

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

امکان سنجی اجرای فرایند سوراخ کاری لوله های فلزی با استفاده از فشار ابزار الاستومری

نگارنده: حمزه ممشلی

استاد راهنما

دکتر مهدی گردویی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۱۳۲/۲۹۸/۱۳
تاریخ: ۹۸/۷/۲۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حمزه ممثلی با شماره دانشجویی ۹۴۱۶۹۸۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان امکان سنجی اجرای فرایند سوراخ کاری لوله های فلزی با استفاده از فشار ابزار الاستومری که در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود ☒ قبول (با درجه: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مهدی گردویی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر هادی پروز	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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



تقدیم نامہ

تقدیم به استوارترین تکیہ گاہ زندگی ام،

دستان پر مہر پدرم

و سرسبزترین نگاہ زندگی ام،

چشمان سبز مادرم

(بی ہمتا کسانے کہ هموارہ به آنان عشق می ورزم)

همچنین؛

تقدیم به روح برادر عزیزم؛ مشوق اصلی ام در ادامه تحصیل،

تقدیم به عزیزانم احمد رضا، امیر علی و عماد

و تقدیم به خواهران فداکار و برادر مہربانم.

سپاس‌گزاری

اینک که به لطف و یاری خدا و با تلاش و پشتکار مداوم موفق به انجام این پژوهش شده‌ام، بر خود لازم می‌دانم از استاد عزیز و محترم جناب آقای دکتر مهدی گردویی، استاد راهنمای این پایان‌نامه که از هیچ کوششی در راستای انجام آن دریغ ننموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. مایه افتخار اینجانب است که در محضر اساتید محترم گروه مکانیک-ساخت و تولید این دانشگاه حضور داشتم و از علم آنها بهره علمی برده و از اخلاق آنها سرمشق گرفته‌ام. در پایان بر خود لازم می‌دانم از تمامی دوستان و عزیزانی که در انجام این پژوهش مرا یاری نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

سلامتی و بهروزی همه این عزیزان را از درگاه خداوند متعال می‌طلبم.

حمزه ممشلی

شهریور ۹۸

تعهدنامه

اینجانب حمزه ممشلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده‌ی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه امکان‌سنجی اجرای فرایند سوراخ‌کاری لوله‌های فلزی با استفاده از فشار ابزار الاستومری 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 به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، 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.

چکیده

سوراخ کاری لوله های فلزی فرایندی برای ایجاد گشودگی در لوله برای تولید اتصالات صنعتی چند راهه است. استفاده از روش های سنتی سوراخ کاری منجر به کیفیت مطلوب لبه های برش نمی شود. استفاده از مته، مشکلاتی مانند پیش مته کاری، عدم امکان قید گذاری در سطح داخلی لوله، محدودیت شکل دایره ای و برآمدگی لبه های برش را به همراه دارد. این فرایند اخیراً با استفاده از سیال به عنوان یک ابزار سوراخ کاری انجام شده است. استفاده از سیال نیز دارای مشکلاتی چون آب بندی و ابزار و تجهیزات گران قیمت است. برای غلبه بر مشکلات ذکر شده بالا، در این پژوهش، سوراخ کاری لوله آلومینیومی به روشی جدید و توسط ابزار الاستومری به صورت تجربی و تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفت. ابزار الاستومری به علت انعطاف پذیری بالا، ایجاد کیفیت سطح مطلوب و کاهش هزینه تولید به طور وسیع در صنایع هوایی و خودروسازی استفاده می شود. تحلیل عددی فرایند در نرم افزار آباکوس و با فرض اینکه ابزار الاستومری یک ماده ابرکشسان تراکم ناپذیر با مدل رفتاری مونی-ریولین است، صورت گرفت. برای پیش بینی شکست نرم لوله از مدل شکست گرسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) که یک مدل میکرومکانیکی در پیش بینی شکست نرم فلزات متخلخل است استفاده شد. برای تعیین پارامترهای توصیف کننده مدل GTN، ابتدا آزمون کشش تجربی از نمونه های استاندارد و سپس شبیه سازی اجزای محدود با به کارگیری معیار GTN انجام و نمودار نیرو-جابجایی آزمون تجربی و شبیه سازی مقایسه شد. پارامترهای این مدل شکست به روش کالیبراسیون معکوس تعیین شد. در نهایت، پارامترهای به دست آمده، در شبیه سازی فرایند سوراخ کاری لوله در قالب سوراخ کاری مورد استفاده قرار گرفت. در آزمون های سوراخ کاری لوله، بیشینه نیروی فرایند، هندسه ی لوله به خصوص ضخامت و نیز اثر سختی ابزار الاستومری مورد بررسی قرار گرفت. جنس ماده مورد استفاده، لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ با سه نوع ضخامت ۱ mm، ۱/۴ mm و ۱/۸ mm بود. قطر سوراخ در فرایند سوراخ کاری برابر ۱۲ mm در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در صورت انتخاب صحیح پارامترهای مورد نظر فرایند از جمله جنس، هندسه، ضخامت لوله و سختی مناسب ابزار، استفاده از ابزار الاستومری برای سوراخ کاری لوله های فلزی

امکان‌پذیر بوده و منجر به ایجاد سطح برش با کیفیت مطلوبی می‌شود. همچنین میزان نیروی سوراخ‌کاری در آزمون‌های تجربی برای ضخامت‌های مختلف لوله و سختی‌های مختلف ابزار الاستومری با تقریب نسبتاً خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: سوراخ‌کاری لوله فلزی، ابزار الاستومری، شبیه‌سازی المان محدود، مدل شکست GTN، لوله آلومینیوم.

فهرست عنوان‌ها

ب.....	تصویب‌نامه
ج.....	تقدیم‌نامه
د.....	سیاس‌گزاری
ه.....	تعهدنامه
و.....	چکیده
ح.....	فهرست عنوان‌ها
ل.....	فهرست شکل‌ها
ص.....	فهرست جدول‌ها
ق.....	فهرست نشانه‌ها
۱.....	فصل ۱ مقدمه
۱-۱.....	۱-۱-۱ شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر
۲.....	۱-۱-۱-۱ شکل‌دهی و برش‌کاری با ابزار الاستومری
۴.....	۱-۱-۲ مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای صنعتی
۴.....	۲-۱ فرایند سوراخ‌کاری ورق‌ها و لوله‌های فلزی با سیال و ابزار الاستومری
۵.....	۱-۲-۱ سوراخ‌کاری با سیال
۵.....	الف) سوراخ‌کاری ورق به کمک سیال
۶.....	ب) سوراخ‌کاری لوله به کمک سیال
۷.....	۲-۲-۱ سوراخ‌کاری با ابزار الاستومری
۷.....	الف) سوراخ‌کاری ورق به کمک ابزار الاستومری
۱۰.....	ب) سوراخ‌کاری لوله به کمک ابزار الاستومری
۱۰.....	۳-۱ مقدمه‌ای بر فرایند برش فلزات
۱۱.....	۱-۳-۱ پولک‌زنی و سوراخ‌زنی
۱۲.....	۴-۱ برش معمولی و برش دقیق
۱۲.....	۱-۴-۱ برش معمولی

۱۲.....	۱-۱-۵-۱ مراحل و مناطق برش
۱۴.....	۱-۱-۵-۲ عمق نفوذ
۱۵.....	۲-۴-۱ برش دقیق
۱۶.....	۳-۴-۱ نیروی برش و ظرفیت پرس
۱۶.....	۴-۴-۱ محاسبه نیروی سنبه مقابل در فرایند سوراخ کاری لوله با ابزار الاستومری
۱۹.....	۵-۱- پیشینه تحقیق
۱۹.....	۱-۵-۱ انبساط‌دهی لوله به کمک ابزار الاستومری
۲۰.....	۲-۵-۱ سوراخ کاری ورق به کمک ابزار الاستومری
۲۱.....	۳-۵-۱ سوراخ کاری لوله به کمک سیال
۲۵.....	۶-۱- اهداف و ویژگی‌های پایان نامه
۲۵.....	۷-۱- ساختار پایان نامه

فصل ۲ طراحی و اجرای آزمون‌های تجربی.....۲۷

۲۷.....	۱-۲- معرفی جنس، ابعاد و خواص لوله و ابزار الاستومری
۲۸.....	۲-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله و ابزار الاستومری
۲۸.....	۱-۲-۲ آزمون کشش تک‌محوری لوله
۳۰.....	۳-۲- آزمون فشار ابزار الاستومری و محاسبه ثابت‌های مونی-ریولین
۳۱.....	۴-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها
۳۲.....	۵-۲- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی
۳۲.....	۱-۵-۲ قالب
۳۵.....	۲-۵-۲ دستگاه پرس هیدرولیک
۳۵.....	۶-۲- اجرای آزمون‌های تجربی

فصل ۳ شبیه‌سازی اجزای محدود.....۳۹

۳۹.....	۱-۳- روش اجزای محدود
۴۱.....	۱-۱-۳ معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس
۴۱.....	۲-۱-۳ حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس
۴۲.....	۲-۳- مکانیک آسیب و مبانی تئوری شکست نرم
۴۳.....	۱-۲-۳ شکست
۴۴.....	۲-۲-۳ شکست نرم
۴۶.....	۳-۲-۳ ساز و کار شکست نرم
۴۸.....	۴-۲-۳ مدل شکست نرم گرسون
۵۳.....	۳-۳- شرح مدل سازی عددی

۵۴	۱-۳-۳ شبیه‌سازی آزمون کشش تک‌محوری
۶۱	۲-۳-۳ روش تعیین پارامترهای مدل شکست نرم گرسون-تورگارد-نیدلمن (GTN)
۶۶	۳-۳-۳ تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی منحنی نیرو-جابه‌جایی آزمون کشش
۷۰	۴-۳-۳ مدل‌سازی فرایند سوراخ‌کاری لوله آلومینیومی با استفاده از فشار ابزار الاستومری
۸۱	۴-۳-۴ شرایط آزمون‌های شبیه‌سازی‌شده در فرایند سوراخ‌کاری لوله

فصل ۴ نتایج و بحث ۸۳

۸۳	۱-۴ نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی
۸۳	۱-۱-۴ آزمون کشش تک‌محوری
۸۶	۲-۱-۴ خصوصیات مکانیکی لوله آلومینیومی
۸۶	۳-۱-۴ آزمون فشار ابزار الاستومری
۸۸	۲-۴ نتایج تجربی و عددی فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری
۸۸	۱-۲-۴ بررسی اثر پارامترها بر منحنی نیرو-جابه‌جایی تجربی
۸۸	۱-۱-۲-۴ بررسی اثر سختی ابزار الاستومری
۹۰	۲-۱-۲-۴ بررسی اثر ضخامت لوله
۹۲	۳-۱-۲-۴ بررسی اثر سنبه مقابل
۹۵	۳-۴ نتایج شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری با ابزار الاستومری
۹۵	۱-۳-۴ بررسی اثر پارامترها بر منحنی نیرو-جابه‌جایی شبیه‌سازی
۹۵	۱-۱-۳-۴ بررسی اثر سختی ابزار الاستومری
۹۷	۲-۱-۳-۴ بررسی اثر ضخامت لوله
۹۸	۳-۱-۳-۴ بررسی اثر سنبه مقابل
۱۰۷	۴-۴ محاسبه میزان خطای بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی
۱۰۹	۵-۴ نمونه‌های تجربی سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری
۱۱۳	۶-۴ بررسی شکست در نمونه‌های شبیه‌سازی
۱۱۴	۷-۴ معیار حذف المان‌ها از محاسبه‌ها
۱۱۴	۸-۴ بررسی تغییرات کسر حجمی حفره‌ها در شبیه‌سازی

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها ۱۲۱

۱۲۱	۱-۵ مقدمه
۱۲۱	۲-۵ نتیجه‌گیری
۱۲۴	۳-۵ ارائه‌ی پیشنهادها
۱۲۵	منبع‌ها

پیوست یک ۱۳۱

پیوست دو ۱۳۲

پیوست سه ۱۳۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ کاربردهای متنوع ابزار الاستومری در فرایندهای شکل‌دهی، دوربری و سوراخ‌زنی ۳
- شکل ۱-۲ الف) تجهیزات سوراخ‌کاری ورق به کمک فشار هیدرواستاتیک، ب) دو روش فرایند سوراخ‌کاری ورق با استفاده از فشار هیدرواستاتیک [۶] ۶
- شکل ۱-۳ طرح‌واره‌های سوراخ‌کاری لوله به کمک سیال: الف [۷]، ب [۸] ۷
- شکل ۱-۴ روش‌های مختلف برای سوراخ‌کاری ورق‌های فلزی با استفاده از ابزارهای لاستیکی [۹] ۸
- شکل ۱-۵ طرح‌واره مجموعه قالب دستگاه سوراخ‌کاری [۱۰] ۹
- شکل ۱-۶ فرایند سوراخ‌کاری ورق با استفاده از سنبه لاستیکی [۱۰] ۹
- شکل ۱-۷ طرح‌واره فرایندهای پولک‌زنی و سوراخ‌زنی ۱۱
- شکل ۱-۸ طرح‌واره نمایش لقی بین سنبه و ماتریس در فرایندهای برش و سوراخ‌زنی ۱۲
- شکل ۱-۹ قسمت‌های مختلف قطعه برش خورده در فرایند برش [۱۲] ۱۳
- شکل ۱-۱۰ مقایسه فرایند برش‌کاری به دو روش، الف) برش دقیق، ب) برش معمولی [۲۶] ۱۵
- شکل ۱-۱۱ طرح‌واره نیروهای فرایند سوراخ‌کاری لوله ۱۷
- شکل ۱-۲ الف) ابعاد نمونه آزمون کشش لوله بر اساس استاندارد ASTM A370 (ابعاد به mm) و موقعیت برش نمونه‌ها نسبت به مقطع لوله، ب) نمونه ماشین‌کاری شده و آماده جهت آزمون کشش ۲۹
- شکل ۲-۲ دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به همراه سیستم کنترل رایانه‌ای ۳۰
- شکل ۲-۳ الف) نمونه‌های آزمون فشار ابزار الاستومری، ب) نمونه N۲ در بین فک‌های فشاری دستگاه ۳۱
- شکل ۲-۴ نمونه‌های آماده شده پس از داخل‌تراشی ۳۲
- شکل ۲-۵ الف) طرح‌واره قالب سوراخ‌کاری، ب) اجزای قالب ساخته‌شده جهت انجام آزمون ۳۴

