل (۳-۱۲)، به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی تاثیر بزرگ‌نمایی جرم بر پاسخ شبیه‌سازی فرایند به کار رفته است. به‌علت کم‌تر بودن انرژی جنبشی از ۱۰٪ انرژی داخلی، نتیجه می‌شود که بزرگ‌نمایی جرم باعث کاهش دقت در پاسخ شبیه‌سازی نشده است.



شکل (۱۲-۳) مقایسه انرژی جنبشی با انرژی داخلی

فصل ۴ نتایج و بحث

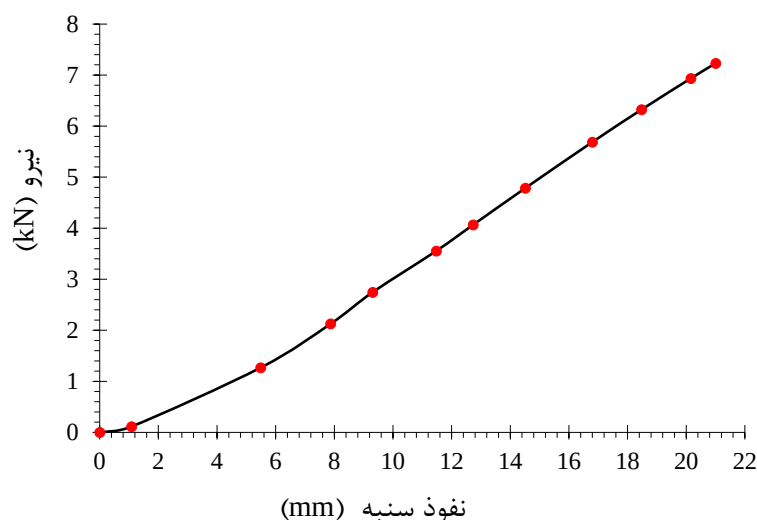
۴-۱ مقدمه

در این فصل نتایج تجربی شامل نتایج اتساع بلانک سالم و سوراخ‌دار با دو حالت اصطکاکی خشک و با روان‌کار نایلون و سه جابجایی مختلف سنبه ارائه خواهد شد. نتایج حل تحلیلی اتساع نیز برای سه جابجایی فوق با ضریب اصطکاک $0/3$ ارائه می‌شود. همچنین نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون اتساع دو قطعه‌کار سالم و سوراخ‌دار برای ضرایب اصطکاک 0 ، $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ ، $0/4$ و $0/5$ بیان و در آخر منحنی کالیبراسیون اصطکاکی استخراج و ضرایب اصطکاکی آزمون‌های تجربی به کمک آن به دست می‌آید.

۴-۲ نتایج اتساع بلانک سالم

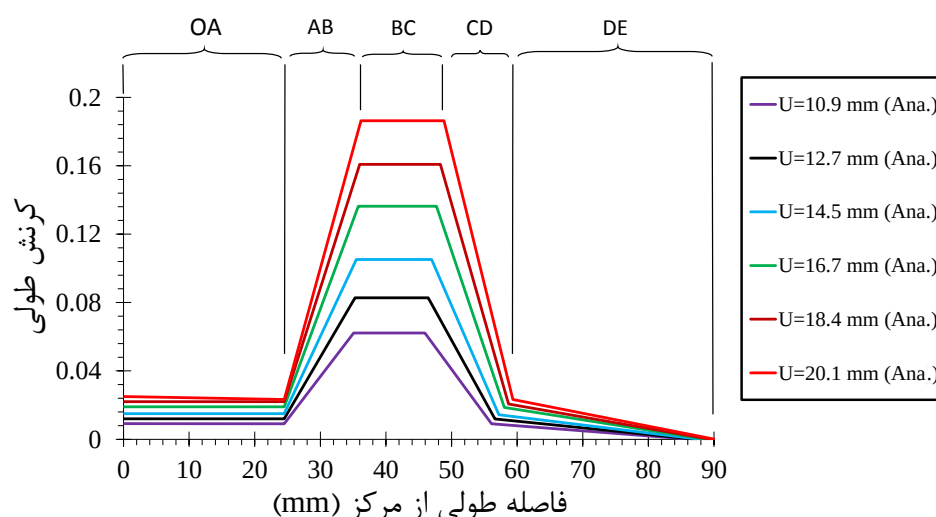
۴-۱-۱ نتایج تحلیلی

در این بخش نتایج مربوط به حل تحلیلی فرایند اتساع بلانک سالم شامل نیروی فرایند و منحنی تغییرات تنش، کرنش و ضخامت قطعه بر روی مسیر طولی آن ارائه می‌شود. در این روش برای جابجایی‌های مختلف با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک $0/3$ بین اجزای قالب و ورق، حل تحلیلی تکرار و نتایج مربوط به نیرو، توزیع کرنش طولی، توزیع تنش و ضخامت به دست آمد. در شکل (۴-۱) منحنی نیرو-جابجایی سنبه محاسبه شده از حل تحلیلی ارائه شده است.



شکل (۴-۱) نیروی اتساع نسبت به نفوذ سنبه به دست آمده از روش تحلیلی

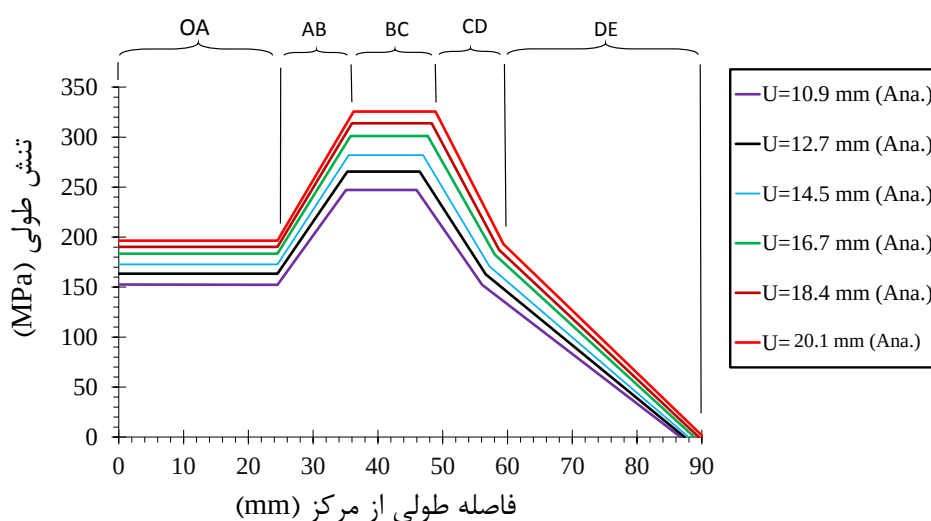
در شکل (۴-۲) توزیع کرنش طولی نمونه به دست آمده از روش تحلیلی برای نواحی مختلف ورق نمایش داده شده است. نتایج روش تحلیلی با حل رابطه ۳-۱۴ در شش حالت نفوذ سنبه محاسبه شده است. بر طبق آزمون‌های تجربی بیش‌ترین کرنش در ناحیه لقی قالب و سنبه ایجاد می‌شود که در صورت ادامه یافتن فرایند تا عمق بیش از ۲۱ mm، ورق از ناحیه BC به گلویی می‌رسد و در آخر پاره خواهد شد، لذا در این تحلیل تا عمق کشش ۲۰/۱ mm نتایج ارائه شده است.



شکل (۴-۲) تغییرات کرنش بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک ۰/۳

در شکل (۴-۳) تنش طولی در نقاط مختلف نمونه از مرکز تا لبه نمایش داده شده است. داده‌های تنش در این نمودار با استفاده از جای‌گذاری مولفه کرنش در روابط ۳-۱۱ و ۳-۱۲ به دست آمده است. با توجه به رابطه

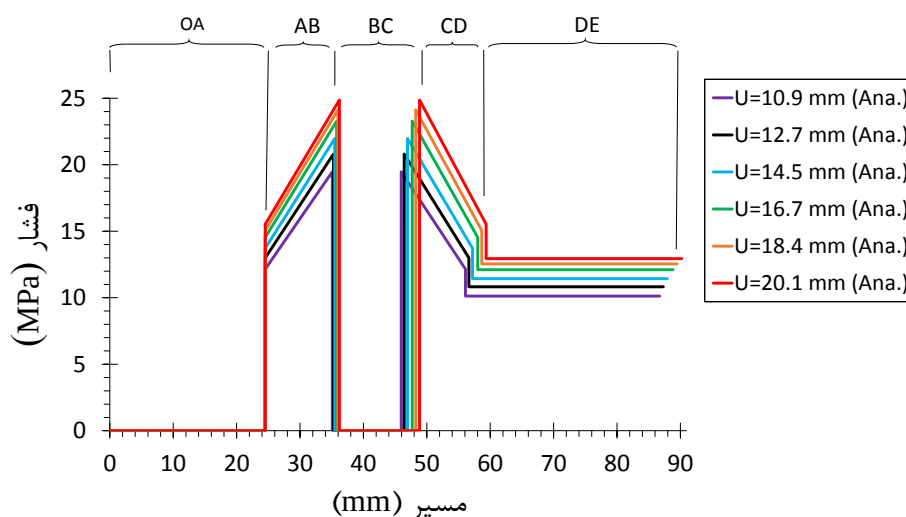
ساختاری توانی بین تنش موثر و کرنش موثر روند کلی حاکم بر منحنی تنش طولی مشابه کرنش طولی است؛ به نحوی که بیشترین تنش در بخش دیواره قطعه (ناحیه ی BC) اتفاق می افتد. افزایش شدید تنش و کرنش در شعاع گوشه سنبه (AB) و شعاع گوشه ماتریس (CD) به علت نیرو اصطکاک، مماس بر ورق می باشد. براین اساس کنترل شرایط اصطکاکی بین ورق و اجزای قالب، با ایجاد یکنواختی در توزیع تغییر شکل طولی قطعه، نقش موثری بر کاهش سطح تنش و کرنش و در نتیجه افزایش قابلیت اتساع خواهد داشت.



شکل (۳-۴) تغییرات تنش بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک ۰/۳

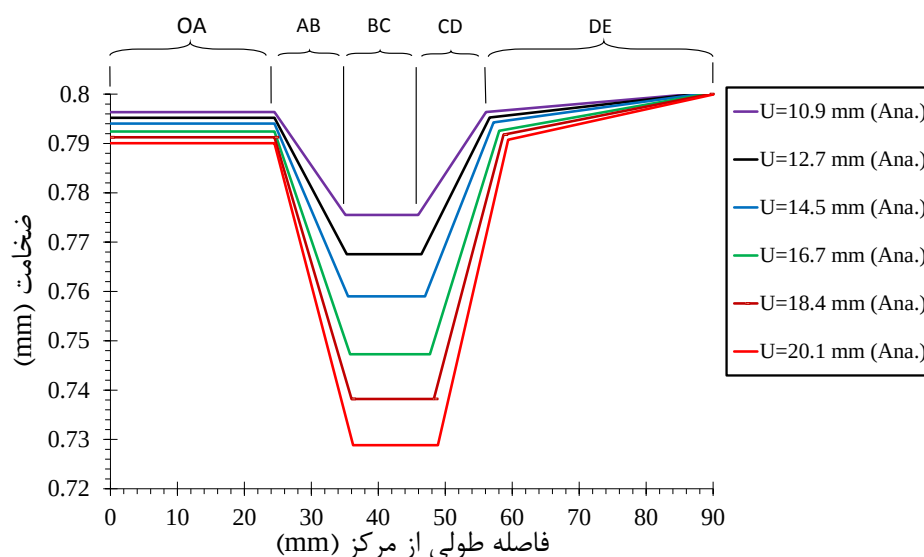
توزیع فشار به دست آمده از حل تحلیلی فرایند اتساع در شکل (۴-۴) نمایش داده شده است. با توجه این شکل فشار وارد شده بر سطح قطعه کار در دو ناحیه AB و CD دارای مقدار بزرگتر از صفر و به ترتیب صعودی و نزولی می باشد. همچنین فشار در ناحیه DE که مربوط به بخش زیر ورق گیر است، ثابت می باشد. به علت عدم تماس سنبه با ورق، فشار وارد شده بر در دو ناحیه ی OA و BC صفر می باشد. همچنین با مقایسه شکل (۴-۳) و شکل (۴-۴) مشخص می شود که مقدار فشار بیشینه ۲۵ MPa در مقایسه با تنش بیشینه ۳۲۵ MPa عدد ناچیزی است و بر اساس این نتیجه، صحت فرض حالت تنش دو محوری در تحلیل فرایند اتساع تایید می شود. همچنین فشار بیشینه فرایند که برابر ۲۵ MPa است در مقایسه با استحکام ۶۸۳/۵ MPa سنبه که از آزمون سختی سنجی برینل و تبدیل آن به استحکام به دست آمده بسیار کوچکتر است و نشان می دهد که

فشار فرایند اتساع قادر به ایجاد ایجاد تغییر شکل پلاستیک در سنبه نبوده و نمی‌تواند زبری سطح سنبه را در طی انجام فرایند تغییر دهد.