- شکل ۶-۲- دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن ژاو-آریا به همراه واحد رایانه‌ای متصل به آن و مجموعه قالب نصب‌شده بر روی میز دستگاه ۳۵
- شکل ۷-۲- طرح‌واره فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری (RPP) ۳۶
- شکل ۱-۳- مقایسه سطح مقطع دو نوع شکست، الف) شکست ترد (فولاد)، ب) شکست نرم (آلومینیوم) [۴۹] ۴۴
- شکل ۲-۳- انواع شکست نرم فلزات تحت تنش یک‌بعدی الف) جوانه‌زنی و رشد حفره (مرزدانه‌ای)، ب) جوانه‌زنی و رشد حفره (درون‌دانه‌ای)، ج) گلوبی شدن [۵۱] ۴۵
- شکل ۳-۳- جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در فلزات نرم [۴۷] ۴۷
- شکل ۴-۳- مراحل الف) جوانه‌زنی ب) رشد و ج) به هم پیوستن حفره‌ها در بارگذاری کششی [۵۸] ۵۱
- شکل ۵-۳- مدل هندسی آزمون کشش ۵۴
- شکل ۶-۳- نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی برای لوله به ضخامت ۱ mm در آزمون کشش لوله ۵۷
- شکل ۷-۳- مدل شبکه‌بندی شده نمونه آزمون کشش ۵۸
- شکل ۸-۳- نمایی از چهار نوع مش‌بندی با تعداد المان متفاوت؛ الف) ۱۶۶۴۰ المان، ب) ۴۱۶۰ المان، ج) ۱۰۲۰ المان، د) ۲۶۰ المان ۵۹
- شکل ۹-۳- منحنی نیرو-جاب‌جایی تحلیل المان محدود برای تعداد المان متفاوت در راستای ضخامت ۶۰
- شکل ۱۰-۳- استقلال نتایج از شبکه‌بندی ۶۱
- شکل ۱۱-۳- فلوچارت (روند نما) به دست آوردن مقادیر پارامترهای GTN ۶۴
- شکل ۱۲-۳- اثر تغییرات پارامتر fC بر منحنی نیرو-جاب‌جایی ۶۷
- شکل ۱۳-۳- اثر تغییرات پارامتر fF بر منحنی نیرو-جاب‌جایی ۶۷
- شکل ۱۴-۳- اثر تغییرات پارامتر fN بر منحنی نیرو-جاب‌جایی ۶۸

- شکل ۳-۱۵ - منحنی نیرو-جاب‌جایی در سه حالت؛ آزمون کشش تجربی، با ضرایب GTN و بدون ضرایب GTN ۶۹
- شکل ۳-۱۶ - نمونه کشیده شده در شبیه‌سازی و مشاهده پارگی ۷۰
- شکل ۳-۱۷ - مدل هندسی اجزای فرایند سوراخ‌کاری لوله ۷۱
- شکل ۳-۱۸ - منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله آلومینیومی و ناحیه مومسان استفاده شده در شبیه‌سازی ۷۲
- شکل ۳-۱۹ - میله‌ی الاستیک غیرخطی [۸۷] ۷۳
- شکل ۳-۲۰ - شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی ۷۹
- شکل ۳-۲۱ - نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی اجزاء قالب و لوله ۸۰
- شکل ۳-۲۲ - نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی لوله ۸۰
- شکل ۴-۱ - منحنی تنش-کرنش حقیقی و مهندسی بر اساس نتایج آزمون کشش تک‌محوری ۸۵
- شکل ۴-۲ - نمونه آزمون کشش پس از اجرای آزمون و تشکیل گلویی موضعی ۸۶
- شکل ۴-۳ - منحنی تنش-کرنش فشاری پلی‌اورتان با سختی Shore-A ۸۵ ۸۷
- شکل ۴-۴ - منحنی C برحسب λ ۸۸
- شکل ۴-۵ - اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی بدون استفاده از سنبه مقابل برای لوله به ضخامت ۱ mm ۸۹
- شکل ۴-۶ - اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی با استفاده از سنبه مقابل برای لوله به ضخامت ۱ mm ۹۰
- شکل ۴-۷ - اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی بدون استفاده از سنبه مقابل در مقایسه آزمون‌های T02 ، T07 و T11 ۹۱
- شکل ۴-۸ - اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی با استفاده از سنبه مقابل در مقایسه آزمون‌های T03 ، T10 و T14 ۹۱
- شکل ۴-۹ - اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی در مقایسه آزمون‌های T02 و T03 ... ۹۳

- شکل ۴-۱۰- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی در مقایسه آزمون T04 با آزمون T05 ۹۳
- شکل ۴-۱۱- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی در مقایسه آزمون T07 با آزمون T10 ۹۴
- شکل ۴-۱۲- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی در مقایسه آزمون‌های T11 و T14 ۹۵
- شکل ۴-۱۳- اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی بدون استفاده از سنبه مقابل برای لوله با ضخامت ۱ mm ۹۶
- شکل ۴-۱۴- اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از سنبه مقابل برای لوله با ضخامت ۱ mm ۹۶
- شکل ۴-۱۵- اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی بدون استفاده از سنبه مقابل ۹۷
- شکل ۴-۱۶- اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی با استفاده از سنبه مقابل ۹۸
- شکل ۴-۱۷- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی در آزمون‌های S01 و S02 ۹۸
- شکل ۴-۱۸- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی در آزمون‌های S03 و S04 ۹۹
- شکل ۴-۱۹- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی در آزمون‌های S05 و S06 ۹۹
- شکل ۴-۲۰- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی در مقایسه آزمون‌های S07 و S08 ۱۰۰
- شکل ۴-۲۱- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S01 و معادل تجربی آن T02 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۱
- شکل ۴-۲۲- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S02 و معادل تجربی آن T03 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۱
- شکل ۴-۲۳- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S03 و معادل تجربی آن T04 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۲
- شکل ۴-۲۴- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S04 و معادل تجربی آن T05 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۲

- شکل ۴-۲۵- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S05 و معادل تجربی آن T07 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۳
- شکل ۴-۲۶- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S06 و معادل تجربی آن T10 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۳
- شکل ۴-۲۷- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S07 و معادل تجربی آن T11 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۴
- شکل ۴-۲۸- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S08 و معادل تجربی آن T14 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی) ۱۰۴
- شکل ۴-۲۹- منحنی نیروی فرایند بر حسب ضخامت نمونه‌ها بدون استفاده از سنبه مقابل ۱۰۷
- شکل ۴-۳۰- منحنی درصد خطای بین نیروی متوسط تجربی و شبیه‌سازی بر حسب ضخامت نمونه‌ها بدون استفاده از سنبه مقابل ۱۰۸
- شکل ۴-۳۱- منحنی نیروی فرایند بر حسب ضخامت نمونه‌ها با استفاده از سنبه مقابل ۱۰۸
- شکل ۴-۳۲- منحنی درصد خطای بین نیروی متوسط تجربی و شبیه‌سازی بر حسب ضخامت نمونه‌ها با استفاده از سنبه مقابل ۱۰۹
- شکل ۴-۳۳- نمونه‌های سالم سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری ۱۱۰
- شکل ۴-۳۴- نمونه‌های معیوب (پلیسه دار) سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری ۱۱۰
- شکل ۴-۳۵- نمونه‌های برش داده شده و مناطق برش ۱۱۱
- شکل ۴-۳۶- نمونه‌های معیوب شده ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۵۰ حین اجرای آزمون ۱۱۱
- شکل ۴-۳۷- هندسه تغییر شکل الف) نمونه تجربی T02 ب) شبیه‌سازی معادل آن (S01) در دو وضعیت ۱۱۲
- شکل ۴-۳۸- هندسه تغییر شکل الف) نمونه تجربی T10 ب) شبیه‌سازی معادل آن (S06) در دو وضعیت ۱۱۲
- شکل ۴-۳۹- الف) توزیع تنش فون‌میزز (MPa) بر اساس معیار شکست GTN ب) کرنش مومسان معادل برای آزمون شبیه‌سازی S01 ۱۱۳

- شکل ۴-۴۰ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S01
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۱۶
- شکل ۴-۴۱ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S02
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۱۷
- شکل ۴-۴۲ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S03
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۱۷
- شکل ۴-۴۳ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S04
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۱۸
- شکل ۴-۴۴ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S05
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۱۹
- شکل ۴-۴۵ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S06
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۱۹
- شکل ۴-۴۶ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S07
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۲۰
- شکل ۴-۴۷ - توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S08
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست ۱۲۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ - مشخصات ابعادی نمونه‌های ابزار الاستومری در آزمون فشار ۳۱
- جدول ۲-۲ - پارامترهای قالب فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری ۳۷
- جدول ۳-۲ - شرایط آزمایش‌های تجربی انجام‌شده بر روی لوله آلومینیومی ۳۸
- جدول ۱-۳ - خصوصیات مکانیکی لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ [۶۰] ۵۵
- جدول ۲-۳ - خواص مومسان لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ ۵۶
- جدول ۳-۳ - پارامترهای مدل شکست GTN در پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهش‌گران
مختلف ۶۲
- جدول ۴-۳ - مقادیر پارامترهای GTN ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در پژوهش‌های دیگر [۸۲] ۶۵
- جدول ۵-۳ - مقادیر مربوط به پارامترهای مدل GTN در بررسی اثر آنها بر منحنی نیرو-جابجایی ۶۶
- جدول ۶-۳ - پارامترهای کالیبره شده مدل GTN برای لوله آلومینیومی Al 6061 ۶۸
- جدول ۷-۳ - مقادیر پارامترهای معیار شکست GTN برای لوله آلومینیومی Al 6061 ۶۹
- جدول ۸-۳ - خواص مکانیکی لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ ۷۱
- جدول ۹-۳ - خصوصیات مکانیکی پلی‌اورتان با سختی‌های متفاوت [۸۶] ۷۳
- جدول ۱۰-۳ - شرایط آزمون‌های طراحی‌شده در شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری ۸۱
- جدول ۱-۴ - خواص مکانیکی لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ ۸۶
- جدول ۲-۴ - نتایج حاصل از تحلیل نیرو-جابجایی در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های
معادل ۱۰۵
- جدول ۳-۴ - معیار شکست نرم برای حذف المان‌ها از محاسبه‌ها ۱۱۴

فهرست نشانه‌ها

f_2	ضریب تجربی دوم	A	مساحت
f_c	مقدار بحرانی کسر حجمی حفره‌ها	A_0	سطح مقطع اولیه
f_F	کسر حجمی حفره‌ها در پایان شکست	A_S	مساحت سطح سنبه مقابل
f_N	کسر حجمی جوانه‌زنی حفره‌های جدید	B	تنسور تغییر شکل کوشی-گرین چپ
f^*	نسبت حجم حفره اصلاح شده	C	لقی (کلیرانس)
I_1	ثابت اول تنسور تغییر شکل	$CEPS$	ثابت کرنش مومسان معادل
I_2	ثابت دوم تنسور تغییر شکل	d_d	قطر سوراخ قالب
I_3	ثابت سوم تنسور تغییر شکل	d_1	قطر ابزار الاستومری
K	ضریب استحکام (کار سختی)	d_2	قطر ماندزل متحرک
l_0	طول اولیه	e	کرنش مهندسی
l	طول بعد از کشش	E	مدول کشسان
l_c	طول برش	F_S	نیروی برشی
L	طول میله الاستیک غیرخطی	F_G	نیروی سنبه مقابل
L_R	طول رینگ	F_P	نیروی سنبه
n	توان کرنش سختی	f	کسر حجمی حفره‌ها
P	نیروی محوری خارجی	f_0	کسر حجمی اولیه حفره‌ها
q_1	پارامتر تابع تسلیم در مدل GTN	f_1	ضریب تجربی اول

ν	نسبت پواسون	q_2	پارامتر تابع تسلیم در مدل GTN
σ	تنش حقیقی	q_3	پارامتر تابع تسلیم در مدل GTN
σ_{eq}	تنش معادل فون میزز	R_m	حداکثر استحکام کششی ماده
σ_y	تنش تسلیم ماده	S	تنش مهندسی
σ_m	تنش میانگین (هیدرواستاتیک)	S_{ij}	تنسور تنش انحرافی
$\sigma_i (i = 1, 2, 3)$	تنش‌های اصلی	S_N	انحراف معیار استاندارد توزیع حفره‌ها
τ	استحکام برشی	t	ضخامت اولیه لوله (ورق)
Φ	تابع تسلیم گرسون	$T_n (n = 1 - 14)$	شماره نمونه‌های آزمون
$\frac{A}{f_N}$	تابع جوانه‌زنی حفره‌ها	u	جابه‌جایی
		$W(\lambda)$	تابع چگالی انرژی کرنشی
		α	زاویه گسیختگی
		δ	نرخ به هم پیوستن حفره‌ها
		δ_{ij}	دلتای کرونیکر
		ε	کرنش حقیقی
		ε_N	کرنش میانگین جوانه‌زنی حفره
		$\dot{\varepsilon}_p$	نرخ کرنش مومسان معادل
		$\bar{\varepsilon}^p$	کرنش مومسان معادل
		λ	نسبت کرنش

فصل ۱ مقدمه

با پیشرفت روزافزون فن آوری و رقابت بازار تجارت، اکثر صنایع مانند صنایع نظامی، فضایی، خودروسازی، پتروشیمی و تأسیساتی به سمت کاهش هزینه و زمان تولید، عرضه محصولات سبک تر و با کیفیت بالاتر و همچنین سیستم تولید انعطاف پذیر روی آورده اند. به همین دلیل توسعه فرایندهای پیشرفته تولید امری لازم و ضروری است. از این رو پژوهش گران و صنعت گران به توسعه فرایندهای نوین تولید پیشرفته با انعطاف پذیری بالا پرداخته اند. یکی از این فرایندها که در دو دهه ی گذشته در صنایع هوافضا و اتومبیل سازی در زمینه ی شکل دهی و برش ورق های فلزی و روش های جلوگیری از پیدایش عیوب در قطعه توأم با کاهش زمان و هزینه ی تولید، مورد توجه فراوان قرار گرفته و توسعه ی شگرفی نیز در همین راستا حاصل شده، فرایند شکل دهی و برش کاری با بالشتک کشسان^۱ است. انعطاف پذیری بالا، کیفیت سطح مطلوب و هزینه پایین ساخت و تعمیر قالب به علت استفاده از یک نیمه ی صلب ابزار موجب شده تا این روش به عنوان جایگزین مناسبی برای روش های شکل دهی مرسوم تلقی شود.

در این فصل، نخست فرایندهای شکل دهی با قالب انعطاف پذیر و شکل دهی و برش کاری با ابزار الاستومری و مزایا و معایب آن و توضیح کوتاهی در مورد سوراخ کاری با سیال و روش انجام آن و نیز

^۱ Rubber Pad Forming and Cutting

فرایند برش کاری فلزات ارائه شده؛ همچنین به جایگاه سوراخ کاری با ابزار الاستومری اشاره خواهد شد. در ادامه نیز مروری بر پژوهش‌های انجام شده توسط محققان دیگر که مرتبط با این پژوهش است؛ ارائه می‌شود. در پایان فصل نیز اهداف پایان‌نامه ذکر خواهد شد.

۱-۱- شکل‌دهی با قالب انعطاف‌پذیر

در شکل‌دهی با قالب‌های انعطاف‌پذیر^۱ از یک ماده‌ی واسط انعطاف‌پذیر به‌جای سنبه یا ماتریس (یک نیمه صلب) به عنوان انتقال‌دهنده فشار استفاده می‌شود. ماده‌ی انعطاف‌پذیر ممکن است جامد (مثل مواد ویسکوپلاستیک یا بالشتک کشسان و مواد الاستومری)، مایع (مثل آب و روغن) و یا گاز (مثل هوای فشرده) باشد. فرایندهای شکل‌دهی با قالب‌های انعطاف‌پذیر در مقایسه با فرایندهای با قالب صلب مرسوم دارای مزایای متعددی مثل انعطاف‌پذیری بالا، هزینه‌ی پایین، کیفیت سطح خوب و دقت ابعادی بالا است.

۱-۱-۱ شکل‌دهی و برش کاری با ابزار الاستومری

از بالشتک کشسان می‌توان برای انجام عملیات برش کاری و سوراخ کاری ورق‌های فلزی نیز استفاده کرد. جنس اصلی بالشتک کشسان مورد استفاده جهت برش ورق فلزی از پلی‌اورتان^۲، لاستیک طبیعی^۳ و لاستیک سیلیکون^۴ است. پلی‌اورتان‌ها دسته‌ای از مواد لاستیکی هستند که تقریباً تراکم ناپذیرند و به همین دلیل همانند سیال فشار یکسانی بر روی تمامی سطوح قطعه کار وارد می‌کنند. انجام عملیات برش کاری و سوراخ کاری به کمک بالشتک کشسان مشابه روش‌های مرسوم با سنبه و ماتریس است و تنها تفاوت آنها در این است که اساس برش کاری و یا سوراخ کاری در این فرایند بر قرار گرفتن بالشتک کشسان در یک محفظه صلب است. مسئله اصلی در صنایع امروزی افزایش استحکام محصول، کاهش

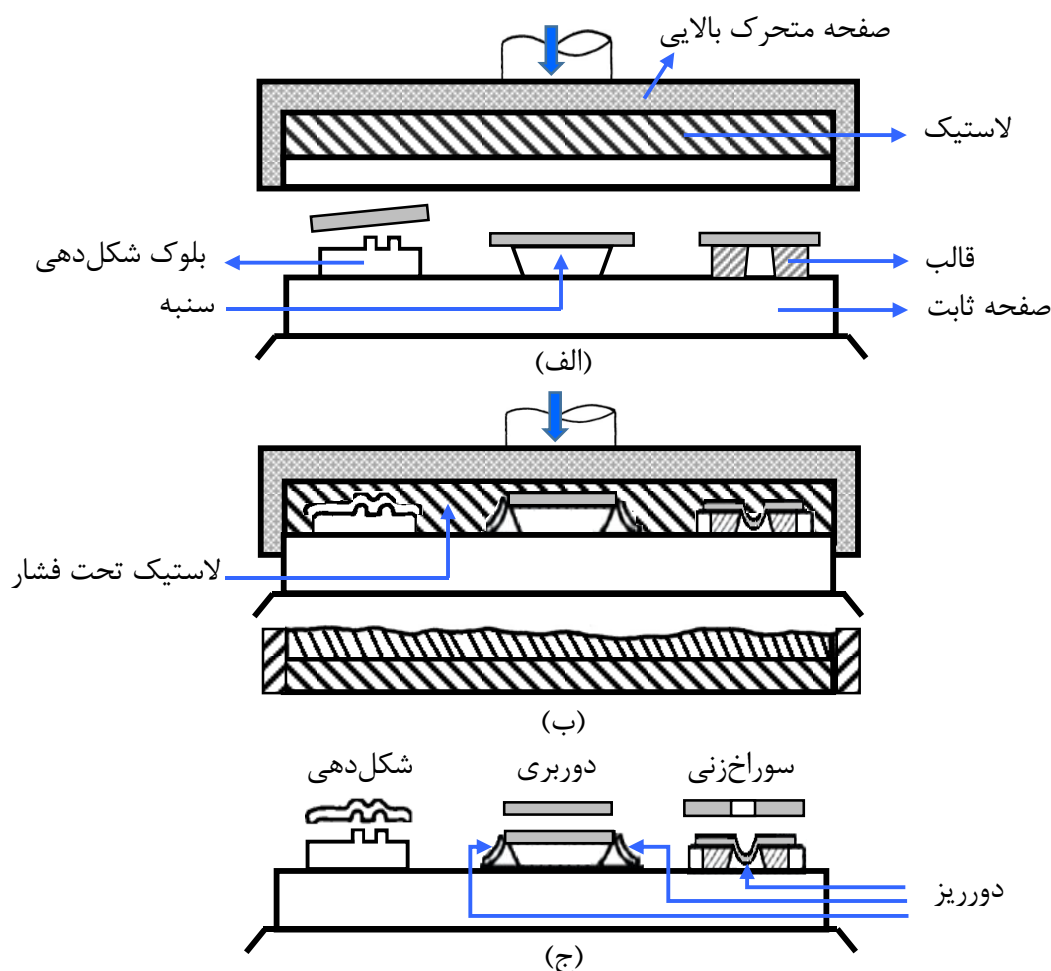
^۱ Flexible die forming

^۲ Polyurethane (PU)

^۳ Natural rubber

^۴ Silicone rubber

وزن محصول، کاهش هزینه‌های تولید و سودآوری بیشتر است. بنابراین شکل‌دهی و برش فلزات با ابزار الاستومری که یکی از مهم‌ترین روش‌های تولید است برای دستیابی به اهداف فوق بسیار مناسب است. بیشتر تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر نیز به استفاده از این فرایند در شکل‌دهی و تا حدودی برش ورق‌های فلزی به صورت خم‌کاری، دوربری، شکل‌دهی و دوربری ورق به‌طور هم‌زمان و تولید صفحه‌های فلزی صنعتی معطوف شده است. در شکل ۱-۱ کاربردهای متنوعی از شکل‌دهی و برش با ابزار الاستومری نمایش داده شده است [۱].



شکل ۱-۱ کاربردهای متنوع ابزار الاستومری در فرایندهای شکل‌دهی، دوربری و سوراخ‌زنی (الف) قبل از انجام فرایند، (ب) حین انجام فرایند، (ج) پس از انجام فرایند [۱].

۱-۱-۲ مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای صنعتی

شکل‌دهی و برش‌کاری با ابزار الاستومری نیز مانند روش‌های دیگر شکل‌دهی و برش ورق‌های فلزی با مزایا و معایبی همراه است. از جمله مزایای این روش می‌توان به توانایی شکل‌دهی یا برش قطعات مشابه با جنس‌های مختلف توسط یک قالب، کاهش هزینه ابزار و ابزارسازی، امکان شکل‌دهی قطعات با شیب منفی، افزایش کیفیت سطح قطعه، کاهش چروکیدگی، کاهش زمان طراحی ابزار، کاهش زمان تنظیم به دلیل عدم نیاز به تنظیم یا کنترل تلورانس قالب و عدم نیاز به روانکاری اشاره کرد. انرژی مصرفی بالا، سرعت ساخت نسبتاً پایین قطعه، عدم کاربرد در شکل‌دهی قطعات بزرگ و ورق‌های ضخیم، عمر محدود ابزار الاستومری، محدودیت در اعمال فشار به ابزار الاستومری و عدم کاربرد در درجه حرارت‌های بالا از جمله معایب این روش است [۲]. از مهم‌ترین کاربردهای صنعتی شکل‌دهی و برش‌کاری با ابزار الاستومری می‌توان به ساخت صفحات دوقطبی فلزی، روکش اکسل، لوله‌های توخالی پله‌دار و پایه‌ی دستگیره‌ی داخل اتاق خودرو و سوراخ‌کاری ورق‌های فلزی اشاره کرد.

۱-۲-۲ فرایند سوراخ‌کاری ورق‌ها و لوله‌های فلزی با سیال و ابزار الاستومری

تاریخچه استفاده از سیال به منظور شکل‌دهی فلزات به بیش از ۱۰۰ سال قبل باز می‌گردد. با این وجود مبانی اولیه فرایند هیدروفرمینگ در دهه ۱۹۴۰ بنیان‌گذاری شده است. در دهه ۱۹۵۰، فرایندهای تولید پیوسته مانند شکل‌دهی سوپر پلاستیک، شکل‌دهی انفجاری و شکل‌دهی با لاستیک برای افزایش شکل‌پذیری آلومینیوم و سایر مواد سبک‌وزن پیشنهاد شدند. اولین کاربرد ثبت شده فرایند هیدروفرمینگ توسط میلتن گاروین از شرکت شایبل آمریکا در دهه ۱۹۵۰ میلادی بوده است که از این فرایند در ساخت ظروف آشپزخانه بهره جسته است [۳]. استفاده از این فرایند به دلیل نیاز به فناوری نسبتاً بالا تا مدت‌ها محدود به موارد خاص بوده است. با پیشرفت فناوری، ماشین‌آلات، سیستم‌های آب‌بندی و فرایندهای کنترل رایانه‌ای در دهه‌ی اخیر، شکل‌دهی با فشار سیال، به‌عنوان یک روش قابل استفاده در صنعت معرفی شده است [۴]. سوراخ‌کاری لوله و ورق با سیال یکی از

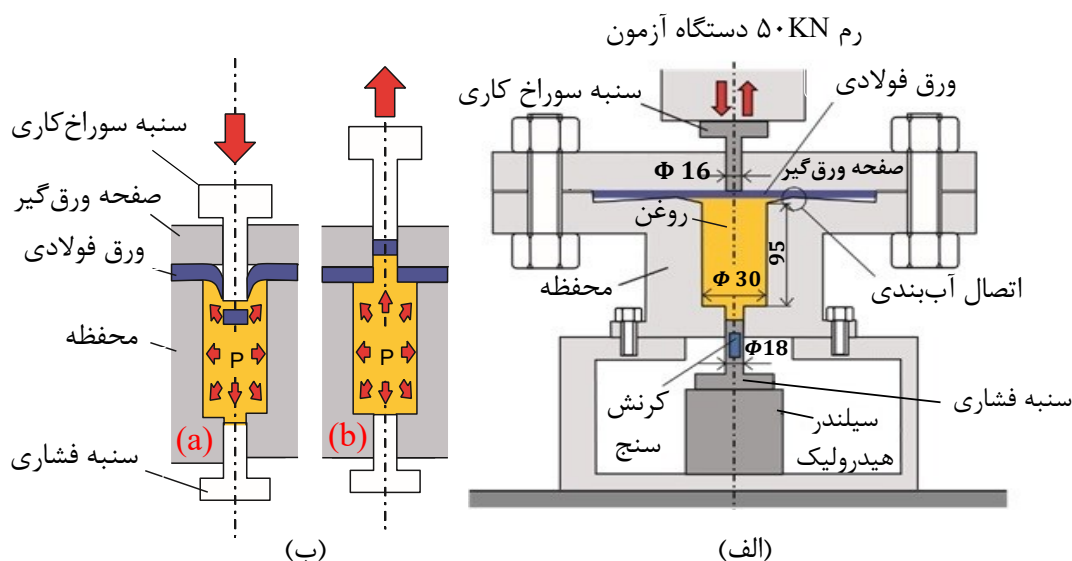
فرایندهای برش کاری است که در آن از یک سیال تحت فشار به جای سنبه یا ماتریس صلب به منظور ایجاد تغییر شکل مومسان در قطعه اولیه که به شکل ورق یا لوله است استفاده می شود. در فرایندهای سوراخ کاری ورق و لوله با سیال نیز همانند فرایندهای هیدروفرمینگ، همواره به یک پرس، قالب و یک سیستم تقویت کننده فشار نیاز است [۵]. در هردو فرایند سوراخ کاری و هیدروفرمینگ، به دلیل توزیع فشار یکنواخت سیال بر سطح قطعه، محصولی با خواص مکانیکی مطلوب حاصل می شود. فرایند سوراخ کاری ورق ها و لوله های فلزی را می توان با توجه به ماهیت فرایند (سوراخ کاری با سیال یا با ابزار الاستومری)، شکل قطعه خام و هندسه نهایی قطعه کار به دو دسته سوراخ کاری ورق و لوله با سیال و سوراخ کاری ورق و لوله با ابزار الاستومری تقسیم نمود.

۱-۲-۱ سوراخ کاری با سیال

سوراخ کاری با استفاده از سیال به دو دسته تقسیم می شود:

الف) سوراخ کاری ورق به کمک سیال

سوراخ کاری ورق به کمک سیال به دو روش قابل اجرا است. در روش نخست ورق در داخل قالب قرار گرفته و فشار هیدرولیکی با فشرده سازی سیال روغن از طریق سنبه واقع در انتهای محفظه روغن افزایش می یابد و از سوی دیگر ورق از طریق اعمال فشار توسط سنبه واقع در بالای ورق به سمت مایع تحت فشار فشرده شده که منجر به سوراخ کاری ورق می شود. در روش دوم ورق در داخل قالب قرار گرفته و افزایش فشار هیدرولیکی از طریق سنبه واقع در انتهای محفظه موجب به عقب راندن سنبه واقع در سوی دیگر ورق شده و باعث سوراخ کاری ورق می شود. شکل ۱-۲-الف تجهیزات سوراخ کاری ورق به کمک سیال و شکل ۱-۲-ب دو روش سوراخ کاری ورق به کمک سیال را نشان می دهد [۶].

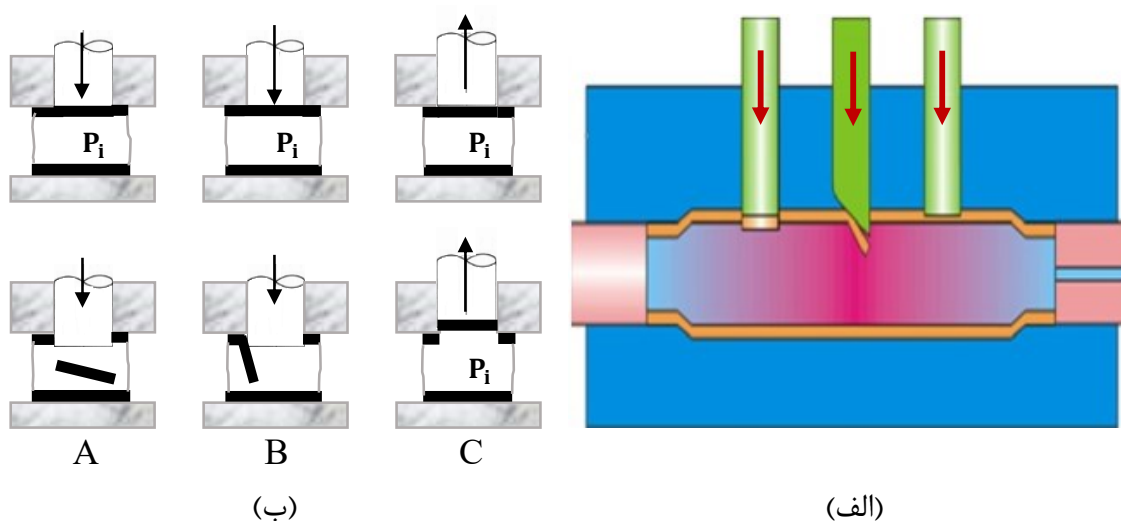


شکل ۱-۲ (الف) تجهیزات سوراخ کاری ورق به کمک فشار هیدرواستاتیک، (ب) دو روش فرایند سوراخ کاری ورق با استفاده از فشار هیدرواستاتیک [۶]

نتایج آزمون‌های تجربی نشان می‌دهد که در سوراخ کاری به روش فشردن ورق به داخل مایع تحت فشار (شکل ۱-۲-ب-ا روش حرکت رو به جلو سنبه) ورق تاب برداشته و تورفتگی لبه حول حفره ایجاد می‌شود. اما در سوراخ کاری با فشار هیدرواستاتیک هنگامی که سنبه رو به عقب حرکت می‌کند (شکل ۱-۲-ب-ب روش حرکت رو به عقب سنبه) تابیدگی ورق متوقف می‌شود اما پلیسه تشکیل شده و برآمدگی لبه تغییر نمی‌کند. چنانچه هر دو حالت به طور هم‌زمان، وقتی ورق توسط سنبه به داخل مایع تحت فشار فشرده می‌شود (روش حرکت رو به جلو سنبه) مطابق روش دوم حفره با فشار هیدرواستاتیک ایجاد شود (روش حرکت رو به عقب سنبه) در اطراف حفره پلیسه ایجاد نمی‌شود و برآمدگی لبه در مقایسه با روش حرکت رو به عقب سنبه حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد [۶].