شکل (۴-۴) تغییرات فشار بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک ۰/۳

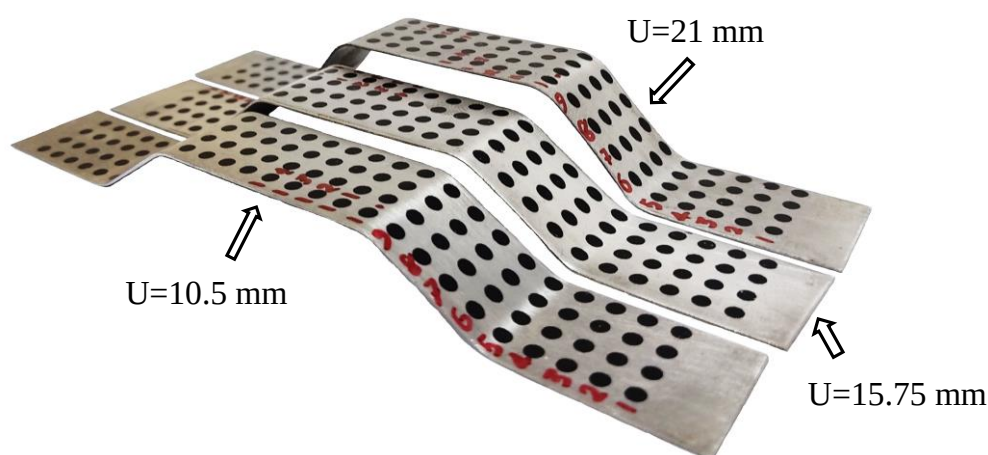
توزیع ضخامت به دست آمده از حل تحلیلی در شکل (۴-۵) نمایش داده شده است. بیشترین کاهش ضخامت مربوط به بحرانی ترین ناحیه با بیشترین مقدار تنش و کرنش یعنی دیواره قطعه (ناحیه BC) می‌باشد.



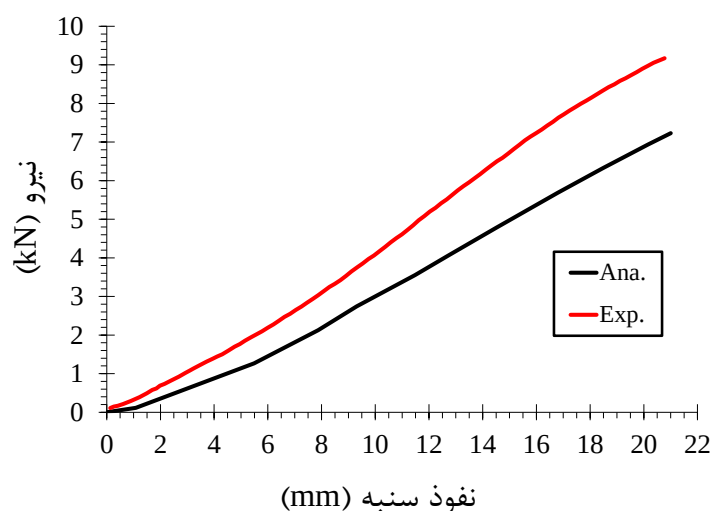
شکل (۴-۵) تغییرات ضخامت بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک ۰/۳

۴-۱-۲ مقایسه نتایج تحلیلی و تجربی

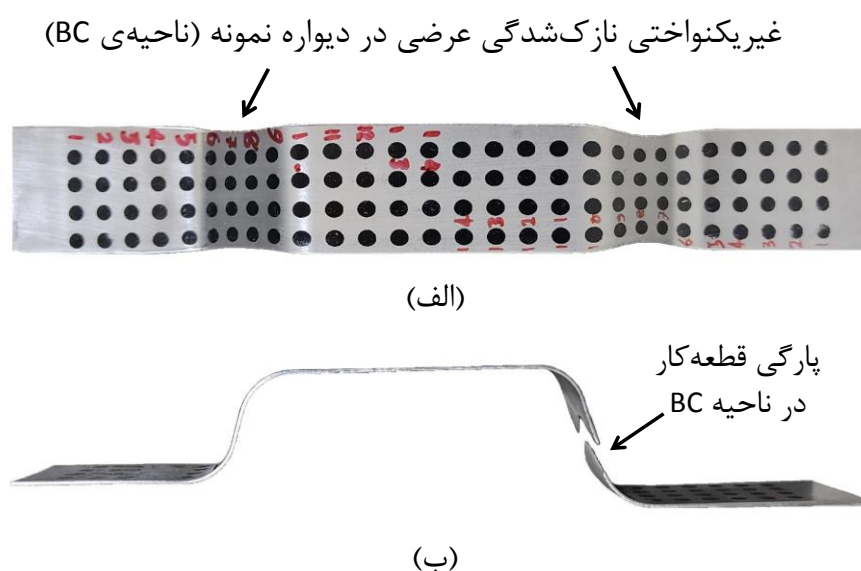
در این بخش نتایج مربوط به حل تحلیلی و تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۴-۶) نمونه شکل داده شده با استفاده از قالب اتساع در سه جابجایی ۱۰/۵، ۱۵/۷۵ و ۲۱ mm نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری توزیع کرنش و ضخامت ابتدا مش‌های دایره‌ای در طول نمونه، شماره‌گذاری و قطر بیضی‌ها اندازه‌گیری و مقادیر کرنش متناظر به‌دست آمد.



شکل (۴-۶) بلانک سالم مش‌بندی شده با چاپ سیلک پس از شکل‌دهی با سه جابجایی مختلف سنبه در شکل (۴-۷) منحنی نیرو-جابجایی فرایند اتساع بلانک سالم برای دو روش تجربی و تحلیلی ارائه شده است. در حالی که روند کلی تغییرات نیرو برای دو روش پیوسته افزایشی است حداکثر نیروی فرایند در روش تحلیلی برابر ۷/۱۳ kN پیش‌بینی شده است که به میزان ۲۳/۲۷٪ از نیروی تجربی کم‌تر است. علت این خطا را می‌توان به فرض یکنواختی کرنش قطعه در مدل تحلیلی مرتبط دانست. برخلاف این فرض نتایج مشاهدات تجربی مطابق شکل (۴-۸) الف نشان داد که نمونه در نواحی مختلف، به‌علت تغییر شرایط مرزی موضعی تغییر عرض متفاوتی دارد. این درحالی است که در روش تحلیلی به جهت ساده‌سازی مدل، نسبت ثابت کرنش و تنش در همه نواحی فرض شده است.



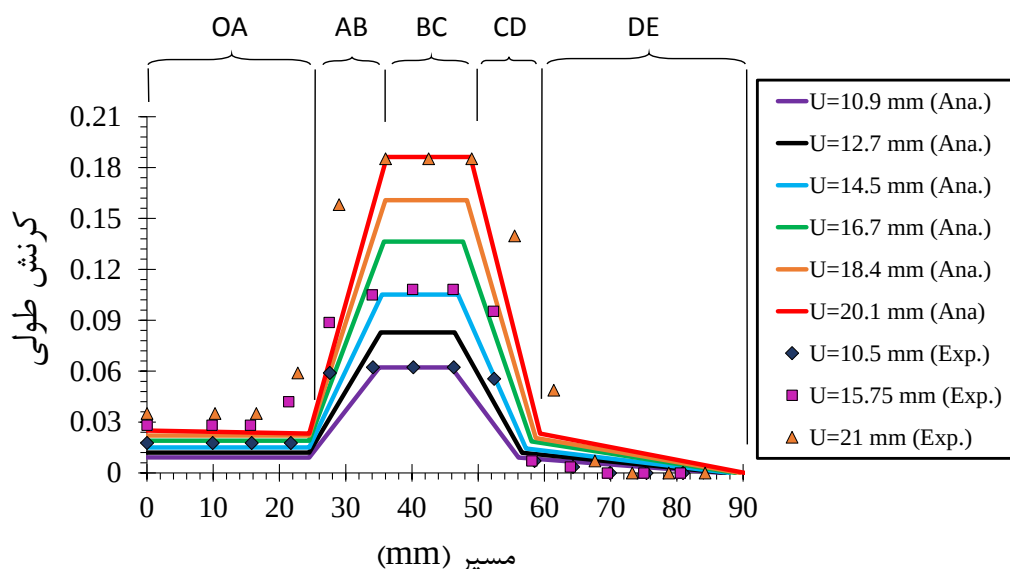
شکل (۷-۴) نیروی شکل‌دهی نسبت به نفوذ سنبه به‌دست آمده از روش تحلیلی و آزمون اتساع



شکل (۸-۴) شکل‌دهی قطعه‌کار سالم، (الف) غیریکنواختی تغییر شکل عرضی در دیواره قطعه شده (ب)، پارگی قطعه‌کار شکل‌دهی شده در ناحیه BC با نفوذ سنبه بیش‌تر از ۲۱ mm

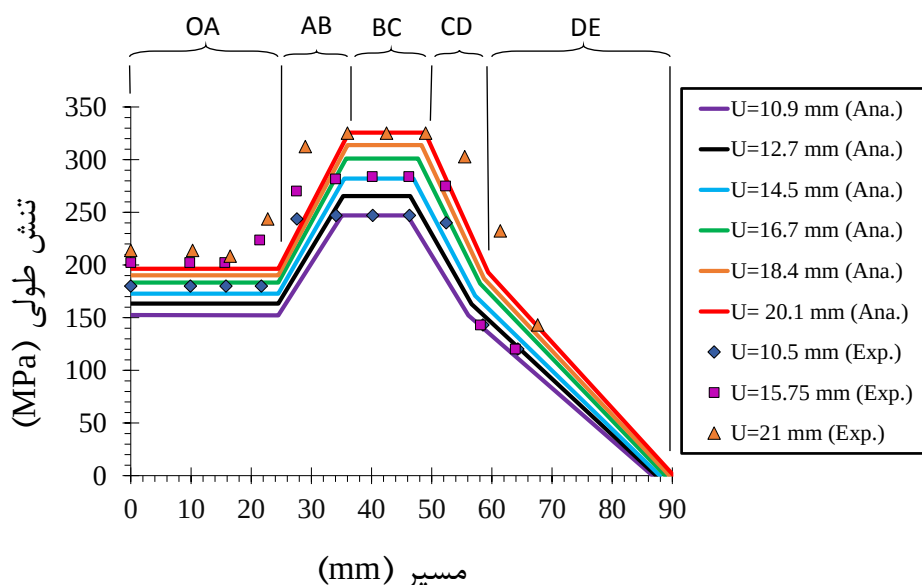
در شکل (۹-۴) توزیع کرنش طولی نمونه به‌دست آمده از روش تحلیلی و تجربی نمایش داده شده است. نتایج روش تحلیلی با حل رابطه ۳-۱۴ در شش حالت نفوذ سنبه محاسبه شده است. بیش‌ترین کرنش در ناحیه لقی قالب و سنبه ایجاد می‌شود که در صورت ادامه یافتن فرایند تا عمق بیش از ۲۱ mm، ورق از ناحیه BC به گلویی می‌رسد و در آخر پاره خواهد شد. نتایج تخمین تئوری توزیع کرنش از دقت قابل قبولی بویژه در ناحیه بحرانی دیواره نمونه برخوردار است اگر چه خطای متوسط روش تحلیلی در مقایسه با نتایج تجربی ۱۸/۹٪

است. در بخش‌هایی که ورق با سنبه تماس ندارد یعنی در زیر سنبه مقدار کرنش ثابت می‌باشد، همچنین توزیع تنش در ناحیه پیشانی قطعه کار به علت عدم تماس سنبه با ورق یکسان است. این نتیجه توسط داده‌های آزمایشگاهی نیز تایید می‌شود. در شکل (۴-۸) ب- پارگی در ناحیه دیواره قطعه (بخش BC) را که با نفوذ سنبه بیش‌تر از ۲۱ mm شکل‌دهی شده نمایش می‌دهد.



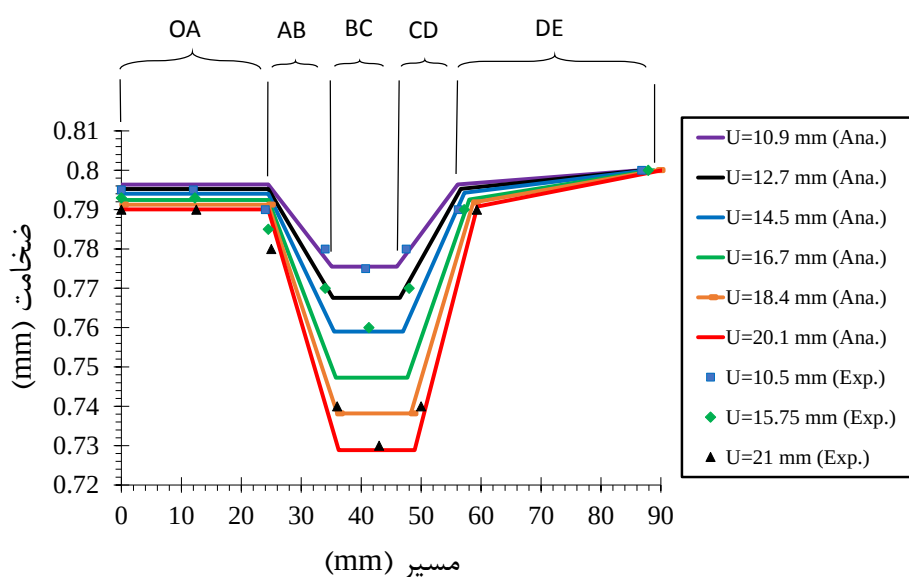
شکل (۴-۹) نمودار کرنش طولی بر روی مسیر طولی نمونه حاصل از روش تحلیلی و تجربی

در شکل (۴-۱۰) تنش طولی در نقاط مختلف نمونه از مرکز تا لبه نمایش داده شده است. داده‌های تنش در این نمودار با استفاده از جای‌گذاری کرنش محاسبه شده از دو روش تحلیلی و آزمایشگاهی در روابط ۳-۱۱ و ۳-۱۲ به دست آمده است. نتایج فوق دقت قابل قبول حل تحلیلی در تخمین مقادیر تنش طولی را نشان می‌دهد. بیش‌ترین خطا در این تخمین مربوط به ناحیه گردی گوشه سنبه است.



شکل (۴-۱۰) تغییرات تنش بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک ۰/۳ و آزمون تجربی اتساع

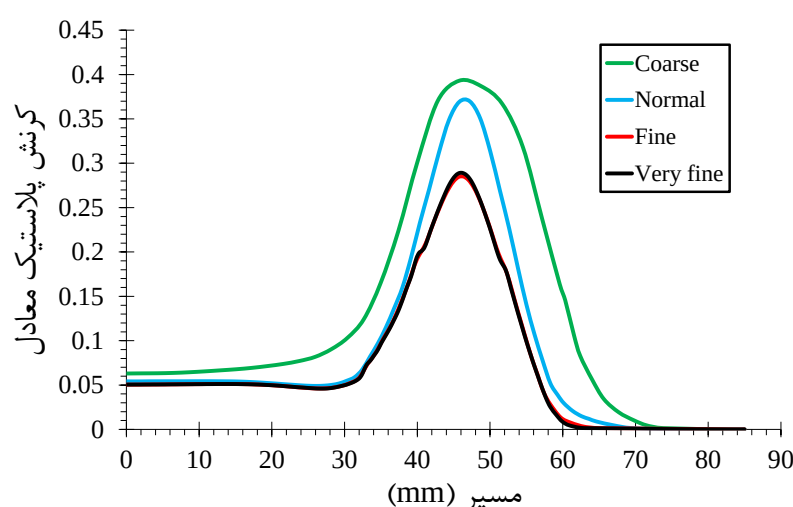
توزیع ضخامت به دست آمده از حل تحلیلی با شش عمق نفوذ سنبه به همراه داده‌های تجربی از سه نمونه با عمق کشش ۱۰/۵، ۱۵/۷۵ و ۲۱ mm در شکل (۴-۱۱) نمایش شده است. در این بخش نیز به صورت مشابه بیشترین کاهش ضخامت مربوط به بحرانی‌ترین ناحیه با بیشترین مقدار تنش و کرنش یعنی دیواره قطعه (ناحیه BC) می‌باشد.



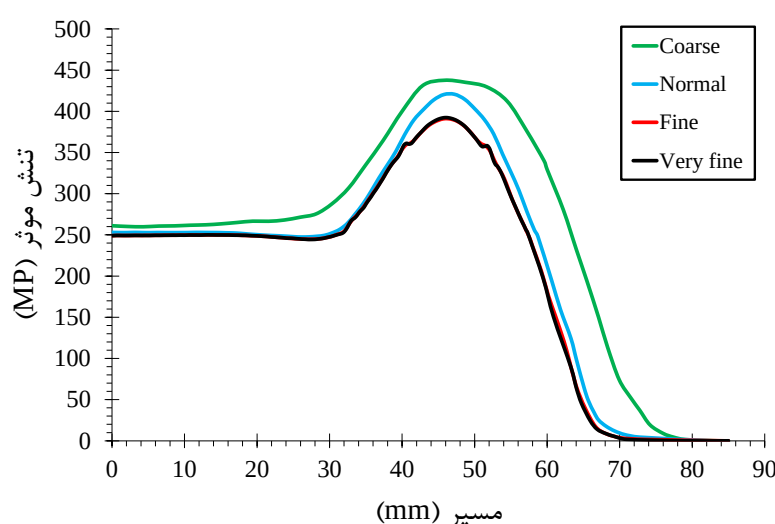
شکل (۴-۱۱) تغییرات ضخامت بر روی مسیر طولی حاصل از حل تحلیلی برای ضریب اصطکاک ۰/۳ و آزمون تجربی اتساع

۳-۱-۴ نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی اجزای محدود بلانک سالم در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است. در شکل (۴-۱۲) و شکل (۴-۱۳) به ترتیب به بررسی تاثیر اندازه المان درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز بر دقت محاسبه کرنش پلاستیک معادل و تنش موثر پرداخته شده است، به دلیل همگرا شدن نتایج در اندازه المان ریز و خیلی ریز، شبیه‌سازی با اندازه المان ریز انجام شد.



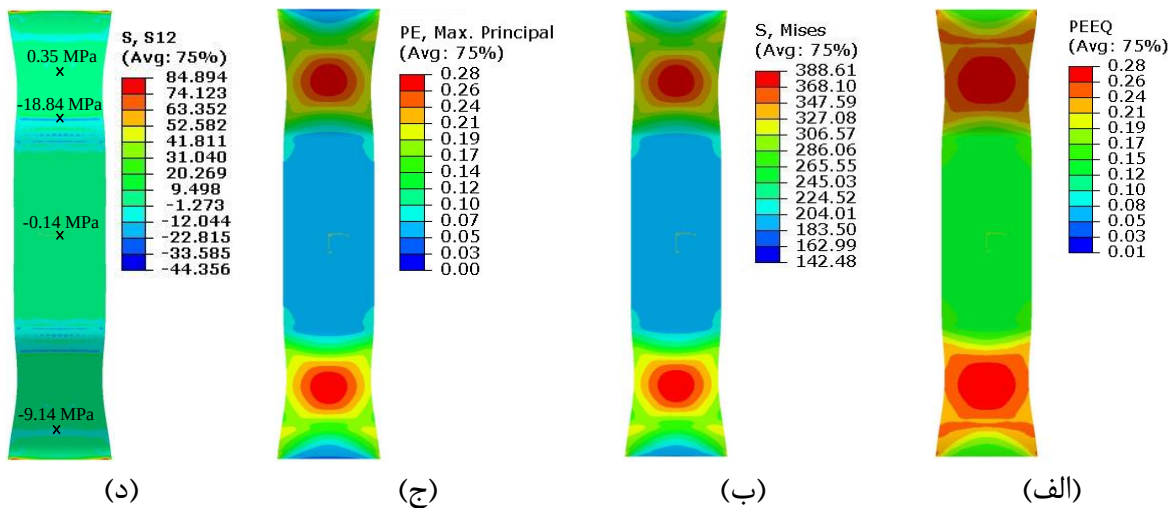
شکل (۴-۱۲) تاثیر اندازه مش بر کرنش پلاستیک معادل در شبیه‌سازی اتساع بلانک سالم



شکل (۴-۱۳) تاثیر اندازه مش بر تنش موثر فون میسز در شبیه‌سازی اتساع بلانک سالم

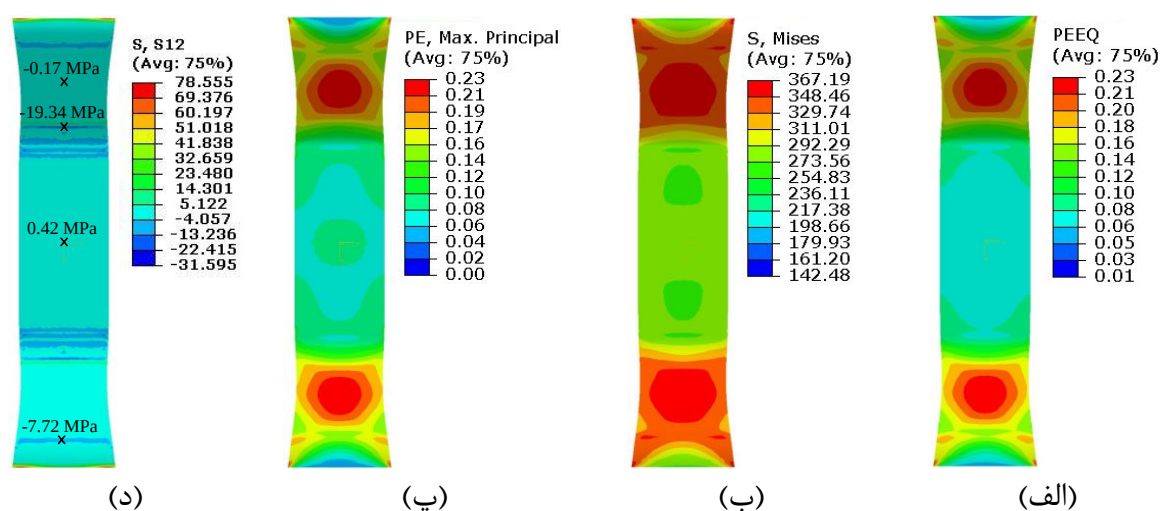
کرنش پلاستیک معادل، تنش فون-میسز، کرنش اصلی بیشینه و تنش برشی σ_{12} حاصل از شبیه‌سازی قطعه‌کار سالم در ضریب اصطکاک $0/3$ و با جابجایی سنبه 21 mm به ترتیب در شکل (۴-۱۴)-الف، ب، ج و

د نشان داده شده است. با توجه به کوچک بودن σ_{12} در مقایسه با تنش‌های موثر در شکل (۴-۱۴) می‌توان نتیجه گرفت که فرض $\sigma_{12} = 0$ در بخش تحلیل فرایند اتساع صحیح است.



شکل (۴-۱۴) نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه کار سالم با ضریب اصطکاک $0/3$ و نفوذ سنبه 21 mm ، (الف) کرنش پلاستیک معادل، (ب) توزیع تنش موثر، (ج) کرنش اصلی بیشینه، (د) توزیع تنش برشی σ_{12}

همچنین کرنش پلاستیک معادل، تنش فون-میسز، کرنش اصلی بیشینه و تنش برشی σ_{12} حاصل از شبیه‌سازی قطعه کار سالم در ضریب اصطکاک $0/2$ و با جابجایی سنبه 21 mm نیز به ترتیب در شکل (۴-۱۵) الف، ب، ج و د نشان داده شده است. با کاهش ضریب اصطکاک از $0/3$ به $0/2$ ، مقادیر کرنش پلاستیک معادل-تنش موثر و کرنش اصلی بیشینه به مقدار $17/56\%$ ، $5/5\%$ و $17/56\%$ کاهش می‌یابد. به همین دلیل در این پژوهش از تغییرات کرنش در ناحیه دیواره سنبه به‌عنوان یک پارامتر اصلی برای اندازه‌گیری اصطکاک استفاده شده است. مشابه نتایجی که برای ضریب اصطکاک $0/3$ در بخش قبل ارائه شد از شکل (۴-۱۵) نتیجه می‌شود همچنان اثر تنش برشی σ_{12} در مقایسه با تنش‌های موثر ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.