ب) سوراخ کاری لوله به کمک سیال

سوراخ کاری لوله به کمک سیال نیز همانند سوراخ کاری ورق است. در این حالت نیز لوله در داخل حفره قالب قرار می‌گیرد و انتهای لوله بسته است. فشار داخل لوله با فشرده‌سازی سیال هیدرولیکی افزایش می‌یابد. حرکت سنبه واقع در سوی دیگر لوله در راستای عمود بر سطح خارجی لوله باعث ایجاد حفره یا سوراخ در لوله می‌شود. شکل ۱-۳ الف و ب طرح‌واره این فرایند را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- طرح‌واره‌های سوراخ‌کاری لوله به کمک سیال: الف [۷]، ب [۸]

حالت A در شکل ۱-۳-ب حالتی است که عملیات سوراخ‌کاری لوله با حرکت رو به داخل سنبه انجام می‌شود. در حالت B سوراخ‌کاری با تا کردن قطعه دورریز (پلیسه) به داخل لوله انجام می‌شود و در حالت C سوراخ‌کاری با حرکت رو به خارج سنبه انجام می‌شود.

۱-۲-۲ سوراخ‌کاری با ابزار الاستومری^۱

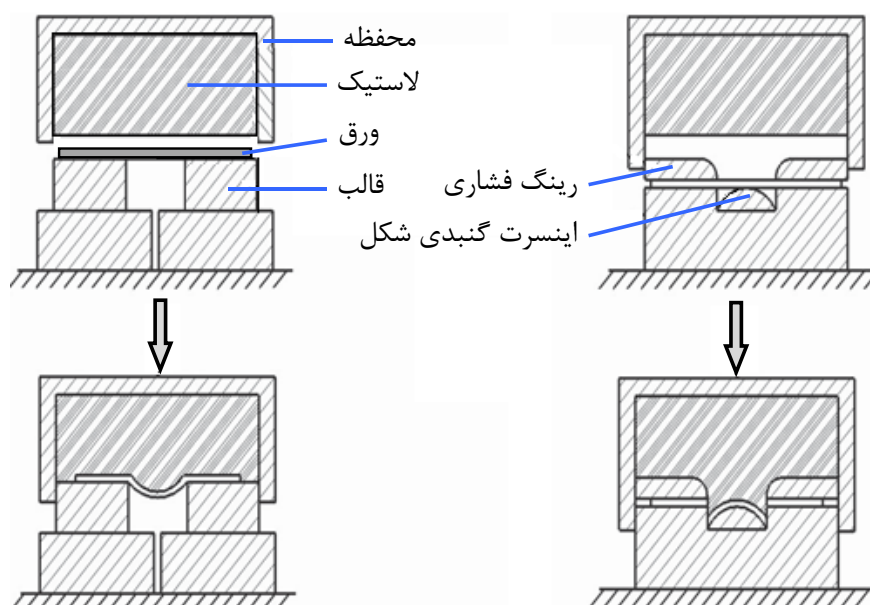
الف) سوراخ‌کاری ورق به کمک ابزار الاستومری

سوراخ‌کاری یکی از فرایندهای برش ورق است که به طور معمول در صنایع تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، فناوری سوراخ‌کاری ریز، به‌ویژه در صنایع الکترونیکی به‌طور فزاینده‌ای در حال گسترش است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، کیفیت قطعه سوراخ شده با فرایند سوراخ‌کاری معمولی رضایت‌بخش است؛ اما، در برخی شرایط کیفیت بالاتری از قطعه یا سوراخ مورد نیاز است. بهبود کیفیت معمولاً یکی از موارد به حداقل رساندن اعوجاج و تغییر شکل، بهبود صافی سطح، کاهش یا مهار شکست، و به حداقل رساندن ضایعات است. با استفاده از لاستیک به عنوان ابزار سوراخ‌کاری می‌توان به این بهبود دست‌یافت. اصول عملیات سوراخ‌کاری با استفاده از سنبه لاستیکی همان فرایند گرین^۲ است

^۱ Rubber Pad Piercing (RPP)

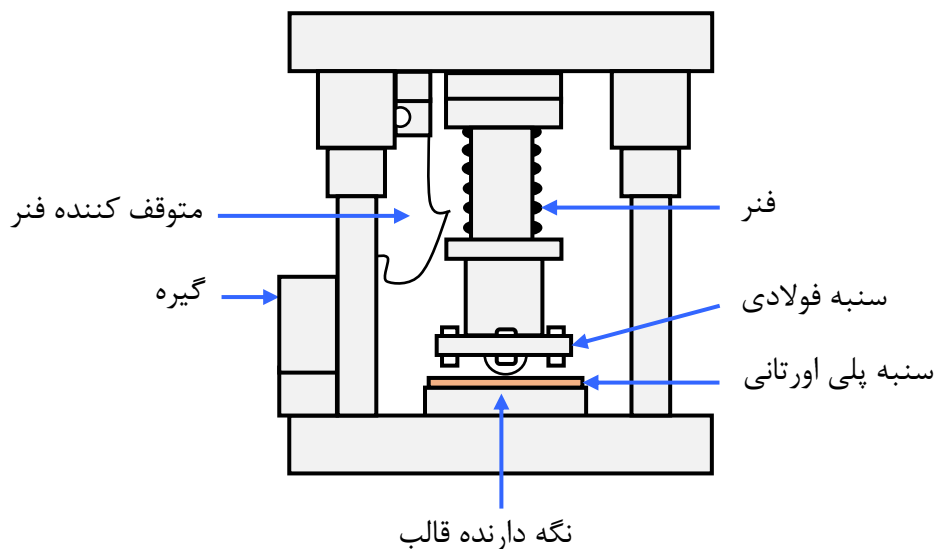
^۲ Guerin

که برای ساخت قطعات هواپیما در سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. هنری گرین این روش را در اواخر سال ۱۹۳۰ کشف کرده بود. در این روش یک ابزار لاستیکی برای غلبه بر تنش فشاری در قطعه کار کمک می‌کند تا سوراخ کاری انجام شده و یک شکست-برش آزاد- با اعمال تنش برشی در تمام ضخامت قطعه کار ایجاد شود. به منظور افزایش اصطکاک بین قطعه کار و بالشتک لاستیکی می‌توان از یک اصطکاک اجباری مانند پودر رزین استفاده نمود که در نتیجه تنش فشاری شعاعی در نزدیکی لبه برش افزایش می‌یابد. اصطکاک بین قطعه کار و سطح قالب می‌بایست با استفاده از یک روانکار و ماشین کاری خوب سطح قالب به حداقل برسد. در شکل ۱-۴ تصویری از یک فرایند سوراخ کاری با استفاده از سنبه لاستیکی نشان داده شده است. هنگامی که رم پرس رو به پایین حرکت می‌کند، بالشتک لاستیکی با یک فشار ساده تغییر شکل می‌دهد تا اینکه به طور محکم با دیواره محفظه نگهدارنده لاستیک در تماس باشد. فشردگی لاستیک منجر به افزایش فشار روی قطعه کار شده و لاستیک مجبور به جریان در جهت حداقل مقاومت ماده- که در این مورد حفره قالب است- خواهد شد [۹].



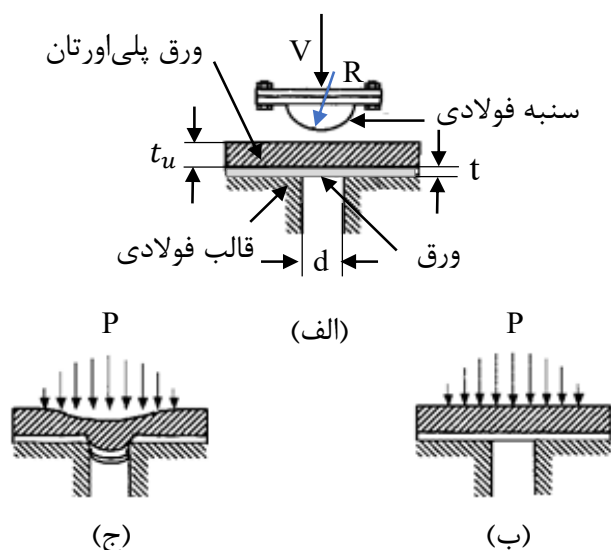
شکل ۱-۴- روش‌های مختلف برای سوراخ کاری ورق‌های فلزی با استفاده از ابزارهای لاستیکی [۹]

یکی دیگر از روش‌های سوراخ کاری ورق با استفاده از ابزار لاستیکی در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵- طرح‌واره مجموعه قالب دستگاه سوراخ‌کاری [۱۰]

در این فرایند نیروی اعمالی به ورق پلی‌اورتان از برخورد یک سنبه فلزی که از نیروی فنر بهره می‌برد تأمین می‌شود. با قرار دادن ورق بر روی یک قالب فلزی و اعمال بار ضربه‌ای به الاستومر پلی‌اورتان می‌توان یک سوراخ دایره‌ای ساده را برش داد. در این فرایند، ورق پلی‌اورتان می‌تواند به عنوان یک سنبه لاستیکی به جای استفاده از یک نیمه قالب فلزی عمل کند. طرح‌واره فرایند سوراخ‌کاری در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۶- فرایند سوراخ‌کاری ورق با استفاده از سنبه لاستیکی [۱۰]

همان‌طور که در شکل ۱-۶-ب نشان داده شده، توزیع فشار، در یک قوس دایره‌ای شکل، با برخورد یک سنبه فلزی با سرعت بالا (شکل ۱-۶-الف) به دست آمده است. بنابراین، الاستومر پلی‌اورتان همان‌طور که در شکل ۱-۶-ج نشان داده شده، تغییر شکل یافته است. در نتیجه، ورق پلی‌اورتان به داخل قالب فلزی که در زیر ورق نصب شده جریان می‌یابد و موجب برش و ایجاد سوراخ مورد نظر بر روی ورق قطعه‌کار می‌شود.

ب) سوراخ‌کاری لوله به کمک ابزار الاستومری

در زمینه‌ی سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری تاکنون پژوهشی انجام نشده و این موضوع برای اولین بار در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

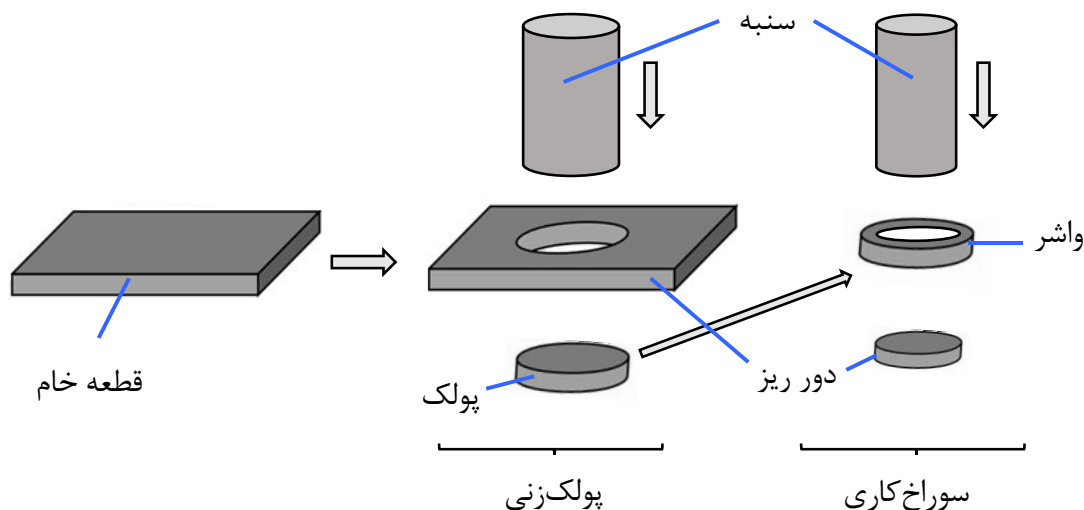
۱-۳- مقدمه‌ای بر فرایند برش فلزات

عملیات برش فلزات با استفاده از سنبه و ماتریس یکی از پرکاربردترین فرایندها در صنعت است. برش عبارت از عملیات جداسازی قطعات از ورق یا نوار برشی و یا ایجاد سوراخ در یک قطعه در اثر تنش برشی بین سنبه و ماتریس است. در این فرایند از ابزاری به نام قالب برشی استفاده می‌شود که با استفاده از دو عضو اصلی آن یعنی سنبه و ماتریس و اجزای کمکی، توانایی جداسازی قطعات از نوار برشی را داراست. نتیجه نهایی عملیات برش توسط سنبه و ماتریس یک قطعه آماده یا نیمه تکمیل است که در بعضی موارد بسته به نوع عملیات برش شامل قراضه^۱ نیز می‌شود. در این فرایند با حرکت سنبه و ماتریس به سمت یکدیگر قطعه کار بین دو لبه برش قرار گرفته و قطعه تحت تنش قرار می‌گیرد که پس از تغییر شکل مومسان ورق بریده می‌شود.

^۱ Scrape

۱-۳-۱ پولک‌زنی^۱ و سوراخ‌زنی^۲

پولک‌زنی (برش مازاد خارج) و سوراخ‌زنی فرایندهای جداسازی مکانیکی قطعات با استفاده از عملیات برش بدون تشکیل براده و در صورت لزوم با استفاده از عملیات شکل‌دهی اضافی هستند. یک قطعه پولک‌زنی یا سوراخ‌زنی معمولاً به‌عنوان یک محصول اولیه برای تولید قطعات شکل‌دهی استفاده می‌شود و از این دو فرایند به‌عنوان عملیات نهایی برای تولید قطعات کمتر استفاده می‌شود. در پولک‌زنی قطعه جدا شده از ورق که محصول مورد نظر است را پولک می‌نامند ولی در فرایند سوراخ‌زنی اسکلت باقیمانده ورق، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این موضوع در شکل ۷-۱ به وضوح نمایش داده شده است.



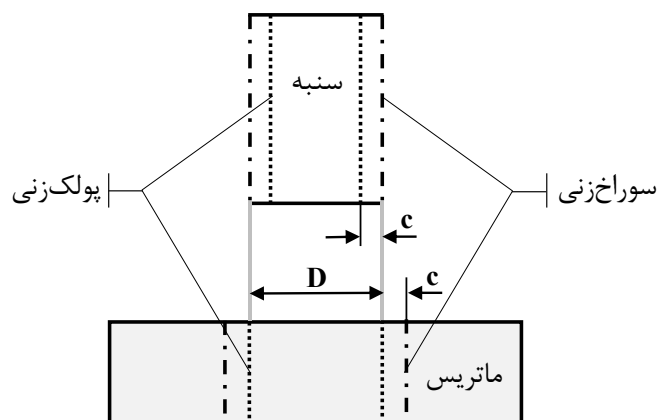
شکل ۷-۱- طرح‌واره فرایندهای پولک‌زنی و سوراخ‌زنی

با توجه به اینکه در هر دو فرایند که عملیات برش محصور نیز نامیده می‌شوند؛ همیشه ابعاد سوراخ ایجادشده با ابعاد سنبه و ابعاد پولک ایجاد شده با ماتریس یا قالب برابر است بنابراین در عملیات پولک‌زنی لقی^۳ به سنبه داده‌شده و در عملیات سوراخ‌زنی لقی به ماتریس داده می‌شود. در شکل ۸-۱ این مسئله به سهولت نمایان است.

^۱ Blanking

^۲ Piercing

^۳ Clearance



شکل ۱-۸- طرح‌واره نمایش لقی بین سنبه و ماتریس در فرایندهای برش و سورخ‌زنی

۴-۱- برش معمولی و برش دقیق

۱-۴-۱ برش معمولی

در فرایند برش معمولی می‌توان قطعه یا سورخ‌هایی از حد ضخامت ورق تا اندازه‌های بزرگ تا محدوده‌ای که تجهیزات اجازه می‌دهد ایجاد نمود. در ایجاد قطعات یا سورخ‌های بزرگ، مشکل اصلی، ظرفیت تجهیزات است زیرا با بزرگ‌تر شدن ابعاد به نیروی پرس بیش‌تر و ظرفیت بالاتر پرس نیاز است. در ایجاد اشکال کوچک نیز مشکل اصلی، ناپایداری سنبه در برابر کمانش است که در برخی موارد از راهنما یا تقویت‌کننده استفاده می‌شود.

۱-۵-۱-۱ مراحل و مناطق برش

فرایند برش در پولک‌زنی و سورخ‌زنی در ۴ مرحله به شرح زیر صورت می‌گیرد:

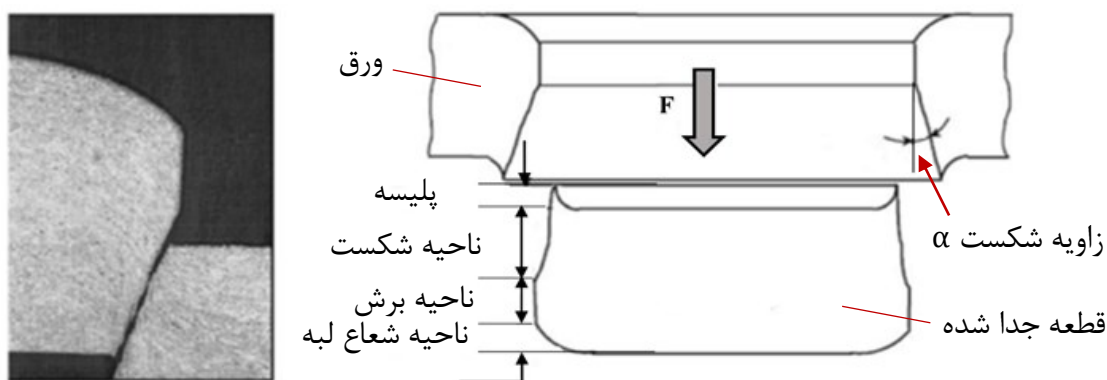
۱. در مرحله اول فرایند پس از تماس سنبه و ماتریس با ورق، سنبه به داخل ورق نفوذ می‌کند که با کمی نفوذ سنبه، به علت جریان مومسان ورق به فضای لقی بین سنبه و ماتریس کشیده می‌شود که در این مرحله منطقه شعاعی (ناحیه تغییر شکل مومسان) به وجود می‌آید.

۲. در ادامه نفوذ سنبه، برش نرم مواد در لبه برش سنبه و ماتریس اتفاق می‌افتد که دارای سطحی صاف و براق است، زیرا در این منطقه برش خالص صورت گرفته است. این منطقه برش با فشار با سطح سنبه و ماتریس در تماس است.

۳. در ادامه و در نزدیکی لبه سنبه و ماتریس، ترک تشکیل شده و گسیختگی نرم مواد صورت می‌گیرد. این ترک‌ها از دو طرف به سمت مرکز ضخامت ورق در ناحیه لقی پیش می‌روند و پس از اتصال ترک‌ها قطعه مورد نظر جدا می‌شود. سطح به وجود آمده در این مرحله سطحی ناهموار و خشن است.

۴. در مرحله آخر با جدا شدن قطعه و فاصله گرفتن آن از ورق به علت جریان مومسان، در لبه‌های برش خورده پلیسه تشکیل می‌شود [۱۱].

در شکل ۹-۱ مناطق مختلف برش و قطعه برش خورده نشان داده شده است. مناطق مختلف برش که طی نفوذ سنبه به داخل ورق و انجام مراحل برش، به وجود می‌آیند مطابق با شکل ۹-۱، عبارت‌اند از: ناحیه شعاع لبه (ناحیه تغییر شکل مومسان)، ناحیه برش، سطح شکست (پارگی)، پلیسه و زاویه گسیختگی (α).



شکل ۹-۱- قسمت‌های مختلف قطعه برش خورده در فرایند برش [۱۲]

همان‌طور که در شکل فوق مشخص است زاویه گسیختگی، ناحیه تغییر شکل مومسان، سطح شکست و پلیسه جزء عیوب قطعه محسوب می‌شوند و در طراحی فرایند هدف کمینه کردن آنها و بیشینه کردن

سطح برش است. ناحیه برشی منطقه‌ای است که در آن برش خالص صورت می‌گیرد و از نظر دقت ابعادی و کیفیت سطح در بهترین وضعیت قرار دارد. بنابراین هر چه ارتفاع این منطقه بیشتر باشد، برش بهتری انجام شده است. همچنین با دقت در شکل ۱-۹ مشاهده می‌شود، در قسمت بالای ناحیه شعاع لبه در پولک تولید شده فشار بین مواد پولک و دیواره قالب باعث ایجاد سطحی صاف می‌شود و ابعاد پولک در این منطقه با ابعاد ماتریس برابر است. همین شرایط برای سوراخ ایجاد شده در ورق برقرار است با این تفاوت که ابعاد منطقه مورد نظر با ابعاد سنبه برابر است، به همین دلیل در پولک‌زنی لقی به سنبه و در سوراخ‌زنی لقی به ماتریس داده می‌شود [۱۳].

کیفیت قطعه‌ی تولیدی در فرایند برش به عوامل مختلف از جمله خواص ماده و پارامترهای فرایند مانند لقی بین سنبه و ماتریس، نیروی نگهدارنده ورق و تیزی لبه سنبه و ماتریس بستگی دارد [۱۴]. تأثیر پارامترهای مختلف بر کیفیت قطعه تولیدشده به وسیله تعدادی از پژوهش‌گران مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵-۱۷]. در زمینه‌ی شبیه‌سازی عددی و مدل‌سازی ریاضی فرایند برش ورق‌های فلزی نیز مطالعات زیادی صورت گرفته است [۱۸-۲۱]. تعدادی از پژوهش‌گران نیز مطالعات خود را در زمینه‌ی بهینه‌سازی فرایند پولک‌زنی متمرکز کرده‌اند [۲۲-۲۵]. در بین پارامترهای مختلفی که بر کیفیت قطعه کار تأثیر می‌گذارند، میزان لقی بین سنبه و ماتریس، فرسایش ابزار و ضخامت ورق مهم‌ترین عوامل در تعیین شکل و کیفیت نهایی قطعه هستند [۱۶].

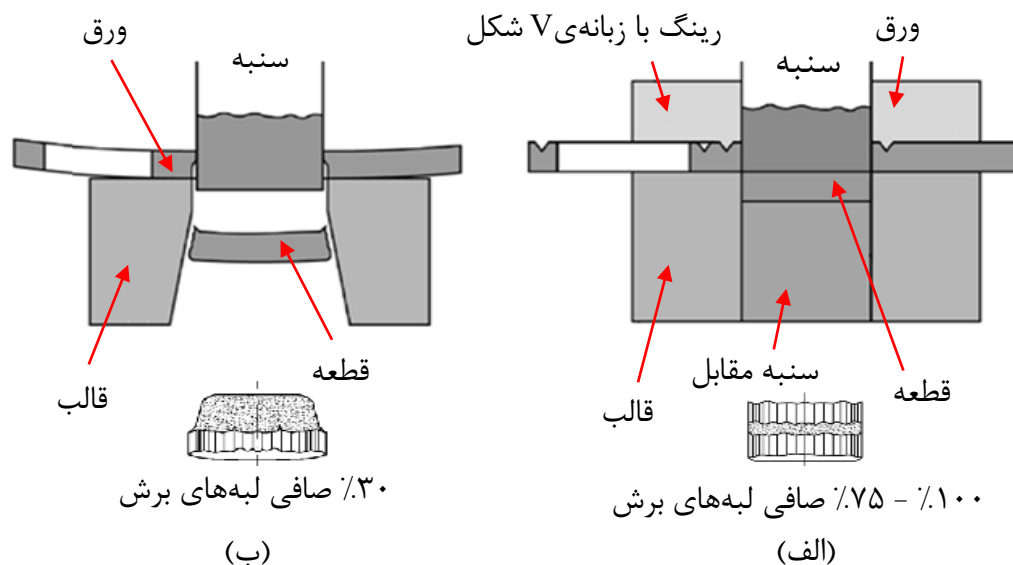
۱-۵-۱-۲ عمق نفوذ^۱

در فرایند برش عمق نفوذ عبارت است از عمقی که لازم است تا با نفوذ سنبه در داخل ورق برش ایجادشده و در آستانه ایجاد ترک و شکست قرار گیرد. این عمق به صورت درصدی از ضخامت ورق بیان می‌شود و با مجموع ناحیه شعاع لبه و ناحیه برش برابر است. عمق نفوذ به میزان لقی و جنس ورق بستگی دارد. میزان عمق نفوذ در آلیاژهای آلومینیوم برابر ۶۰ درصد ضخامت ورق است [۱۳].

^۱ Penetration depth

۱-۴-۲ برش دقیق^۱

بهبود کیفیت قطعات تولیدی به خصوص در لبه‌های برشی در هر دو فرایند برش و سوراخ‌زنی همواره مورد توجه بوده است که استفاده از روش برش دقیق یکی از دستاوردهای پژوهش‌ها در این زمینه بوده است. در شکل ۱-۱۰ مقایسه فرایند برش کاری به دو روش معمولی و دقیق نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱۰-۱ مقایسه فرایند برش کاری به دو روش، (الف) برش دقیق، (ب) برش معمولی [۲۶]

تفاوت برش دقیق با برش معمولی در این است که در برش دقیق از یک رینگ با زبانه‌ی V شکل و نیروی سنبه مقابل^۲ استفاده می‌شود. همچنین برخلاف پرس‌های مورد استفاده در برش معمولی که تک حرکت^۳ بودند؛ در برش دقیق سه حرکت و با دقت بالا بوده و ترتیب عملیات نیز کمی متفاوت است. فرایند برش دقیق تابع جنس قطعه کار، شکل و جنس ابزار، روانکاری و نوع پرس بوده و به هنگام نیاز به دقت و تکرارپذیری بالای قطعه به کار می‌رود. در قطعات تولیدشده در قالب‌های برش دقیق پلیسه‌ای وجود نداشته و لبه‌های قطعه تولیدی کاملاً صاف و تمیز است. مشخصه‌های ویژه فرایند برش دقیق نسبت به فرایند برش معمولی، لقی اندک بین اجزاء، اعمال فشار زیاد بر روی ورق توسط ورق گیر و

^۱ Fine Blanking

^۲ Counterpunch (CP)

^۳ Single action

وجود سنبه مقابل است. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که ترک در جهت ضخامت ورق و در یک مسیر نسبتاً صاف گسترش یابد. بنابراین، سطح برش همواره تمام ضخامت ماده را در بر گرفته و دقت ابعادی بالایی حاصل می‌شود [۲۷]. در قالب‌های برش دقیق معمولاً سنبه در حفره‌ی ماتریس (قالب) وارد نمی‌شود و فقط تا سطح ماتریس در ورق فرو می‌رود. به دلیل محدود بودن مواد در ناحیه برش و وجود فشار هیدرواستاتیک، محققان این فرایند را به عملیات اکستروژن سرد تشبیه کرده‌اند که قطعه‌کار در این قسمت تحت شرایط تنشی و کرنشی پیچیده‌ای قرار می‌گیرد [۱۳].

۱-۴-۳ نیروی برش و ظرفیت پرس

به منظور نفوذ سنبه به داخل ماده و ایجاد جدایش و تولید قطعه، مقاومت برشی ماده و نیروی لازم پرس تعیین می‌شود. نیروی محاسبه شده در فرایند برش در صورتی دقیق خواهد بود که مواد ورق همگن بوده و مقاومت برشی ثابتی در حجم ورق داشته باشد. همچنین لبه‌های برشی قالب باید تیز بوده و لقی و شرایط برش نیز مطلوب باشد. در این صورت نیروی برشی از رابطه ۱-۱ محاسبه می‌شود:

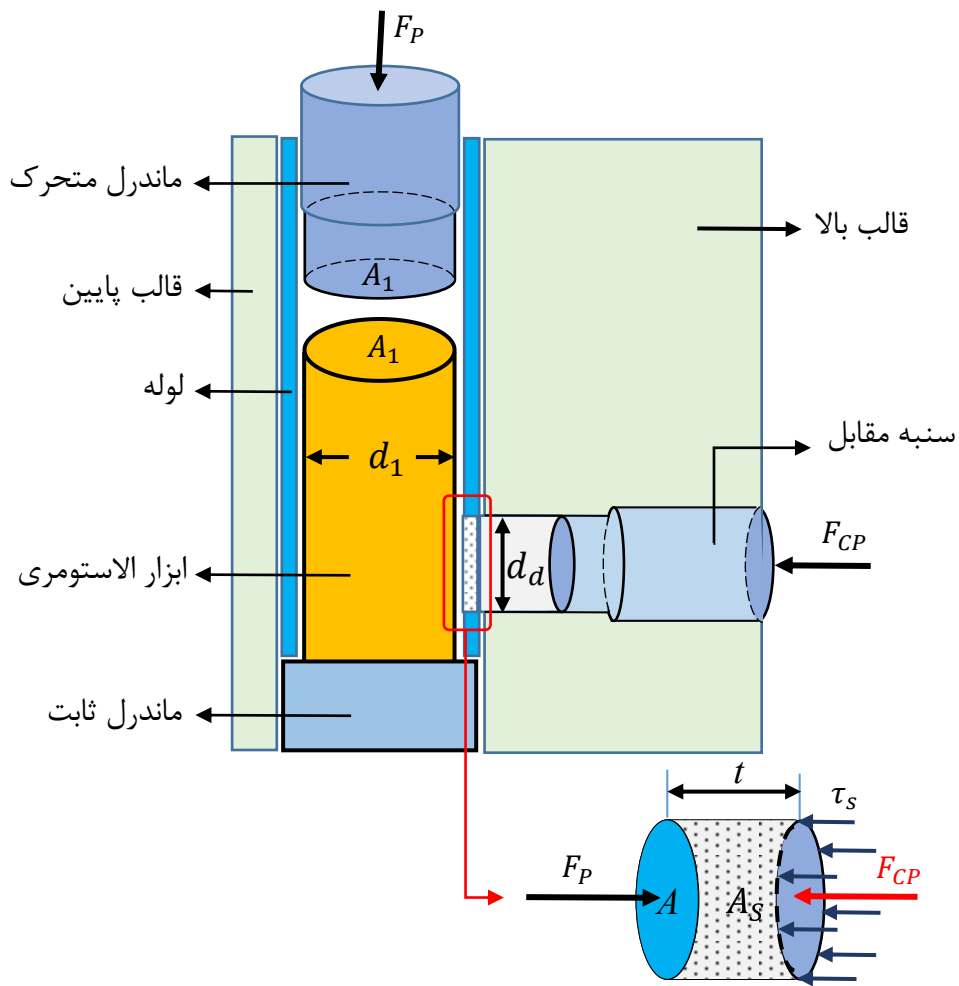
$$F_s = l_c t R_m f_1 \quad 1-1$$

که در این رابطه F_s نیروی برش (N)، l_c طول برش (mm)، t ضخامت ماده (mm)، R_m حداکثر استحکام برشی ماده (MPa) و $f_1 = 0.9$ ضریب تجربی است. برای یک سوراخ دایره‌ای به قطر d طول برش مطابق با رابطه ۱-۲ برابر است با [۲۸]:

$$l_c = \pi d \quad 2-1$$

۱-۴-۴ محاسبه نیروی سنبه مقابل در فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری

در فرایند سوراخ‌کاری لوله، فشار وارد شده از طریق ماندل متحرک (P) باعث ایجاد تنش فشاری تقریباً یکنواخت در ابزار الاستومری و دیواره لوله می‌شود که تنش ایجاد شده موجب برش لوله در قسمت سوراخ واقع در قالب می‌شود. در این شرایط نیروی وارد شده از طرف سنبه مقابل و استحکام برشی لوله در مقابل برش لوله مقاومت می‌کنند. بنابراین با توجه به تعادل نیروها در شکل ۱-۱۱ می‌توان نوشت:



شکل ۱-۱-۱- طرحواره نیروهای فرایند سوراخ کاری لوله

$$F_s = F_P - F_{CP} \quad ۳-۱$$

بنابراین،

$$F_{CP} = PA - \tau_s A_s \quad ۴-۱$$

که در آن

$$P = \frac{F_P}{A_1} = \frac{4F_P}{\pi d_1^2}, A = \frac{\pi d_d^2}{4}, A_s = \pi d_d t \quad ۵-۱$$

با جایگذاری روابط ۵-۱ در رابطه ۴-۱، نیروی سنبه مقابل در فرایند سوراخ کاری لوله از رابطه ۶-۱ به دست می‌آید:

$$F_{Cp} = F_p \left(\frac{d_d}{d_1} \right)^2 - \pi d_d t \tau_s \quad ۶-۱$$

در روابط فوق، F_s نیروی برش، F_{Cp} نیروی سنبه مقابل، A_1 مساحت سطح مقطع ماندل متحرک و ابزار الاستومری به قطر d_1 ، A مساحت تصویر شده دیواره لوله مقابل سوراخ قالب به قطر d_d ، t ضخامت لوله، A_s مساحت سطح برش ایجاد شده در راستای ضخامت لوله و τ_s استحکام برشی ماده لوله است.