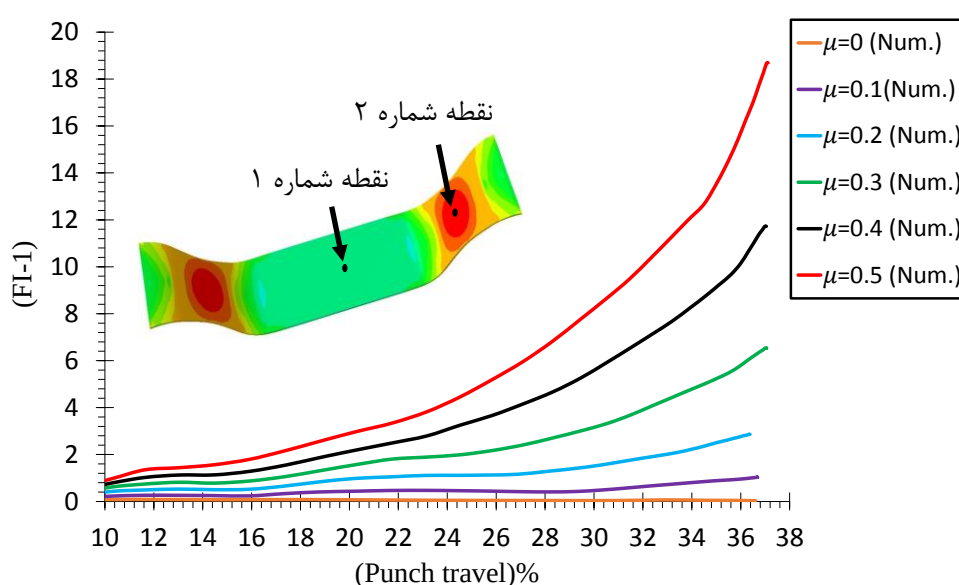
شکل (۴-۱۵) نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه کار سالم با ضریب اصطکاک 0.2 و نفوذ سنبه 21 mm ، (الف) کرنش پلاستیک معادل، (ب) توزیع تنش موثر، (ج) کرنش اصلی بیشینه، (د) توزیع تنش برشی

$$\sigma_{12}$$

منحنی کالیبراسیون اصطکاکی به صورت دیاگرامی که محور افقی آن درصد نفوذ سنبه نسبت به طول دهانه قالب (b) به صورت $(\frac{U}{b} \times 100)$ و محور عمودی آن شاخص اول اصطکاکی (FI-1) است؛ تعریف می‌شود. این شاخص بر اساس کرنش طولی دو نقطه ۱ و ۲ به ترتیب برابر ϵ_1^1 و ϵ_1^2 مطابق شکل (۴-۱۶) و رابطه ۴-۱ تعریف می‌شود.

$$(FI - 1) = \frac{\epsilon_1^2 - \epsilon_1^1}{\epsilon_1^2}$$

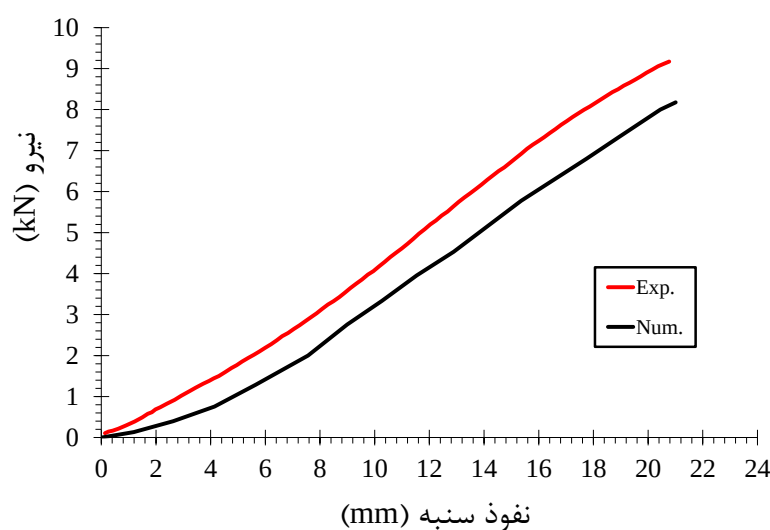
۴-۱



شکل (۴-۱۶) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی به دست آمده از شبیه‌سازی اتساع بلانک سالم

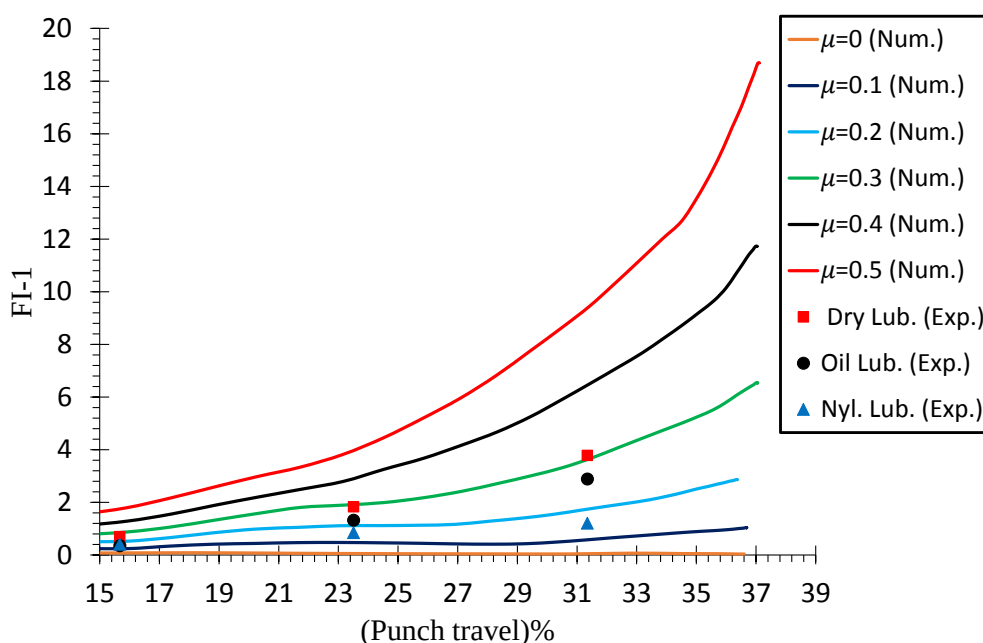
۴-۱-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی

در شکل (۱۷-۴) منحنی نیرو بر حسب جابجایی سنبه به دست آمده از روش تجربی و شبیه سازی ارائه شده است. در حالی که روند کلی تغییرات نیرو بین دو روش پیوسته افزایشی است حداکثر نیروی فرایند در روش تجربی با ضریب اصطکاک $0/3$ برابر $9/18 \text{ kN}$ پیش بینی شده است که به میزان $12/84\%$ از نیروی به دست آمده از شبیه سازی در نرم افزار آباکوس بیش تر است.



شکل (۱۷-۴) نیروی شکل دهی نسبت به نفوذ سنبه به دست آمده از شبیه سازی و آزمون تجربی اتساع

توزیع کرنش قطعه کار سالم با اندازه گیری تغییر قطر مش های دایره ای نمایش داده شده در شکل (۱۷-۴) که در طول نمونه شماره گذاری شده محاسبه شده است. شکل (۱۸-۴) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی عددی نمونه سالم می باشد که با نتایج آزمون تجربی اتساع نمونه سالم مقایسه شده است. محور عمودی این نمودار شاخص اصطکاک (FI-1) و محور افقی آن درصد نفوذ سنبه می باشد. شاخص اصطکاک از رابطه ۱-۴ به دست می آید.



شکل (۴-۱۸) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی قطعه کار با مش رنگ روغن

در نهایت بر اساس شکل (۴-۱۷) ضریب اصطکاک برای شرایط مختلف روان کاری و سه جابجایی مختلف محاسبه و در جدول (۴-۱) نگاشته شد. در اجرای فرایند اتساع بدون روان کار (حالت خشک) به علت نبودن روان کار در محیط تماس سنبه و بلانک، با افزایش نیرو سنبه ضریب اصطکاک نیز افزایش یافته و از ۰/۲۱ به ۰/۲۷ و در نهایت به ۰/۳ می رسد. همچنین در هنگام اجرای فرایند اتساع با استفاده از روان کار روغن کشش، به علت نیروی بالای سنبه و فرار روان کار از فضای بین سنبه و قطعه کار، ضریب اصطکاک ثابت نبوده و از ۰/۱۱ به ۰/۲۱ و سپس به ۰/۲۶ می رسد. در اجرای فرایند با روان کار نایلون به علت ثابت بودن شرایط روان کاری در فرایند، ضریب اصطکاک تقریباً ثابت مانده و از ۰/۱۵ به ۰/۱۶ افزایش می یابد.

با توجه به جدول (۴-۱) بیشترین ضریب اصطکاک فرایند در شرایط روان کاری خشک و کمترین مقدار آن در شرایط روان کاری با نایلون اتفاق می افتد. همچنین روان کار نایلون بیشترین اثرگذاری را در کاهش ضریب اصطکاک فرایند دارد. روان کاری با مکانیزم روغن کشش با انحراف معیار برابر ۰/۰۷۵، به علت فرار روغن کشش از محدوده‌ی شکل دهی و فضای بین سنبه و ورق، بیشترین مقدار وابستگی ضریب اصطکاک به جابجایی سنبه و پیشرفت فرایند را دارد. همچنین در استفاده از روان کار نایلون به علت ثابت بودن شرایط روان کاری و محفوظ

ماندن نایلون در فضای بین سنبه و ورق، شرایط اصطکاکی نیز ثابت باقی مانده و ضریب اصطکاک کمترین میزان تغییرات را نسبت به جابجایی سنبه خواهد داشت. از این روی انحراف معیار ضریب اصطکاک در این حالت برابر ۰/۰۱۱ می باشد که کمترین مقدار آن در بین انحراف معیار دیگر روان کارها است.

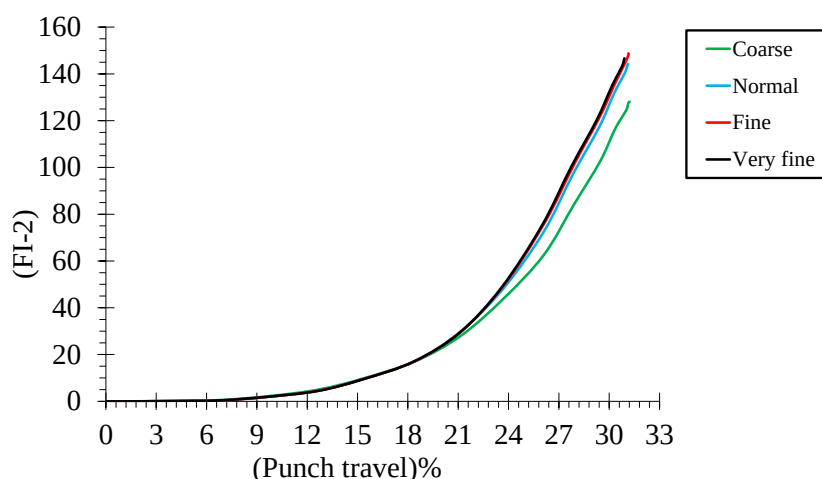
جدول (۱-۴) اصطکاک قطعه کار با مش رنگ روغن

روان کار	جابجایی سنبه (%)	FI-1	ضریب اصطکاک	میانگین ضریب اصطکاک	انحراف از معیار
خشک	۱۵/۶۶	۰/۷	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۰۴۷
	۲۳/۵	۱/۸۳	۰/۲۷		
	۳۱/۳۴	۳/۷۷	۰/۳۰۲		
روغن کشش	۱۵/۶۶	۰/۳۴	۰/۱۱	۰/۲۰۲	۰/۰۷۵
	۲۳/۵	۱/۳۲	۰/۲۱		
	۳۱/۳۴	۲/۸۹	۰/۲۶		
نایلون	۱۵/۶۶	۰/۴	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۰۱۱
	۲۳/۵	۰/۸۳	۰/۱۶		
	۳۱/۳۴	۱/۲	۰/۱۶		

۳-۴ نتایج اتساع بلانک دارای گشودگی

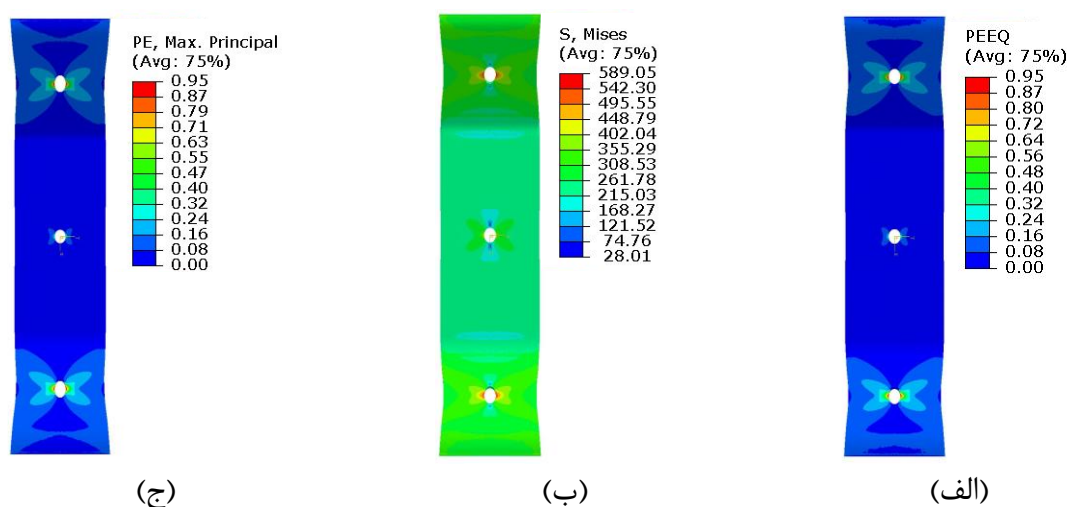
۱-۲-۴ نتایج شبیه سازی اجزای محدود

در این بخش نتایج مربوط به شبیه سازی اجزای محدود بلانک سوراخ دار در نرم افزار آباکوس ارائه شده است. در شکل (۱۹-۴) به بررسی تاثیر اندازه المان درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز بر دقت محاسبه درصد کاهش قطر به درصد نفوذ سنبه پرداخته شده است، به دلیل همگرا شدن نتایج در اندازه المان ریز و خیلی ریز، شبیه سازی با اندازه المان ریز انجام شد.