۱-۵- پیشینه تحقیق

۱-۵-۱ انبساط‌دهی لوله به کمک ابزار الاستومری

یکی از نخستین تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی انبساط‌دهی لوله‌های فلزی از جنس فولاد ضدزنگ، برنج و آلومینیوم به کمک ابزار الاستومری از جنس پلی‌اورتان، تحقیق ارائه‌شده توسط القرشی است که در آن اثر پارامترهای مختلف مانند جنس، ضخامت و طول لوله و نیز هندسه ابزار و روانکار بر توزیع کرنش محصول مورد بررسی قرار گرفته است [۲۹]. تیرووارودچلوان و تراویس ضمن بیان مزایای شکل‌دهی با ابزار الاستومری نسبت به فرایند هیدروفرمینگ، آزمایش تجربی خود را بر روی لوله مسی آنیل شده با سه طول مختلف میله پلی‌اورتان و سه نوع سختی متفاوت و نیز سه شرط اصطکاکی مختلف انجام داده و روابطی برای شروع گلویی و کمانش به دست آوردند [۳۰]. تیرووارودچلوان با استفاده از خواص اصطکاکی تعیین‌شده پلی‌اورتان تحت فشار به روش تجربی، شرایط اولیه تسلیم در فرایند بالچ لوله توسط میله پلی‌اورتان را مورد تحلیل قرار داد. تحلیل‌های وی یک سطح مقطع خنثی را درجایی که اصطکاک پلی‌اورتان تغییر جهت می‌دهد، پیش‌بینی می‌کرد. اثر قطر لوله، طول میله پلی‌اورتان، فشار اعمالی و خواص ماده بر روی مکان ناحیه خنثی و اثر پارامترهای مختلف فرایند بر روی محدوده‌ی نسبت‌های تنش که در شروع تسلیم لوله وجود دارند مورد مطالعه قرار گرفتند [۳۱]. غفوریان و گردویی اثر اصطکاک در فرایند انبساط‌دهی آزاد لوله فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴ را با استفاده از ابزار الاستومری از جنس پلی‌اورتان با سختی Shore-A ۸۵ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که در انبساط‌دهی لوله با بالشتک لاستیکی در شرایط کاملاً خشک، با توجه به اصطکاک بالا بین بالشتک و لوله و در نتیجه جابه‌جایی ناخواسته لوله در راستای حرکت بالشتک با ایجاد نیروی فشاری در جهت طولی، چین‌خوردگی کنترل نشده در محصول اجتناب‌ناپذیر است، درحالی‌که استفاده از سیستم روانکاری مناسب بین سطح داخلی لوله و بالشتک اثر چشم‌گیری در کنترل چروکیدگی لوله، عمق بالچ، کاهش نیروی شکل‌دهی و انرژی تلف‌شده‌ی اصطکاکی فرایند خواهد داشت [۳۲]. غفوریان و همکاران به‌صورت تجربی و عددی شکل‌پذیری در فرایند انبساط‌دهی لوله با دو روش هیدروفرمینگ و ابزار

الاستومری را مورد مقایسه قرار دادند و دریافتند که انبساطدهی با ابزار الاستومری نسبت به فرایند هیدروفرمینگ سبب افزایش کرنش حدی، عمق انبساطدهی و میزان کروی بودن ناحیه تغییر شکل یافته به ترتیب برابر با ۶۶٪، ۱۲٪ و ۶۳٪ می‌شود [۳۳]. این نویسندگان و همکارانش در تحقیقی دیگر اثر هفت عامل در فرایند انبساطدهی متقارن آزاد لوله شامل اصطکاک بین لوله و قالب، اصطکاک بین لوله و لاستیک، ارتفاع لاستیک، میزان پیشروی سنبه، شعاع گوشه قالب، تغذیه محوری لوله، و طول ناحیه تغییر شکل بر ضخامت متوسط و متوسط ارتفاع انبساطدهی لوله فولادی زنگ نزن ۳۰۴ با شبیه‌سازی به روش اجزای محدود را مورد بررسی قرار دادند و با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش با روش عاملی کامل و پیش‌بینی مدل رگرسیونی بر اساس متغیرهای شکل‌دهی، مقدار بهینه عوامل مؤثر در فرایند را تعیین نمودند و به این نتیجه رسیدند که اصطکاک بین لوله و لاستیک، ارتفاع لاستیک، میزان پیشروی سنبه و تغذیه محوری لوله نسبت به سایر عوامل تأثیر بیشتری بر روی فرایند دارند [۳۴]. اکبریان‌کوه‌خیلی و همکاران به بررسی و بهینه‌سازی متغیرهای فرایند شکل‌دهی اتصالات لوله با استفاده از ابزار الاستومری پرداختند [۳۵].

۱-۵-۲ سوراخ‌کاری ورق به کمک ابزار الاستومری

هرتز و گاربر در مطالعات خود نشان دادند که با استفاده از بالشتک کشسان در عملیات سوراخ‌کاری، بار شکست مورد نیاز به نوع لاستیک مورد استفاده بستگی دارد. آنها همچنین بیان کردند که معیار شکست مستقل از نوع لاستیک به کار رفته، برای مواد داده شده و شکل قالب است [۳۶]. القرشی و همکارانش، عملیات سوراخ‌کاری با استفاده از بالشتک کشسان را به‌طور تجربی تجزیه و تحلیل نمودند و دریافتند که حرکت رم توسط تعدادی از متغیرها مثل ضخامت ورق، سختی لاستیک، سرعت رم، شرایط کارسختی ماده و هندسه ابزار تحت تأثیر قرار گرفته است [۱]. القرشی، یک روش تحلیلی تئوری برای بررسی تأثیر کورس رم (حرکت رم) در عملیات سوراخ‌کاری با استفاده از بالشتک کشسان ارائه نمود و انطباق خوبی بین روش تئوری و تجربی به دست آورد اما این تحلیل محدود به مس آنیل شده بود [۳۷]. سوراخ‌کاری ورق‌های فلزی با استفاده از ابزار لاستیکی توسط واتاری و همکارانش به‌طور تجربی

انجام شد و اثرات سختی، ضخامت و شرایط تماس بین سه نوع ورق فلزی و ورق پلی‌اورتان مورد بررسی قرار گرفت. مکانیزم سوراخ‌کاری با استفاده از پلی‌اورتان به‌عنوان سنبه مورد بررسی قرار گرفت و شرایط سوراخ‌کاری مناسبی برای ایجاد یک سوراخ دایره‌ای ساده ارائه شد. وی و همکارانش از چهار نوع سختی ۷۰، ۸۰، ۹۰ و shore-A ۹۵ و ضخامت‌های ۲، ۳، ۵ و ۶ mm برای سنبه پلی‌اورتانی استفاده کردند. شعاع سنبه مورد استفاده برای رسیدن به بهترین شرایط تماس بین قالب فلزی و ورق پلی‌اورتان با اندازه‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ mm تعیین شد. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که سختی مناسب پلی‌اورتان بین ۸۰ و shore-A ۹۰، ضخامت مناسب ورق پلی‌اورتان در حدود ۵-۳ mm، نسبت مطلوب بین شعاع سنبه فلزی و قطر سوراخ ورق در حدود ۰/۴۸-۰/۶۴ و نسبت بین قطر به ضخامت و استحکام کششی ورق فلزی مقدار ثابتی است [۱۰]. نساجیان مقدم و همکارانش سوراخ‌کاری ورق‌های فلزی با ابزار لاستیکی را جهت بررسی اثر سختی لاستیک و شعاع گوشه قالب بر روی فرایند سوراخ‌کاری ورق با سه نوع سختی لاستیک ۶۵، ۷۰ و shore-A ۸۵ بر روی یک نوع ورق آلومینیومی انجام دادند. نتیجه پژوهش آنها این بود که کمترین مقدار نیروی برش با سختی لاستیک Shore-A ۶۵ و شعاع گوشه قالب ۰/۵ mm به دست می‌آید. همچنین در سختی بالای لاستیک اثر شعاع قالب بر نیروی فرایند ناچیز است [۳۸].

۱-۵-۳ سوراخ‌کاری لوله به کمک سیال

در سال ۲۰۰۳ اصنافی و همکارانش، سوراخ‌کاری لوله با سیال را به‌صورت تئوری و تجربی پس از عملیات هیدروفرمینگ بررسی کردند. هدف اولیه آنها مطالعه و بررسی چگونگی استفاده از این روش و انتخاب ماده و پارامترهای مؤثر بر کیفیت سوراخ‌کاری بود. آنها سوراخ‌کاری روبه‌داخل، سوراخ‌کاری به روش تا کردن پلیسه به سمت داخل و سوراخ‌کاری روبه بیرون لوله را مورد آزمایش قرار دادند. جنس لوله مورد استفاده AA 6063-T₄ بود. قطر لوله و ضخامت آن نیز به ترتیب برابر ۱۰۷ mm و ۲/۵ mm بود. لوله‌ای به طول ۱۱۱۰ mm ابتدا در فشار ۱۳۰۰ bar هیدروفرمینگ شده و سپس به کمک سیال سوراخ‌کاری شد. آنها بیان کردند که بیشترین انحناء مورد قبول در لبه سوراخ ۰/۲ mm در سوراخ‌کاری

رو به داخل در فشار بالاتر از ۱۳۰۰ bar با بهترین کیفیت سوراخ خواهد بود، گرچه باقی ماندن پلیسه در لوله باعث بروز مشکلاتی می‌شود که باید حل شوند. نتایج حاصل از بررسی آنها نشان داد که مقدار انحناء لبه در لبه‌های سوراخ‌ها با افزایش فشار سوراخ‌کاری رو به داخل کاهش و برآمدگی ایجاد شده در لبه سوراخ‌ها با افزایش فشار سوراخ‌کاری در سوراخ‌کاری رو به بیرون تا حدود ۱۲۰۰ bar افزایش می‌یابد و قطر سوراخ ایجاد شده در سوراخ‌کاری رو به بیرون در تمام حالات کوچک‌تر از قطر موردنظر (mm ۳۰/۲) است [۸]. در سال ۲۰۰۴، موون و همکارانش، تغییر شکل ناحیه مجاور سوراخ ایجادشده به کمک سوراخ‌کاری با سیال در یک لوله را مورد تحلیل قرار دادند. آنها اثر خواص مواد لوله، قطر سنبه، ضخامت دیواره لوله و فشار داخلی لوله را در طول فرایند سوراخ‌کاری بر روی رفتار تغییر شکل به هر دو روش تجربی و ریاضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی رابطه‌ی مشخصی بین شعاع تغییر شکل و شعاع لبه به وسیله تغییر شکل فراهم نمود. استفاده از این رابطه در مدل‌سازی ریاضی، پیش‌بینی و کنترل شکل ناحیه‌ی تغییر شکل مجاور سوراخ را به‌عنوان تابعی از ضخامت دیواره لوله، استحکام ماده لوله، قطر سنبه و فشار داخلی لوله فراهم می‌سازد. نتایج تحلیل‌های آنها نشان داد که با افزایش فشار داخلی و کاهش استحکام ماده، شعاع لبه و شعاع تغییر شکل کاهش می‌یابد. آنها یک مدل ریاضی مبتنی بر تعادل نیرو که بتواند عمق ناحیه‌ی بالآمده و شعاع تغییر شکل را پس از سوراخ‌کاری با سیال به‌صورت تابعی از ضخامت لوله، استحکام برشی ماده، قطر سنبه و فشار داخلی لوله پیش‌بینی نماید به دست آوردند. و در ادامه بیان کردند که با تغییر فشار داخلی لوله برای یک مجموعه از خواص لوله (مثل ضخامت، استحکام برشی) کنترل درجه تغییر شکل در طول فرایند سوراخ‌کاری با سیال امکان‌پذیر است [۳۹]. در سال ۲۰۱۰، وانگ و همکارانش، شبیه‌سازی عددی فرایند سوراخ‌کاری با سیال یک نوع لوله را با کد MARC به منظور بررسی مکانیسم سوراخ‌کاری با سیال مورد بررسی قرار دادند. آنها مدل المان محدود سه‌بعدی را در هر دو نوع عملیات رو به داخل و رو به بیرون پایه‌ریزی کردند. بر اساس نتایج محاسبات و تغییرات تنش و تغییر شکل، یک ناحیه تغییر شکل مومسان در مجاورت لبه سوراخ مشاهده کردند که تا حدود زیادی با فرایند سوراخ‌کاری ورق فلزی به روش معمولی متفاوت بود. آنها همچنین

اثر فشار داخلی بر کیفیت سوراخ‌کاری را نیز مورد بررسی قرار دادند [۴۰]. در سال ۲۰۱۰، لی و همکارانش، شبیه‌سازی شکست نرم فرایند سوراخ‌کاری با سیال را بر پایه معیارهای مختلف در مدل‌سازی سه بعدی بررسی کردند. به‌منظور شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری با سیال به‌طور دقیق، یک مدل سه بعدی با در نظر گرفتن اثر فرایند هیدروفرمینگ در مطالعات آنها توسعه داده شد. شش معیار شکست نرم برای پیش‌بینی شروع و انتشار ترک با استفاده از زیر روال VUMAT از آباکوس^۱ اجرا شد. مقایسه میان نتایج به‌دست‌آمده توسط شبیه‌سازی با استفاده از معیارهای نرم مختلف و آزمایش‌ها نشان داد معیار رایس و تریسی مطابقت خوبی با این آزمایش‌ها دارد. علاوه بر این، خطاهای شبیه‌سازی با استفاده از معیار رایس و تریسی در فشارهای بارگذاری مختلف و نوع سوراخ‌کاری با سیال به اندازه کافی در مقایسه با آزمایش کوچک‌اند به‌طوری‌که این معیار می‌تواند برای شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری با سیال استفاده شود. درنهایت، مکانیزم تغییر شکل فرایند سوراخ‌کاری با سیال را بر اساس شبیه‌سازی با معیار رایس و تریسی مورد بحث قرار دادند [۴۱]. در سال ۲۰۱۱، گانگ و همکارانش، تأثیر خواص لوله را بر کیفیت سوراخ‌کاری با سیال مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که تأثیر مواد مختلف بر روی خرابی یکسان نیست و هر چه استحکام تسلیم ماده بالاتر باشد میزان نفوذ سنبه هیدرولیکی بیشتر است. اثر مواد مختلف بر روی کیفیت شکستگی نیز متفاوت است. هر چه استحکام تسلیم ماده بالاتر باشد، کیفیت شکستگی بهتر است و هنگامی که ماده نرم‌تر باشد، پدیده پارگی بیشتر آشکار می‌شود [۴۲]. در سال ۲۰۱۲، حسن‌نژاداصل و همکارانش، مدل‌سازی عددی سوراخ‌کاری با سیال چندمرحله‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در این مطالعه، شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی هیدروفرمینگ، سوراخ‌کاری با سیال و اکستروژن دیواره یک لوله فولادی DP600 را با استفاده از معیارهای خرابی مختلف انجام دادند. ثابت کرنش مومسان معادل با و بدون مقادیر تنش برشی سه محوره (به ترتیب CEPS+CEPS و CEPS) و معیار آسیب جانسون-کوک^۲ (JC) به‌عنوان مدل آسیب پدیدارشناختی در نظر

^۱ ABAQUS^۲ Johnson-Cook (JC)

گرفته شد. به منظور کالیبراسیون پارامترها در هر مدل، آزمون‌های سوراخ‌کاری لوله انجام شد و منحنی نیروی سنبه در مقابل جابه‌جایی تعیین شد. سپس پارامترهای آسیب را کالیبره نموده و در شبیه‌سازی سوراخ‌کاری با سیال چند مرحله‌ای و فرایند اکستروژن دیواره لوله مورد استفاده قرار دادند و دقت هر معیار آسیب را در ترم‌های پیش‌بینی تغییر شکل و رفتار آسیب مورد ارزیابی قرار دادند. جهت تجمع خرابی در امتداد سوراخ‌کاری با سیال، شعاع لبه و طول لوله اکستروژن شده پارامترهای اصلی در ارزیابی هر معیار آسیب بود. در بررسی آنها معیار JC و CEPS+C بهترین مطابقت را با مشاهدات تجربی نشان دادند [۷]. در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۳ حسن‌نژاد اصل و گرین، مدل‌سازی عددی سوراخ‌کاری لوله با سیال را با استفاده از معیارهای آسیب پدیدارشناختی و میکرومکانیکی انجام دادند. آنها در این مطالعه شبیه‌سازی المان محدود فرایند سوراخ‌کاری با سیال لوله‌ی فولادی دوفازی DP600 را در نرم‌افزار ال‌اس‌داینا^۱ با استفاده از معیارهای آسیب پدیده‌شناختی، میکرومکانیکی و معیارهای آسیب ترکیبی انجام دادند. معیار آسیب در تجزیه و تحلیل عددی شامل اعمال ثابت کرنش مومسان معادل (CEPS)، مدل گرسون-تورگارد-نیدلمن^۲ که به GTN معروف است و مدل توسعه‌یافته GTN (GTN+JC) بود. آنها به منظور کالیبراسیون پارامترها در هر مدل، یک قید خاص سوراخ‌کاری طراحی کردند و سوراخ‌کاری بر روی نمونه لوله غیر تحت فشار انجام شد. از بین معیارهای مختلف شکست نرم، نتایج با مدل (GTN+JC) مانند بار سنبه-جابه‌جایی، عمق بال‌آمده و کیفیت ناحیه لقی بهترین ارتباط با داده‌های تجربی پیش‌بینی شد [۴۳].

در زمینه‌ی سوراخ‌کاری لوله‌های فلزی با ابزار الاستومری تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی به صورت تئوری و تجربی در داخل یا خارج از کشور مشاهده نشده است.

^۱ LS- DYNA

^۲ Gurson - T-Vergaard - Needleman

۱-۶- اهداف و ویژگی‌های پایان‌نامه

در پژوهش حاضر به منظور سوراخ‌کاری لوله از ابزار الاستومری به عنوان یک نیمه قالب استفاده شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش عددی و با شبیه‌سازی فرایند به کمک نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی فرایند صورت گرفت. برای در نظر گرفتن رفتار ابزار الاستومری از مدل مونی-ریولین^۱ و برای لوله آلومینیومی از مدل کشسان-مومسان بهره گرفته شد. در ادامه اثر پارامترهایی نظیر سختی ابزار الاستومری و ضخامت لوله بر روی کیفیت برش مورد بررسی قرار گرفت. برای پیش‌بینی شکست در لوله از معیار پلاستیسیته مواد متخلخل^۲ و معیار شکست گرسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) استفاده شد. در بخش تجربی، تهیه مواد مناسب مورد نیاز و آزمون‌های اولیه خواص مکانیکی بر روی ابزار الاستومری و لوله انجام شد. این آزمون‌ها شامل؛ آزمون فشار ابزار الاستومری جهت تعیین ضرایب مونی-ریولین بر طبق استاندارد ASTM D۵۷۵-۹۱ و آزمون کشش لوله بر طبق استاندارد ASTM A۳۷۰ می‌باشد. اجرای فرایند تجربی در شرایط به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با هدف صحت سنجی نتایج تحلیلی انجام شد. از برجسته‌ترین نوآوری‌های این پایان‌نامه به انجام رسیدن فرایند سوراخ‌کاری لوله فلزی به کمک ابزار الاستومری است که برای اولین بار ارائه شده است.

۱-۷- ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، ابتدا مطالعه‌ای در مورد فرایندهای شکل‌دهی با ابزار انعطاف‌پذیر، مزایا و معایب استفاده از ابزارهای الاستومری، سوراخ‌کاری با سیال و نیز برش‌کاری به وسیله سنبه و ماتریس به دو روش معمولی و دقیق انجام شد. در ادامه نیز مطالعه‌ای پیرامون پژوهش‌های انجام شده توسط سایر پژوهش‌گران در زمینه‌ی سوراخ‌کاری ورق و لوله به کمک سیال و سوراخ‌کاری ورق به کمک ابزار الاستومری صورت گرفت. در فصل دوم آزمون‌های تجربی انجام شده، تجهیزات آزمایشگاهی مورد

^۱ Mooney-Rivlin

^۲ Porous metal plasticity

استفاده در انجام آزمون‌ها، نحوه به دست آوردن خواص مکانیکی لوله و ابزار الاستومری و نحوه انجام آزمون‌ها ذکر می‌شود. در فصل سوم پس از بیان مقدمه‌ای کوتاه بر روش المان محدود و معرفی نرم‌افزار آباکوس، توصیفی از مکانیک آسیب و مبانی شکست نرم و مدل شکست نرم گرسون-تورگارد-نیدلمن ذکر می‌شود و به کمک شبیه‌سازی‌های لازم توسط نرم‌افزار، پارامترهای این مدل شکست استخراج شده و در شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فصل چهارم نتایج به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در فصل پنجم، نتیجه‌گیری‌های پایان‌نامه و چند پیشنهاد جهت ادامه این تحقیق ارائه خواهد شد.

فصل ۲ طراحی و اجرای آزمون‌های تجربی

در این فصل ابتدا آزمون‌های تجربی انجام شده شامل آزمون کشش جهت تعیین خواص مکانیکی لوله و آزمون فشار ابزار الاستومری جهت تعیین ضرایب ابزار الاستومری مورد استفاده شرح داده می‌شود. در ادامه وسایل و تجهیزات مورد استفاده شامل قالب برش، پرس هیدرولیکی و دستگاه آزمون کشش و نیز نحوه عملکرد آنها بیان می‌شود. در انتهای فصل شرایط آزمون‌های تجربی سوراخ کاری لوله آلومینیومی بیان شده است.

۲-۱- معرفی جنس، ابعاد و خواص لوله و ابزار الاستومری

ماده مورد استفاده در این پژوهش لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ است. آلیاژهای آلومینیوم سری ۶۰۶۱ به صورت ورق، لوله بدون درز، پروفیل، میله و لوله اکستروژنه شده، در صنایع خودروسازی، دوچرخه‌سازی، ساخت بدنه قایق‌های کوچک، کامیون‌ها، لوازم منزل، دکل‌ها، دیگ‌های بخار، بدنه فضاپیماها، روتور بالگردها، خطوط لوله (سیستم‌های هیدرولیک برای روغن و گاز و کندانسورها)، کپسول‌های هوای غواصی و مواردی که سازه‌های با استحکام بالا و وزن سبک نیاز است، کاربرد فراوانی دارد. دو عنصر منیزیم و سیلیکون، عناصر اصلی تشکیل‌دهنده‌ی این آلیاژ می‌باشند. منیزیم در آلومینیوم، وظیفه‌ی

افزایش استحکام را به عهده دارد و سیلیکون باعث کاهش نقطه‌ی ذوب آلومینیوم می‌شود. استفاده از این عناصر به صورت مجزا در ترکیب آلیاژ، آلومینیومی بدون قابلیت عملیات حرارتی را می‌دهد؛ اما با آلیاژ کردن هم‌زمان این دو عنصر، آلومینیوم قابلیت عملیات حرارتی خوبی پیدا خواهد کرد. نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش از یک لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ بدون درز با قطر خارجی ۳۵ mm و ضخامت ۲ mm تهیه شدند. از آنجا که ضخامت‌های مورد نیاز جهت انجام آزمون سوراخ‌کاری ۱ mm، ۱/۴ mm و ۱/۸ mm بود، با انجام عملیات داخل‌تراشی لوله توسط دستگاه تراش نمونه‌هایی با ضخامت‌های ذکر شده تهیه شدند. ابزار الاستومری نیز از جنس پلی‌اورتان به شکل استوانه و با سختی‌های ۵۰ و Shore-A ۸۵ با قطرهای ۳۳ mm، ۳۲/۲ mm و ۳۱/۴ mm تهیه شد.

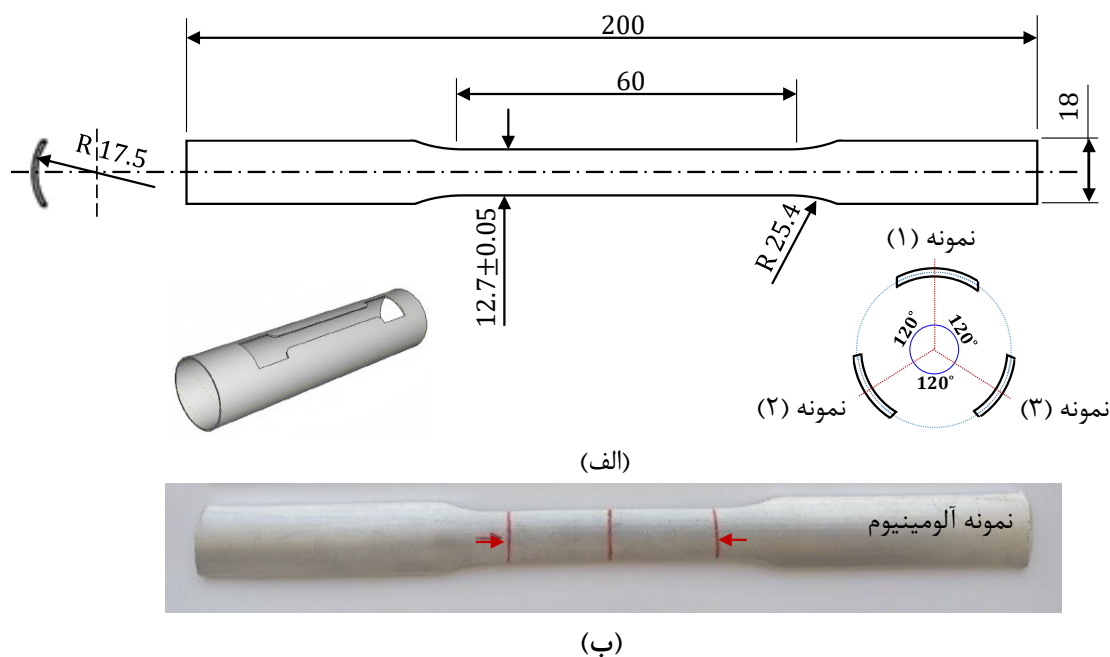
۲-۲- تعیین خواص مکانیکی لوله و ابزار الاستومری

به منظور تعیین خواص مکانیکی لوله مورد استفاده در این پژوهش آزمون کشش بر روی لوله و جهت تعیین ثابت‌های جنس ابزار الاستومری آزمون فشار بر روی ابزار الاستومری اجرا شد.

۲-۲-۱ آزمون کشش تک‌محوری لوله

آزمون کشش تک‌محوری ساده‌ترین و درعین حال مهم‌ترین بارگذاری مواد جهت تعیین خواص مکانیکی آنهاست که در آن نمونه آزمون تحت بار یکنواخت در امتداد محور مرکزی خود کشیده می‌شود. آزمون کشش مهندسی، کاربردهای مختلفی از جمله در تعیین تنش تسلیم، استحکام کششی نهایی ماده، کارسختی، چقرمگی و ناهمسانگردی ماده دارد. در این آزمون، نمونه تحت نیروی کششی یک‌بعدی که به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، قرار دارد و این در حالی است که ازدیاد طول نمونه نیز به‌طور هم‌زمان قابل مشاهده است. آزمون کشش بر روی نواری از لوله در جهت طولی که دارای یک ناحیه با کاهش سطح مقطع (قسمت گیج) است، انجام شد. ناحیه کاهش یافته سطح مقطع بدین منظور در نظر گرفته می‌شود که کل تغییر شکل مومسان در قسمت گیج اتفاق بیافتد و انتهای بدون کاهش مقطع توسط فک دستگاه مهار گردد [۴۴]. برای این منظور، سه نمونه کاملاً یکسان طبق استاندارد ASTM A370

از لوله آلومینیومی تهیه و آزمون کشش بر روی آنها انجام شد. علت اینکه از سه نمونه برای دستیابی به خواص مکانیک لوله استفاده شد این است که اگر به هر دلیل یکی از نمونه‌ها رفتار متفاوتی نشان دهد، خواص مکانیکی ماده از رفتار دو نمونه دیگر استخراج شود. نمونه‌های استاندارد آزمون کشش و مشخصات ابعادی آنها در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- الف) ابعاد نمونه آزمون کشش لوله بر اساس استاندارد ASTM A370 (ابعاد به mm) و موقعیت برش نمونه‌ها نسبت به مقطع لوله، ب) نمونه ماشین‌کاری شده و آماده جهت آزمون کشش

آزمون کشش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ که در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی شاهرود موجود است (شکل ۲-۲)، با نرخ کرنش $\dot{\epsilon} = 0.0005 \text{ s}^{-1}$ انجام شد. از جمله خروجی‌های این دستگاه منحنی‌های نیرو-تغییر طول، تنش-کرنش و نیرو-زمان می‌باشند.