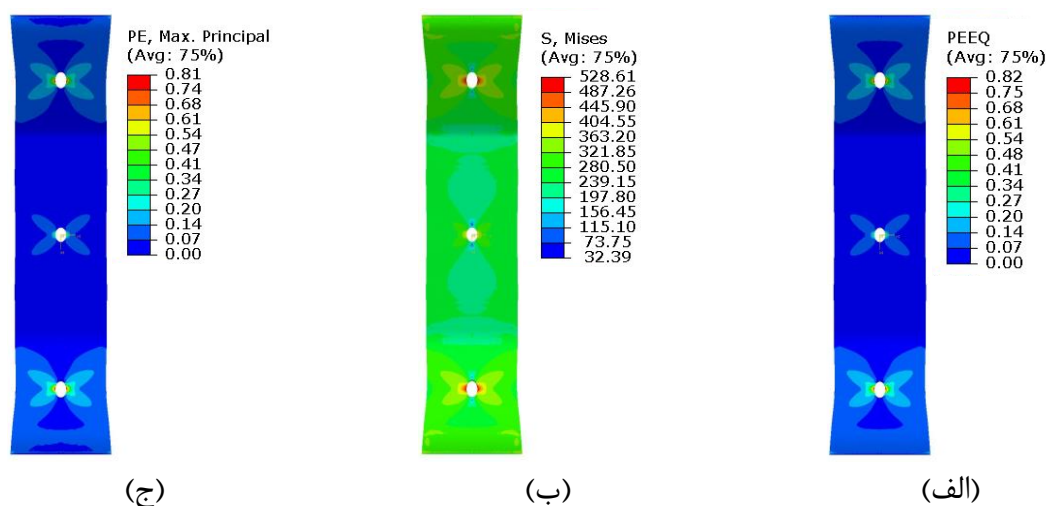
شکل (۴-۱۹) تاثیر اندازه مش بر درصد افزایش شاخص اصطکاک نسبت به درصد نفوذ سنبه در شبیه‌سازی اتساع بلانک سوراخ‌دار

کرنش پلاستیک معادل، تنش فون-میسز و کرنش اصلی بیشینه حاصل از شبیه‌سازی قطعه‌کار سوراخ‌دار در ضریب اصطکاک ۰/۳ و با جابجایی سنبه ۱۵/۷۵ mm به‌ترتیب در شکل (۴-۲۰)-الف، ب و ج نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۰) نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود قطعه‌کار سوراخ‌دار در ضریب اصطکاک ۰/۳ و نفوذ سنبه ۱۵/۷۵ mm (الف) کرنش پلاستیک معادل، (ب) توزیع تنش موثر، (ج) کرنش اصلی بیشینه

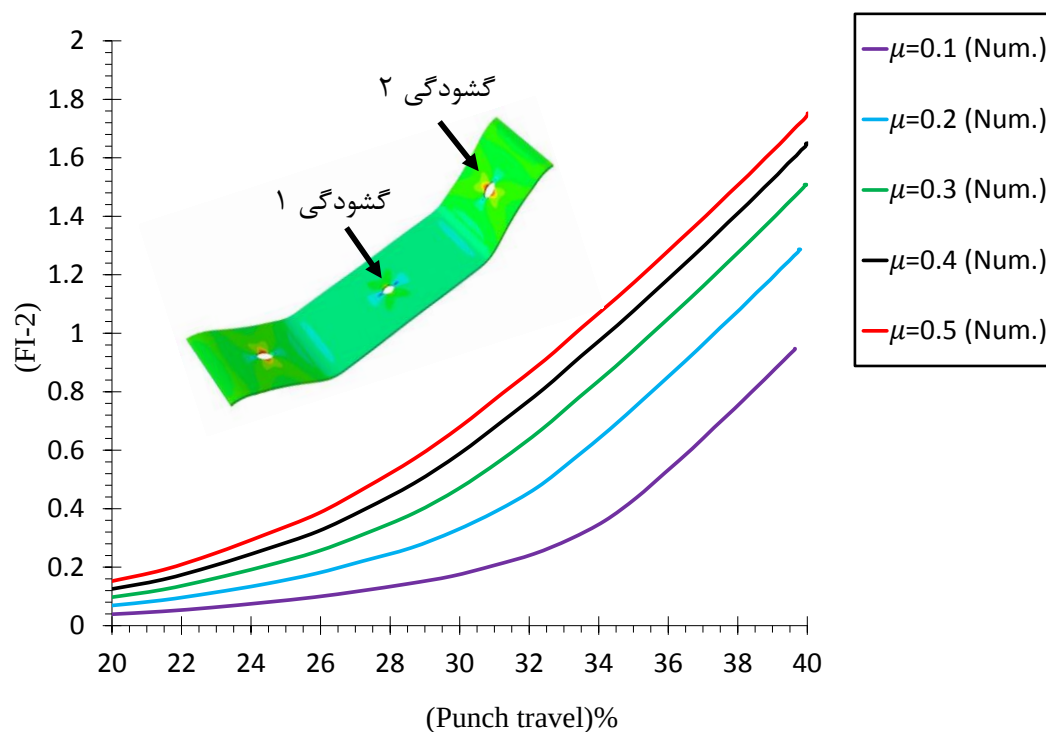
کرنش پلاستیک معادل، تنش فون-میسز و کرنش اصلی بیشینه حاصل از شبیه‌سازی قطعه‌کار سوراخ‌دار در ضریب اصطکاک ۰/۲ و با جابجایی سنبه ۱۵/۷۵ mm به‌ترتیب در شکل (۴-۱۴) شکل (۴-۲۱) الف، ب و ج نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۱) نتایج به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود قطعه کار سوراخ دار در ضریب اصطکاک ۰/۲ و نفوذ سنبله ۱۵/۷۵ mm، (الف) کرنش پلاستیک معادل، (ب) توزیع تنش موثر، (ج) کرنش اصلی بیشینه در نهایت منحنی کالیبراسیون بر اساس شاخص دوم اصطکاکی در اتساع قطعه دارای گشودگی مطابق شکل (۴-۲۲) از شبیه سازی با ضرایب اصطکاک ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ به دست آمد.

$$(FI - 2) = \frac{d_2 - d_1}{d_2}$$

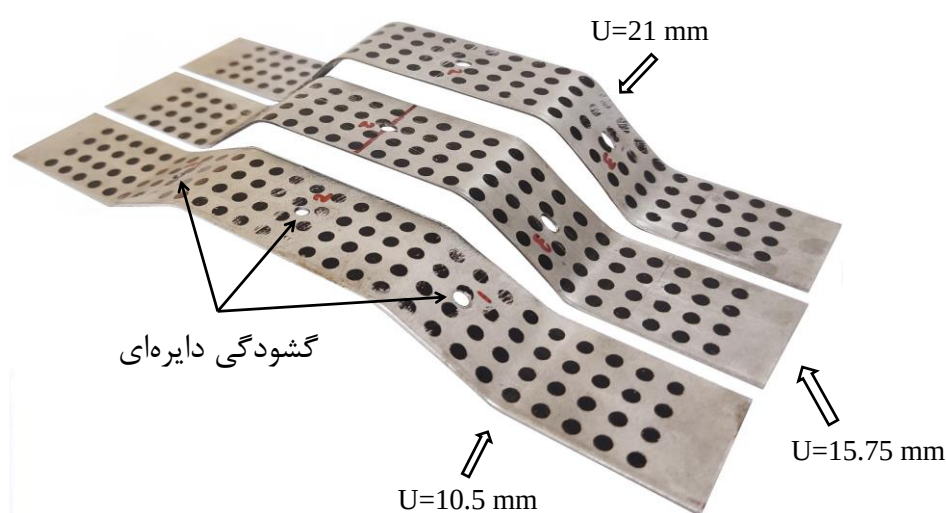
۲-۴



شکل (۴-۲۲) نمودار کالیبراسیون اصطکاک قطعه کار سوراخ دار

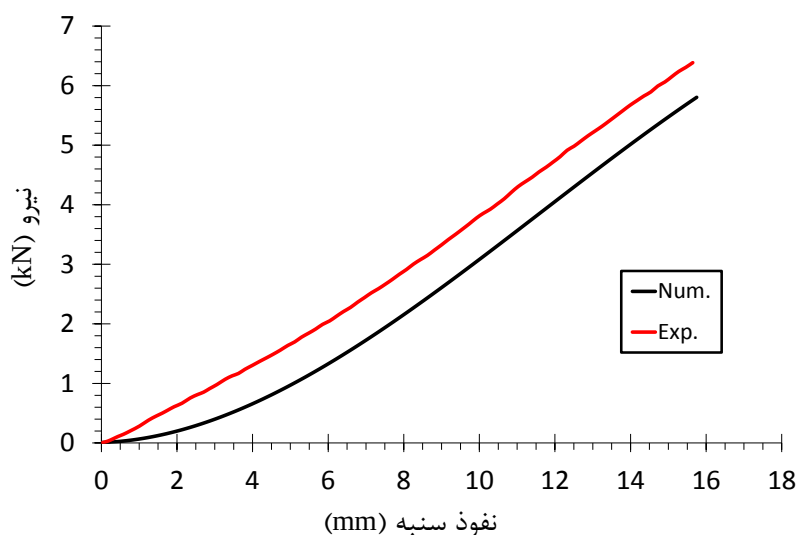
۲-۲-۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی

در این بخش نتایج مربوط به روش عددی-تجربی نمایش داده شده و مقایسه شده است. در شکل (۴-۲۳) سوراخ‌دار شکل‌داده شده با سه جابجایی رم پرس ۱۰/۵، ۱۳/۲ و ۱۵/۷۵ mm نمایش داده شده است. نمودار کالیبراسیون اصطکاک نمونه‌های سوراخ‌دار، با اندازه‌گیری تغییر قطر گشودگی دایره‌ای آن به‌دست آمد. و با نتایج مربوط به توزیع کرنش حل عددی با ضرایب اصطکاک کولمب ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ برای نمونه سالم از کرنش اصلی بیشینه، به‌دست آمد.



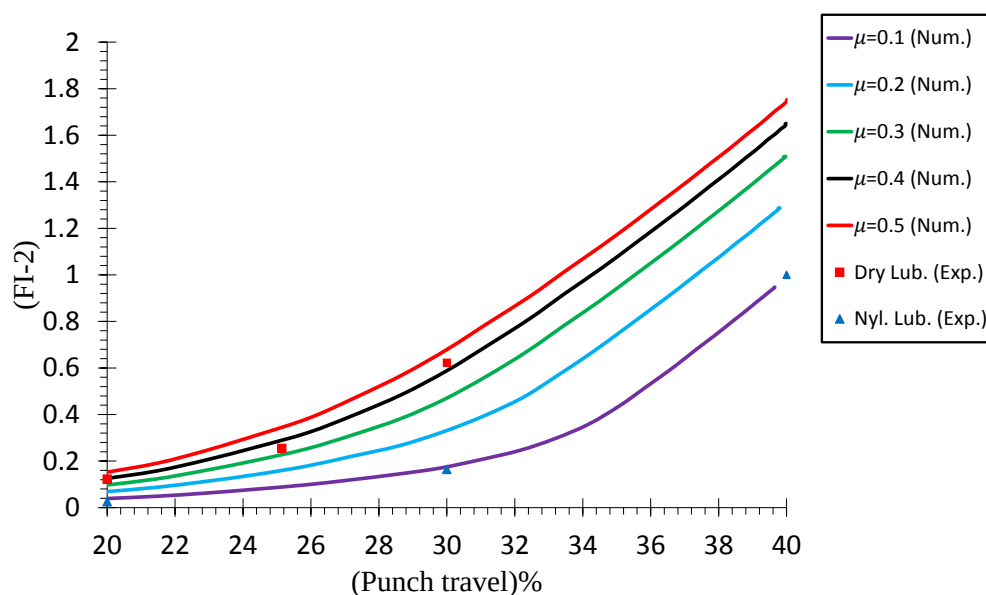
شکل (۴-۲۳) قطعه‌کارهای با مش سوراخ‌دار شده با جابجایی مختلف سنبه

در شکل (۴-۲۴) منحنی نیرو بر حسب جابجایی سنبه به‌دست آمده از روش تجربی و شبیه‌سازی ارائه شده است. در حالی که روند کلی تغییرات نیرو بین دو روش پیوسته افزایشی است حداکثر نیروی فرایند در روش تجربی با ضریب اصطکاک ۰/۴ برابر ۶/۸۷ kN پیش‌بینی شده است که به میزان ۱۸/۳٪ از نیروی به‌دست آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس بیش‌تر است.



شکل (۴-۲۴) نیروی شکل‌دهی نسبت به نفوذ سنبه به‌دست آمده از شبیه‌سازی و آزمون تجربی اتساع

شکل (۴-۲۵) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی عددی-تجربی قطعه‌کار سوراخ‌دار است. محور عمودی این نمودار شاخص دوم اصطکاکی نام دارد که از تغییر قطر مش سوراخ‌دار با استفاده از رابطه ۴-۲ به‌دست می‌آید و محور افقی آن درصد نفوذ سنبه می‌باشد.



شکل (۴-۲۵) نمودار کالیبراسیون اصطکاکی قطعه‌کار سوراخ‌دار

در نهایت بر اساس شکل (۴-۲۵) ضریب اصطکاک برای شرایط مختلف روان‌کاری و سه جابجایی مختلف محاسبه و در جدول (۴-۲) نگاشته شد. در اجرای فرایند اتساع بدون روان‌کار (حالت خشک) میانگین ضریب

اططکاک ۰/۳۸۵ و در حالت با روان کار نایلون میانگین ضریب اصطکاک ۰/۰۸۵ شد. از انحراف معیار محاسبه شده نتیجه می‌شود که افزایش ضریب اصطکاک در استفاده از روان کار نایلون کم‌تر از افزایش ضریب اصطکاک در حالت خشک است.

با توجه به جدول (۲-۴) بیش‌ترین ضریب اصطکاک فرایند در شرایط روان کاری خشک و کم‌ترین مقدار آن در شرایط روان کاری با نایلون اتفاق می‌افتد. در این جدول انحراف معیار حالت خشک برابر ۰/۰۴۸ و انحراف معیار با روان کاری نایلون برابر ۰/۰۱۶ می‌باشد. با توجه به مقادیر انحراف معیار می‌توان نتیجه گرفت که در اجرای فرایند اتساع بدون روان کار (خشک)، میزان تغییرات ضریب اصطکاک ۳ برابر بیشتر از اجرای آن با روان کار نایلون خواهد بود.

جدول (۲-۴) اصطکاک قطعه کار سوراخ‌دار

روان کار	جابجایی سنبه (٪)	FI-2	ضریب اصطکاک	میانگین ضریب اصطکاک	انحراف از معیار
خشک	۲۰	۰/۱۱	۰/۴	۰/۳۸۵	۰/۰۴۸
	۲۵/۱۳	۰/۲۴	۰/۳۳		
	۳۰	۰/۶۱	۰/۴۲۵		
نایلون	۲۰	۰/۰۲۶	۰/۰۶۷	۰/۰۸۵	۰/۰۱۶
	۳۰	۰/۱۵	۰/۰۸۷		
	۴۰	۱	۰/۱		

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف ارائه یک روش خلاقانه برای اندازه‌گیری اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی ورق، یک ابزار شکل‌دهی مبتنی بر اتساع ورق ارائه شد. برای این منظور مطالعه تحلیلی-عددی-تجربی ضریب اصطکاک در فرایند اتساع ورق فولادی DC04 انجام شد. در بخش تجربی با اجرای آزمون کشش تک‌محوری نمونه‌های دمبلی شکل، طبق استاندارد ASTM-E8 در زاویه‌های 0° ، 45° و 90° نسبت به راستای ورود ورق، ضرایب ناهمسانگردی پلاستیک، ثوابت کرنش سختی مدل توانی و دیگر مولفه‌های مکانیکی جنس ماده محاسبه شد. پس از طراحی و ساخت قالب و اجرای آزمون تجربی اتساع با چند حالت روان‌کاری و جابجایی سنبه مختلف برای نمونه‌های سالم و سوراخ‌دار، مقادیر کرنش، تنش، ضخامت برای هر دو نوع قطعه‌کار محاسبه شد. در بخش تحلیلی با هدف ارائه یک مدل ساده شده تحلیلی برای تخمین نیرو، توزیع تنش، کرنش و ضخامت از تابع تسلیم ناهمسانگرد هیل-۴۸ و قانون جریان وابسته استفاده و با نوشتن معادلات تعادل در سطوح تماسی ورق با اجزای قالب، اثر نیروهای اصطکاکی بر توزیع تنش-کرنش تعیین شد. سپس فرایند اتساع در نرم‌افزار آباکوس برای دو نوع قطعه‌کار سالم (دارای چاپ رنگی) و قطعه‌کار سوراخ‌دار (دارای گشودگی دایره‌ای)، با ضرایب اصطکاک ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ شبیه‌سازی و نتایج آن به‌دست آمد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، دو نوع نمودار کالیبراسیون اصطکاکی که به‌ترتیب مبتنی بر اندازه‌گیری کرنش و اندازه‌گیری قطر

سوراخ دایره‌ای دو قطعه‌کار سالم و سوراخ‌دار است، معرفی شد. در نهایت نتایج تحلیلی به کمک نتایج تجربی راستی‌آزمایی و ضرایب اصطکاک در حالت‌های روان‌کاری مختلف و جابجایی سنبه مختلف ارائه شد. در ادامه مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر ارائه شده است:

۱- در اجرای فرایند اتساع بلانک سالم بدون روان‌کار (حالت خشک) به علت نبودن روان‌کار در محیط تماس سنبه و بلانک، با افزایش نیرو سنبه ضریب اصطکاک نیز افزایش یافته و از $0/21$ به $0/27$ و در نهایت به $0/3$ می‌رسد. همچنین در هنگام اجرای فرایند اتساع با استفاده از روان‌کار روغن کشش، به علت نیروی بالای سنبه و فرار روان‌کار از محیط بین سنبه و قطعه‌کار، ضریب اصطکاک ثابت نبوده و ضریب اصطکاک از $0/11$ به $0/21$ و سپس به $0/26$ می‌رسد. همچنین بیش‌ترین مقدار وابستگی ضریب اصطکاک به جابجایی سنبه و پیشرفت فرایند، در حالت روان‌کاری با روغن کشش دیده می‌شود. در اجرای فرایند با روان‌کار نایلون به علت ثابت بودن شرایط روان‌کاری در فرایند، ضریب اصطکاک تقریباً ثابت مانده و از $0/15$ به $0/16$ افزایش می‌یابد. در اجرای فرایند اتساع با روان‌کار نایلون، ضریب اصطکاک کم‌ترین میزان تغییرات را نسبت به جابجایی سنبه نسبت به دیگر حالت‌های روان‌کاری خواهد داشت.

۲- در اجرای فرایند اتساع بلانک سوراخ‌دار در حالت بدون روان‌کار (حالت خشک) میانگین ضریب اصطکاک $0/385$ و در حالت با روان‌کار نایلون میانگین ضریب اصطکاک $0/085$ شد. همچنین از انحراف معیار محاسبه شده نتیجه می‌شود که افزایش ضریب اصطکاک در استفاده از روان‌کار نایلون کم‌تر از افزایش ضریب اصطکاک در حالت خشک است. همچنین در اجرای فرایند اتساع بدون روان‌کار (خشک)، میزان تغییرات ضریب اصطکاک ۳ برابر بیشتر از اجرای آن با روان‌کار نایلون خواهد بود.

۳- روند کلی تغییرات نیرو در تجربی-عددی پیوسته افزایشی است حداکثر نیروی فرایند اتساع بلانک سالم در روش تجربی با ضریب اصطکاک $0/3$ برابر $9/18 \text{ kN}$ پیش‌بینی شده است که به میزان $12/84\%$ از نیروی به دست آمده از شبیه‌سازی فرایند در نرم‌افزار آباکوس بیش‌تر است. همچنین

حداکثر نیروی فرایند اتساع بلانک سوراخ‌دار در روش تجربی با ضریب اصطکاک $0/4$ برابر $6/87 \text{ kN}$ پیش‌بینی شده است که به میزان $18/3\%$ از نیروی به‌دست آمده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس بیش‌تر است.

۴- مدل تحلیلی ارائه شده توزیع کرنش و تنش قطعه را در جابجایی سنبه 21 mm (نزدیک به لحظه گلوپی موضعی) به‌ترتیب با خطا $15/8\%$ ، $4/7\%$ تخمین زده است. همچنین این مدل در تخمین توزیع ضخامت بر نتایج تجربی منطبق است. خطای متوسط روش تحلیلی در مقایسه با نتایج تجربی $18/9\%$ است. همچنین نتایج تئوری با دقت قابل قبولی توزیع کرنش را در ناحیه بحرانی دیواره نمونه ارائه می‌کند. روش تحلیلی حداکثر نیروی فرایند اتساع را با ضریب اصطکاک $0/3$ برابر $7/13 \text{ kN}$ پیش‌بینی کرده است که به میزان $23/27\%$ از نیروی تجربی فرایند اتساع بلانک سالم کم‌تر است.

۵- افزایش شدید تنش و کرنش در شعاع گوشه سنبه (AB) و شعاع گوشه ماتریس (CD) به‌علت نیرو اصطکاک، مماس بر ورق می‌باشد. به‌علت عدم تماس سنبه با ورق در بخش‌های OA و DE، مقدار تنش-کرنش ثابت باقی می‌ماند. همچنین بیش‌ترین تنش در بخش دیواره قطعه‌کار (ناحیه BC) اتفاق می‌افتد و باعث کاهش ضخامت مربوط به این ناحیه می‌شود. در صورت ادامه یافتن فرایند در حالت خشک تا عمق بیش از 21 mm ، ورق از ناحیه BC به گلوپی می‌رسد و در آخر پاره خواهد شد.

۲-۵ پیشنهادها

به‌منظور ادامه‌ی پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱- استفاده از معیار تسلیم پیشرفته مانند معیار BBC 2008، BBC 2003 و Barlat 2003 در حل تحلیلی و استخراج منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی با استفاده از آن،

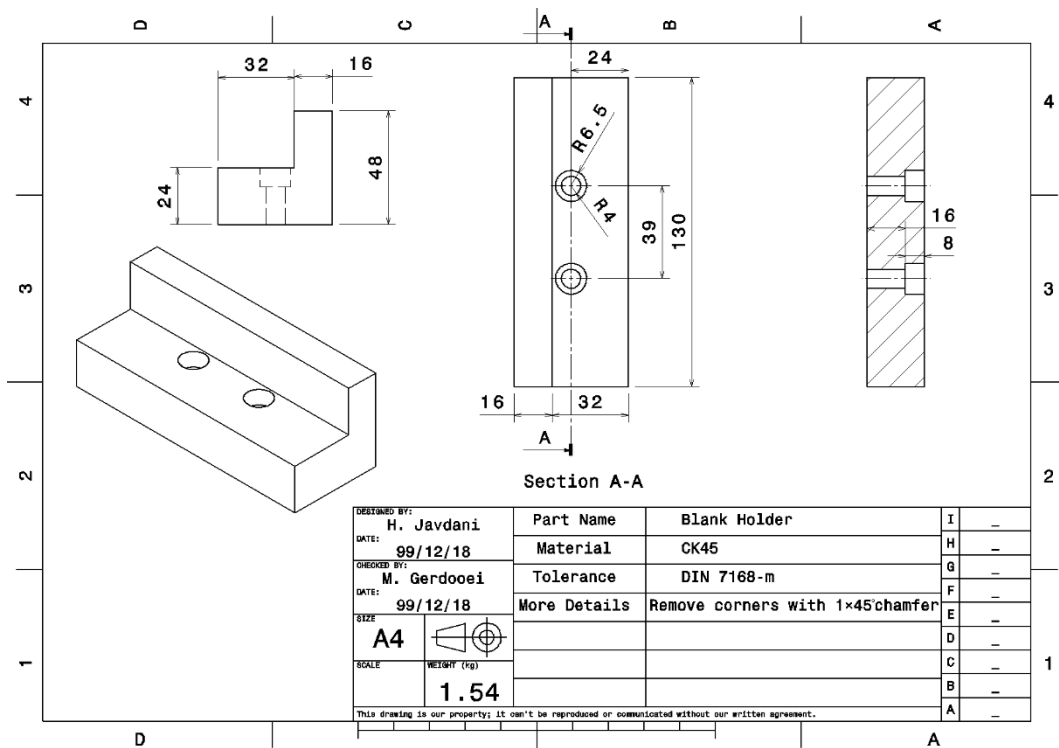
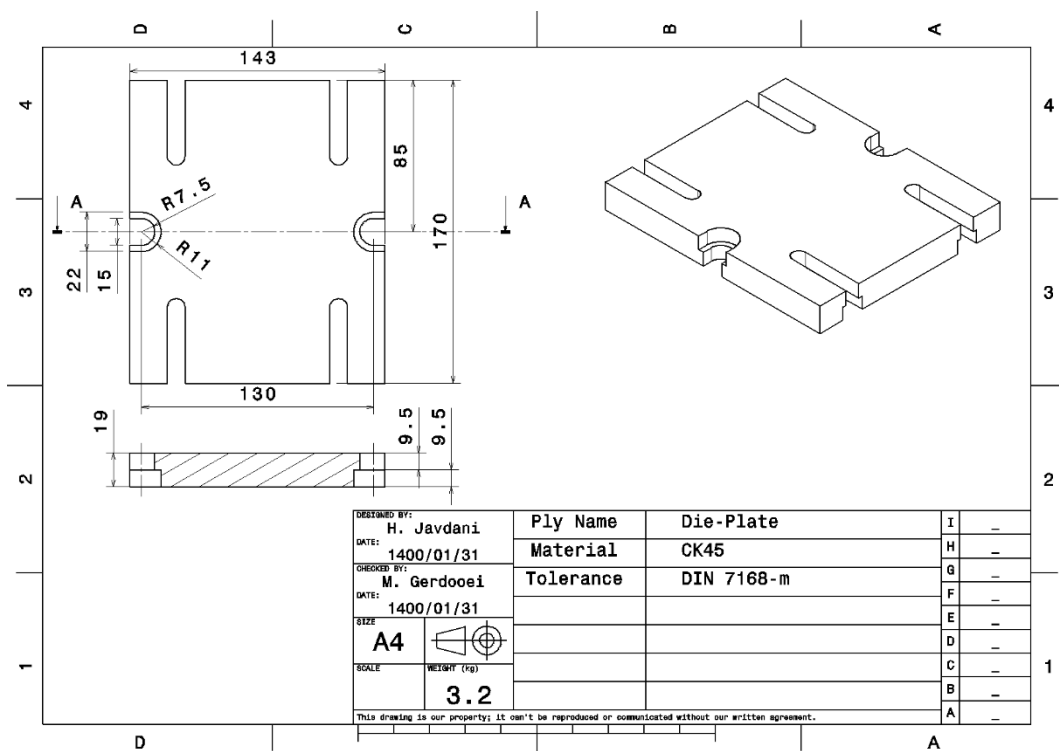
۲- استخراج منحنی‌های کالیبراسیون برای ورق‌هایی از جنس‌های مختلف،

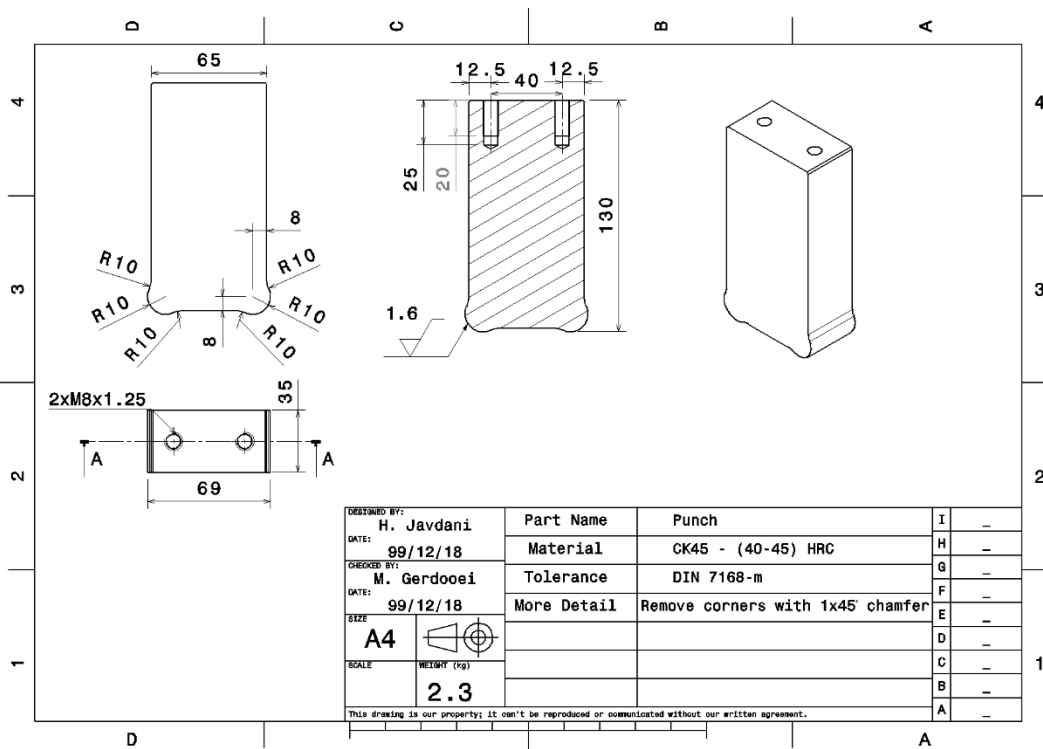
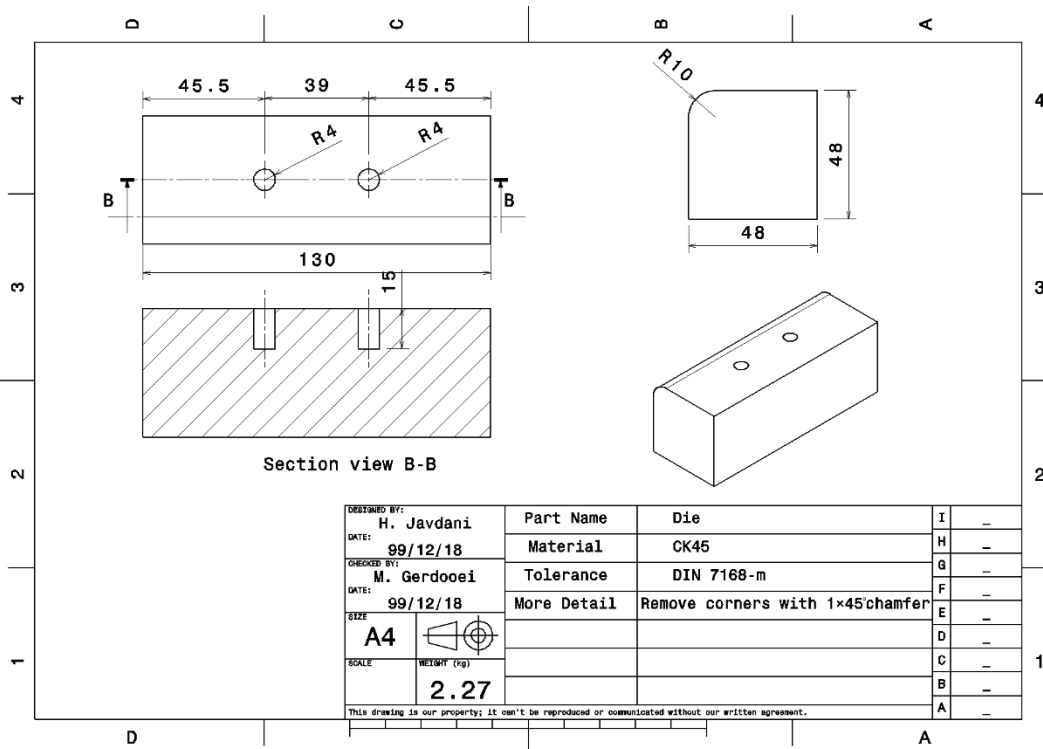
۳- استفاده از سیستم‌های روان‌کاری‌های جدید و اندازه‌گیری ضریب اصطکاک مرتبط با آن و بازطراحی چیدمان قالب ویژه شرایط جدید،

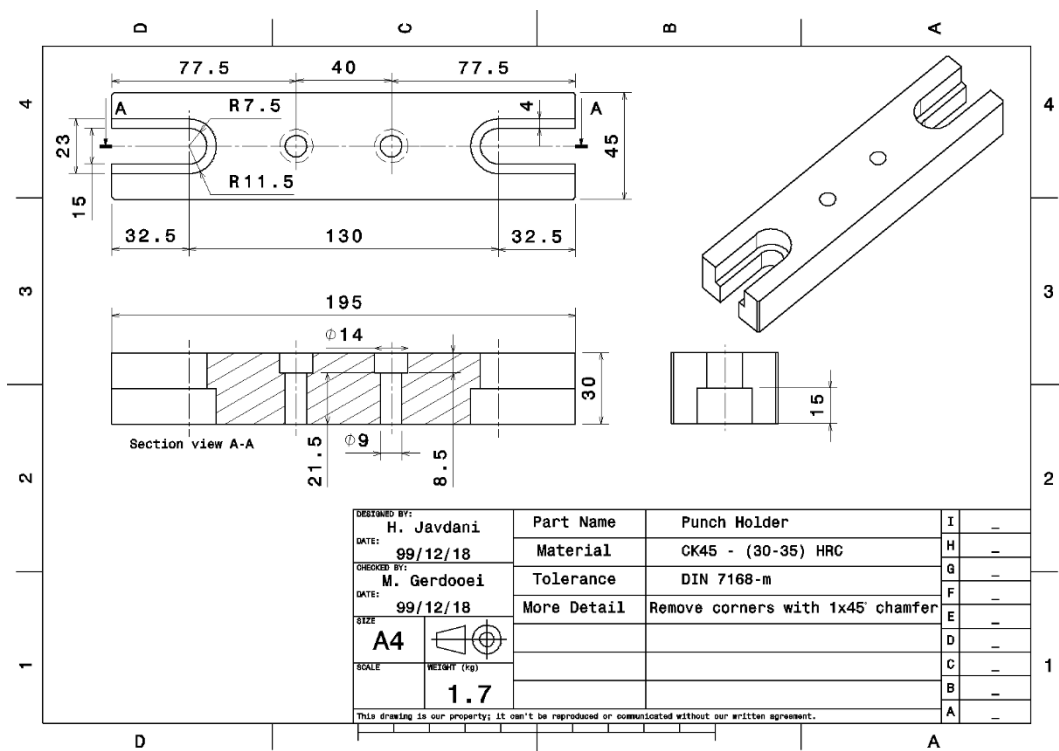
۴- استفاده از مکانیزم‌های پیشرفته کاهش اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی مانند ارتعاش التراسونیک و طراحی مجدد تجهیزات،

۵- ارائه ابزار جدید اندازه‌گیری اصطکاک بر اساس دیگر فرایندهای شکل‌دهی فلزات مانند فرایند کشش عمیق.

پیوست ۱: نقشه اجزای قالب اتساع







پیوست ۲: کد متلب حل تحلیلی فرایند اتساع ورق DC04

```
clear all
clc
```

Data

```
K=531.072;
mu=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5;
ThetaOA=0;
ThetaAB=pi/2;
ThetaBC=0;
ThetaDC=pi/2;
ThetaED=0;
n=0.2516;
t0=0.8;
Rab=0.01; % Unit m
clearance=0.01;% Unit m
Rcd=Rab;
ep0=0;
ep1o=input frome experimental data;
ep2o=-0.5*ep1o;
ep3o=ep2o;
Beta=-0.5;
R0=0.65; % r value
R90=0.83; % r value
to=t0*exp(ep3o);
A=sqrt((R90*A^2+R0*(R0*A^2-2*R0+R0+1))/(R90*(1+R0)));
epbar=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2o-R0*ep3o)^2+R0*(R90*ep3o-ep1o)^2+(R0*ep1o-R90*ep2o)^2);
```

First length Unit (MPa)

```
w0=0.025;
L0OA=0.0245;
L0AB=0.01;
L0BC=0.01;
L0CD=0.01;
L0DE=0.0305;
L0OE=L0OA+L0AB+L0BC+L0CD+L0DE;
```

Tension at the centerline Unit kN/m

```
To=(k*(ep0+epbar)^n/A)*to;
```

Tensions Force Unit kN/m

```
Ta=To*exp(u*ThetaOA);
Tb=Ta*exp(u*ThetaAB);
Tc=Tb;
Td=Tc/exp(u*ThetaDC);
Te=0;
```

Blankholder Force Unit kN/m

$$Be=Td./(2*u);$$

Strain

```

syms ep1a;
solve (-Ta+(k*(ep0+(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(-0.5*ep1a-R0*-
0.5*ep1a)^2+R0*(R90*-0.5*ep1a-ep1a)^2+(R0*ep1a-R90*-0.5*ep1a)^2))^n/A)*t0*exp(-
0.5*ep1a*(1+Beta)));
double (ans);
ep1a=abs(ans);
ep2a=-0.5*ep1a;
ep3a=-0.5*ep1a;
syms ep1b;
solve (-Tb+(k*(ep0+(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(-0.5*ep1b-R0*-
0.5*ep1b)^2+R0*(R90*-0.5*ep1b-ep1b)^2+(R0*ep1b-R90*-0.5*ep1b)^2))^n/A)*t0*exp(-
0.5*ep1b*(1+Beta)));
double (ans);
ep1b=abs(ans);
ep2b=-0.5*ep1b;
ep3b=ep2b;
ep1c=ep1b;
ep2c=ep2b;
ep3c=ep3b;
syms ep1d;
solve (-Td+(k*(ep0+(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(-0.5*ep1d-R0*-
0.5*ep1d)^2+R0*(R90*-0.5*ep1d-ep1d)^2+(R0*ep1d-R90*-0.5*ep1d)^2))^n/A)*t0*exp(-
0.5*ep1d*(1+Beta)));
double (ans);
ep1d=abs(ans);
ep2d=-0.5*ep1d;
ep3d=ep2d;
ep1e=0;
ep2e=0;
ep3e=0;

```

Average Strain

```

ep1oa=(ep1o+ep1a)/2;%(ep1o+ep1a)/2
ep1ab=(ep1a+ep1b)/2;%(ep1a+ep1b)/2
ep1bc=(ep1b+ep1c)/2;%(ep1b+ep1c)/2
ep1cd=(ep1c+ep1d)/2;%(ep1c+ep1d)/2
ep1de=(ep1d+ep1e)/2;%(ep1d+ep1e)/2

```

Second length Unit m

```

LOA=L0OA*exp(ep1oa);
LAB=L0AB*exp(ep1ab);
LBC=L0BC*exp(ep1bc);
LCD=L0CD*exp(ep1cd);
LDE=L0DE*exp(ep1de);
arcOE=LOA+LAB+LBC+LCD+LDE;
O=0;

```

```

A=L0OA;
B=LOA+LAB;
C=LOA+LAB+LBC;
D=LOA+LAB+LBC+LCD;
E=LOA+LAB+LBC+LCD+LDE;

```

%average strain

```
avep=log(arcOE/L0OE);
```

Thickness Unit mm

```

ta =t0*exp(ep3a);
tb=t0*exp(ep3b);
tc=tb;
td=t0*exp(ep3d);
te=t0;

```

stress Unit (MPa)

```

epbara=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2o-R0*ep3o)^2+R0*(R90*ep3o-
ep1o).^2+(R0*ep1o-R90*ep2o).^2);
Sressbara=k*(ep0+epbara).^n;
Stress1o=Sressbara/A;
epbara=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2a-R0*ep3a)^2+R0*(R90*ep3a-
ep1a).^2+(R0*ep1a-R90*ep2a).^2);
Sressbara=k*(ep0+epbara).^n;
Stress1a=Sressbara/A;
epbarb=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2b-R0*ep3b)^2+R0*(R90*ep3b-
ep1b).^2+(R0*ep1b-R90*ep2b).^2);
Sressbarb=k*(ep0+epbarb).^n;
Stress1b=Sressbarb/A;
epbarc=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2c-R0*ep3c)^2+R0*(R90*ep3c-
ep1c).^2+(R0*ep1c-R90*ep2c).^2);
Sressbarc=k*(ep0+epbarc).^n;
Stress1c=Sressbarc/A;
epbard=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2d-R0*ep3d)^2+R0*(R90*ep3d-
ep1d).^2+(R0*ep1d-R90*ep2d).^2);
Sressbard=k*(ep0+epbard).^n;
Stress1d=Sressbard/A;
epbare=(sqrt((R0+1)/R0)/(R0+R90+1))*sqrt(R90*(ep2e-R0*ep3e)^2+R0*(R90*ep3e-
ep1e).^2+(R0*ep1e-R90*ep2e).^2);
Sressbare=k*(ep0+epbare).^n;
Stress1e=Sressbare/A;

```

Punch Force Unit (MPa)

```
F=2*Tb*w0*sin(acos(clearance/LBC))
```

مراجع

- [1] V. L. Hattalli and S. R. Srivatsa, "Sheet Metal Forming Processes - Recent Technological Advances," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 2564–2574, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.040.
- [2] S. Panich, N. Seemuang, and T. Chaimongkon, "Formability analysis of fukui stretch-drawing and square cup drawing using strain and stress based forming limit curves," *Key Eng. Mater.*, vol. 751 KEM, pp. 167–172, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.751.167.
- [3] R. Ebrahimi and A. Najafizadeh, "A new method for evaluation of friction in bulk metal forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 152, no. 2, pp. 136–143, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.03.029.
- [4] T. Robinson, H. Ou, and C. G. Armstrong, "Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 153–154, no. 1–3, pp. 54–59, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.045.
- [5] د. مجتبی، ق. ف. اله and د. جواد، "شبیه سازی و بررسی آزمون فشار حلقه به منظور اندازه گیری اصطکاک در فرآیند فورج داغ."
- [6] T. Altan, G. Ngaile, and G. Shen, *Cold and hot forging: fundamentals and applications*, vol. 1. ASM international, 2004.
- [7] J. A. Schey and M. C. Shaw, "Tribology in metalworking: friction, lubrication and wear," 1984.
- [8] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge university press, 2011.
- [9] D. Banabic, *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [10] H. J. Bunge, K. Pöhlndt, and A. E. Tekkaya, *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Springer Science & Business Media, 2000.
- [11] Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, "Mechanics of Sheet," p. 228, 2002.
- [12] S. Pandre, A. Morchhale, N. Kotkunde, S. K. Singh, N. Khanna, and A. Saxena, "Determination of Warm Deep Drawing Behavior of DP590 Steel Using Numerical Modeling and Experimental Process Window," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 12, pp. 12537–12548, 2021, doi: 10.1007/s13369-021-05998-6.
- [13] T. Kuboki, Y. Jin, and M. Murata, "Prediction of stress-strain diagram from forming load in stretch forming," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 46–53, 2012, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.04.005.
- [14] M. Luo, X. Chen, M. F. Shi, and H. C. Shih, "Numerical analysis of AHSS fracture in a stretch-bending test," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1252, pp. 455–463, 2010, doi: 10.1063/1.3457590.
- [15] Y. W. Lee, J. C. Woertz, and T. Wierzbicki, *Fracture prediction of thin plates under*

- hemi-spherical punch with calibration and experimental verification*, vol. 46, no. 5, 2004.
- [16] K. R. Gilmour, A. G. Leacock, and M. T. J. Ashbridge, "The influence of plastic strain ratios on the numerical modelling of stretch forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 152, no. 1, pp. 116–125, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.03.013.
 - [17] L. R. Sanchez, "Characterization of a measurement system for reproducible friction testing on sheet metal under plane strain," *Tribol. Int.*, vol. 32, no. 10, pp. 575–586, 1999, doi: 10.1016/S0301-679X(99)00098-5.
 - [18] S. Hao, B. E. Klamecki, and S. Ramalingam, "Friction measurement apparatus for sheet metal forming," *Wear*, vol. 224, no. 1, pp. 1–7, 1999, doi: 10.1016/S0043-1648(98)00288-9.
 - [19] S. S. Han, "The influence of tool geometry on friction behavior in sheet metal forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 63, no. 1–3, pp. 129–133, 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(96)02612-X.
 - [20] B. H. Lee, Y. T. Keum, and R. H. Wagoner, "Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130–131, pp. 60–63, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00784-7.
 - [21] A. Matuszak, "Factors influencing friction in steel sheet forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 106, no. 1–3, pp. 250–253, 2000, doi: 10.1016/S0924-0136(00)00625-7.
 - [22] L. Figueiredo, A. Ramalho, M. C. Oliveira, and L. F. Menezes, "Experimental study of friction in sheet metal forming," *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 1651–1657, 2011, doi: 10.1016/j.wear.2011.02.020.
 - [23] L. Fratini, S. Lo Casto, and E. Lo Valvo, "A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 172, no. 1, pp. 16–21, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.08.008.
 - [24] P. K. Saha and W. R. D. Wilson, "Influence of plastic strain on friction in sheet metal forming," *Wear*, vol. 172, no. 2, pp. 167–173, 1994, doi: 10.1016/0043-1648(94)90284-4.
 - [25] G. J. Coubrough, M. J. Alinger, and C. J. Van Tyne, "Angle of contact between sheet and die during stretch-bend deformation as determined on the bending-under-tension friction test system," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 130–131, pp. 69–75, 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00781-1.
 - [26] R. H. Wagoner, W. Wang, and S. Sriram, "Development of OSU formability test and OSU friction test," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 45, no. 1–4, pp. 13–18, 1994.
 - [27] X.-J. Wang, J. L. Duncan, and M. L. Devenpeck, "Punch friction tests for sheet metal forming," *J. Appl. Metalwork.*, vol. 3, no. 1, pp. 3–11, 1983.
 - [28] T. Trzepieciniski and H. G. Lemu, "Recent developments and trends in the friction testing for conventional sheet metal forming and incremental sheet forming," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 47, 2020.
 - [29] V. Abaqus, "6.14 Documentation," *Dassault Syst. Simulia Corp.*, vol. 651, no. 6.2, 2014.
 - [30] D. I. für Normung, "EN 10130:2007-02 - Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming - Technical delivery conditions," no. February, p. 14, 2007.

- [31] "DIN-1623-1 (cold rolled sheet & strip).pdf." .
- [32] C. Composition, P. Properties, and M. Properties, "AISI 1006 Carbon Steel (UNS G10060)," pp. 1–2, 2012.
- [33] "Santam-STD-600," [Online]. Available: <http://www.santamco.com/Products/ShowProduct.aspx?tmid=29&l=1065&cid=19&pid=508>.
- [34] ASTM E8, "ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1," *Annu. B. ASTM Stand.* 4, no. C, pp. 1–27, 2010, doi: 10.1520/E0008.
- [35] ASTM International, "ASTM E517 - Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal," vol. 00, no. June 1998, pp. 1–8, 2006.
- [36] ASTM, "ASTM E10-12: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials," *Annu. B. ASTM Stand.*, no. June, pp. 1–32, 2014, doi: 10.1520/E0010-12.2.
- [37] ISO 18265, "Metallic materials, Conversion of hardness values (ISO 18265 : 2003). English version of DIN EN ISO 18265," no. February, 2004.
- [38] S. Points, "Nen-Iso 4287," pp. 1–65, 1998.
- [39] M. T. Mezher, O. S. Barrak, S. A. Nama, and R. A. Shakir, "Predication of Forming Limit Diagram and Springback during SPIF process of AA1050 and DC04 Sheet Metals," *J. Mech. Eng. Res. Dev.*, vol. 44, no. 01, pp. 37–45, 2021.

Abstract

The study of friction in the sheet metal forming is important because of its significant effects on dimensional accuracy, product surface quality, required power, and energy. Having the sufficient knowledge about the contact friction and how it affects the abovementioned parameters will greatly help the modeling and designing of process. In this research, an analytical-numerical-experimental study of friction coefficient in stretch forming of DC04 steel sheet as a widely used raw material in the automotive industry has been carried out. In the experimental stage, by performing a uniaxial tensile test at angles of 0° , 45° , and 90° with respect to the rolling direction, the plastic anisotropy coefficients, the constants of the power-law model, and other mechanical components of the material were obtained. Then, by presenting an analytical method of classical plasticity for the stretch forming, based on the Hill-48 anisotropic yield criterion and the associated flow rule, the stress and strain components in different zones of the blank were calculated. In this method, by deriving the equilibrium equations at the contact surfaces of the sheet with the tooling components, the effect of frictional forces on the stress distribution was investigated using the Coulomb model. Then, the stress distribution, strain, and thickness changes in different areas as well as the forming force were calculated. In the numerical stage, the stretch forming was simulated for two different blanks including cut-out and without cut-out. As a result, two novel friction calibration diagrams were achieved by modeling of processes for six coefficients of friction i.e. 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5. These two diagrams were related to the magnitude of in-plane strain and cut-out diameter in the deformed blank. After designing and manufacturing the stretch tooling, the stretching of both specimens i.e. with and without cut-out were done by using different lubricants of grease and nylon for various displacements, and the values of strain, stress, thickness, and diameter of circular cut-out were calculated. Consequently, the magnitude of friction coefficients were estimated according to each calibrating diagrams. Finally, the analytical results were acceptably verified by comparing numerical outcomes with the experimental results.

Keywords: Sheet metal forming, Friction, Stretch forming, Calibration curve, Plastic anisotropy, DC04 sheet, Stamping.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Title
**Evaluation of the friction in sheet metal forming using a novel theoretical-
experimental approach**

By: Hossein Javdani

Supervisor:
Dr. Mahdi Gerdooei

February 2022