شکل ۲-۲- دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ به همراه سیستم کنترل رایانه‌ای

۲-۳- آزمون فشار ابزار الاستومری و محاسبه ثابت‌های مونی-ریولین

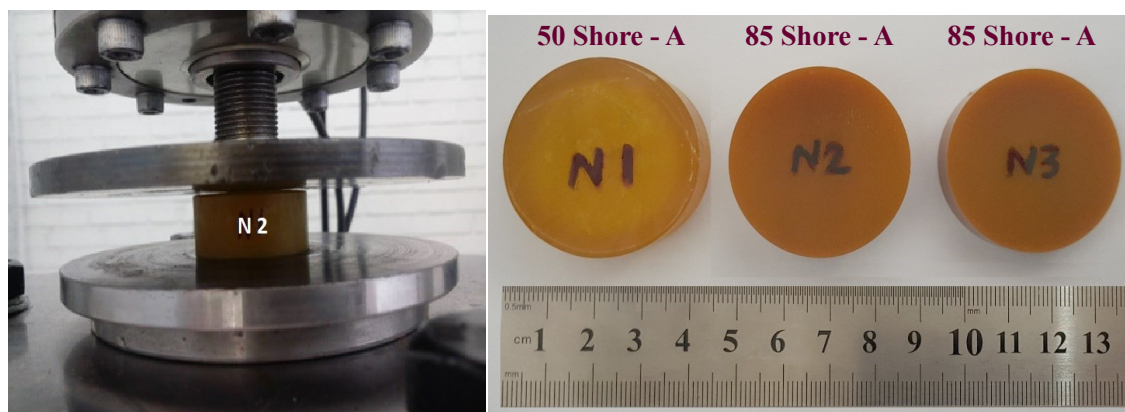
در این پژوهش جهت تعیین خواص پلی‌اورتان از مدل ریاضی مونی-ریولین استفاده شده است. به همین منظور ابتدا آزمون فشار تک‌محوری بر روی الاستومرهای مورد استفاده انجام شد. این آزمون نوعی از اندازه‌گیری سفتی فشاری^۱ ابزار الاستومری است که در آن نمونه تحت نیروی فشاری قرار گرفته و تغییر شکل ایجاد شده در آن به صورت کاهش ارتفاع نمایان می‌شود [۴۵].

برای تعیین منحنی تنش-کرنش فشاری پلی‌اورتان، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D۵۷۵-۹۱ تهیه شد که مشخصات آنها در جدول ۱-۲ مشاهده می‌شود. آزمون فشار ابزار الاستومری با نرخ کرنش ثابت $\dot{\epsilon} = 0.005 \text{ s}^{-1}$ و با استفاده از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ انجام شد. شکل ۲-۳ نمونه‌های تهیه شده را به همراه فک‌های فشاری دستگاه نشان می‌دهد.

^۱ Compression stiffness

جدول ۲-۱- مشخصات ابعادی نمونه‌های ابزار الاستومری در آزمون فشار

شماره نمونه	جنس	قطر d (mm)	ارتفاع h (mm)
N1	PU	۳۵	۱۴/۶
N2	PU	۲۸/۶	۱۲/۷
N3	PU	۲۸/۷	۱۲/۴



(ب)

(الف)

شکل ۲-۳- الف) نمونه‌های آزمون فشار ابزار الاستومری ، ب) نمونه N2 در بین فک‌های فشاری دستگاه

۲-۴- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های آزمون به دلیل آن‌که لوله اولیه دارای ضخامت ۲ mm بود و ضخامت‌های مورد آزمون ۱ mm، ۱/۴ mm و ۱/۸ mm بودند؛ نمونه‌ها توسط دستگاه تراش، به‌طور دقیق داخل‌تراشی شدند تا ابعاد موردنظر به دست آید. شکل ۲-۴ تعدادی از نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمون‌های تجربی را نشان می‌دهد.



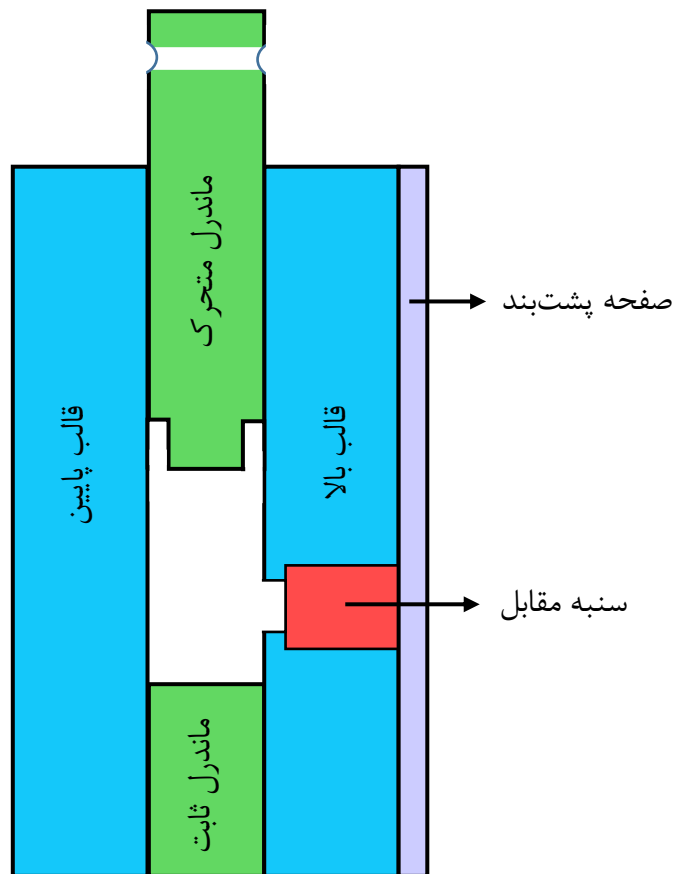
شکل ۲-۴- نمونه‌های آماده شده پس از داخل تراشی

۲-۵- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

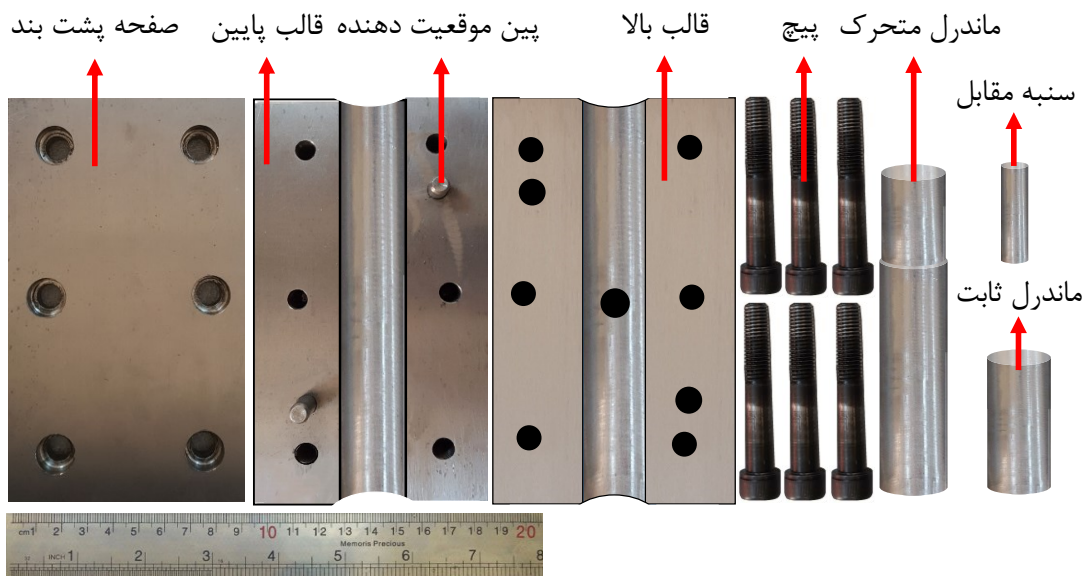
۲-۵-۱ قالب

به منظور اجرای آزمون‌های تجربی، قالب مناسب فرایند سوراخ کاری با ابزار الاستومری مطابق با ابعاد ارائه شده در پیوست دو و با استفاده از نرم افزار Solidworks طراحی شد. اجزای قالب طراحی شده از جنس VCN ۱۵۰ انتخاب و توسط دستگاه CNC ساخته شد و پس از انجام عملیات سخت کاری بر روی اجزای قالب جهت رعایت توازی، سطوح مورد نیاز تحت عملیات سنگ زنی قرار گرفتند. به منظور ایجاد سهولت و دقت در مونتاژ دو نیمه قالب، از دو عدد پین موقعیت دهنده در قالب استفاده شد. برای استقرار لوله بر روی ماندل ثابت قطر خارجی این قطعه از قالب با قطر خارجی لوله برابر در نظر گرفته شد. به منظور هدایت ماندل متحرک در داخل قالب پس از برخورد سطح پیشانی آن به ابزار الاستومری، این قطعه از قالب به صورت پله دار طراحی و ساخته شد. برای جلوگیری از برخورد قسمت پله دار ماندل متحرک به لوله ارتفاع پله طوری در نظر گرفته شد که در بیشترین جابجایی ماندل متحرک قسمت پله دار آن با لوله برخورد نداشته باشد و باعث چروکیدگی لوله نشود. فاصله پیشانی سنبه مقابل از دیواره بیرونی لوله در ناحیه سوراخ واقع در قالب طوری انتخاب شد که فضای کافی برای پلیسه پس از شکست کامل نمونه‌ها وجود داشته باشد. به منظور استحکام قالب و نیز توزیع یکنواخت تنش‌های اعمال شده بر سطح صفحه پشت‌بند هنگام اجرای فرایند، سطح مقطع این قطعه با سطح مقطع بیرونی قالب بالا

برابر در نظر گرفته شد. نکته قابل توجه در قالب سوراخ کاری مورد نظر آن است که لبه‌های برشی قالب در ناحیه سوراخ باید کاملاً تیز باشند. شکل ۲-۵-الف و ب به ترتیب طرح‌واره قالب سوراخ کاری و اجزای قالب طراحی شده جهت انجام آزمون سوراخ کاری در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. مشخصات دقیق جنس، سختی و اجزای تشکیل دهنده قالب نیز در پیوست سه ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲-۵- الف) طرح‌واره قالب سوراخ‌کاری، ب) اجزای قالب ساخته‌شده جهت انجام آزمون

۲-۵-۲ دستگاه پرس هیدرولیک

جهت تأمین نیروی سوراخ‌کاری لازم، از دستگاه پرس هیدرولیکی ژاو-آریا با ظرفیت ۱۰۰ تن که در آزمایشگاه موجود است، با چهار میله راهنما استفاده شد. این دستگاه پرس دارای یک واحد رایانه‌ای متصل به دستگاه است که وظیفه کنترل دستگاه در طول انجام آزمایش را به عهده دارد به‌طوری‌که امکان تنظیم سرعت حرکت رم و ثبت داده‌های مربوط به نیرو و جابه‌جایی پرس را در هر لحظه فراهم می‌سازد. حداکثر سرعت رم پرس مورد استفاده ۱ mm/s است. در شکل ۲-۶ تصویر دستگاه پرس به همراه سیستم کنترل رایانه‌ای و مجموعه قالب طراحی‌شده بر روی میز دستگاه پرس قابل مشاهده است.

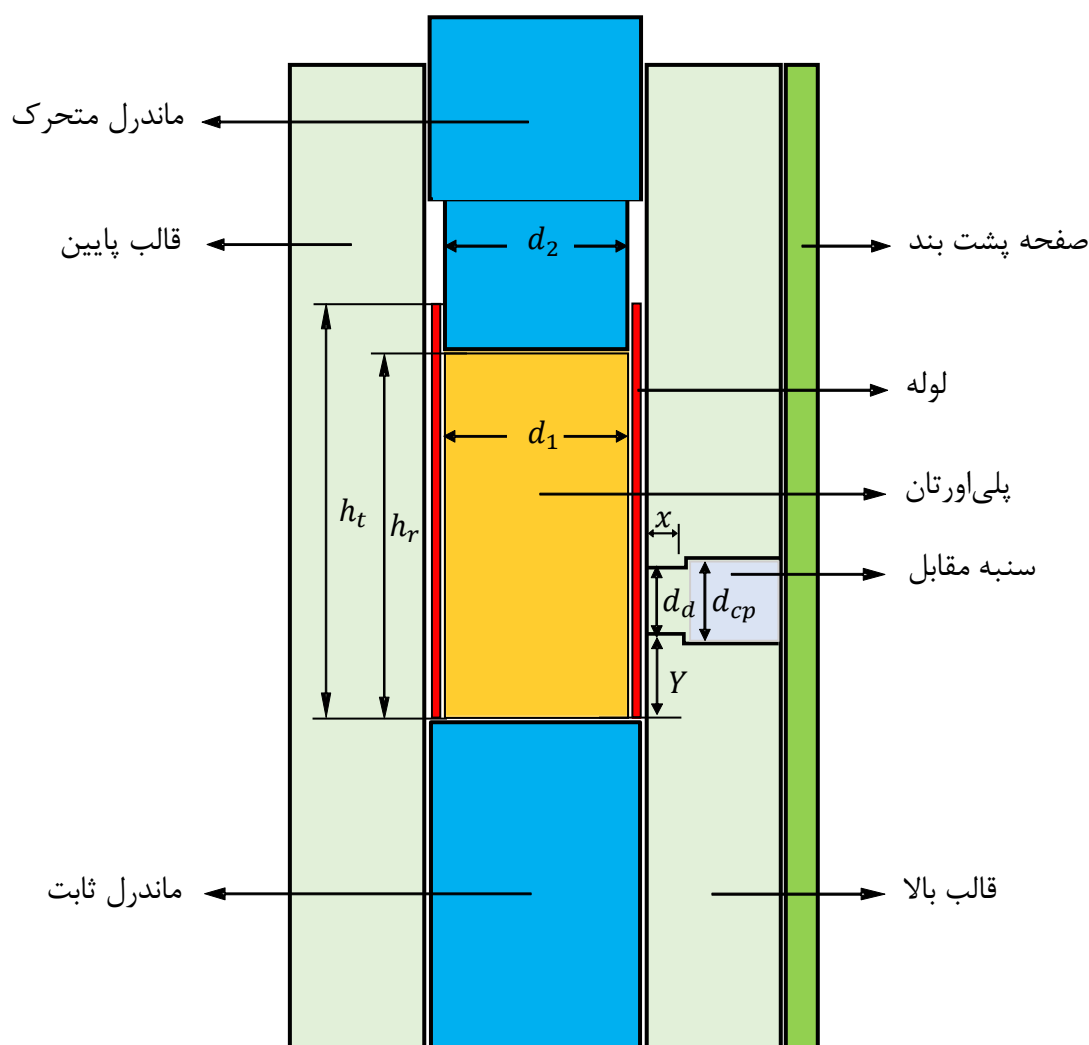


شکل ۲-۶- دستگاه پرس هیدرولیکی ۱۰۰ تن ژاو-آریا به همراه واحد رایانه‌ای متصل به آن و مجموعه قالب نصب‌شده بر روی میز دستگاه

۲-۶- اجرای آزمون‌های تجربی

به‌منظور اجرای فرایند سوراخ‌کاری بر روی لوله، ابتدا ابزار الاستومری در داخل لوله جایگذاری شده و لوله در داخل قالب قرار می‌گیرد. سپس این مجموعه بر روی ماندل ثابتی که در یک طرف قالب قرار گرفته است واقع می‌شود. با قرار دادن نیمه دیگر قالب و موقعیت‌دهی مناسب آن توسط پین‌های

موقعیت‌دهنده، دونیمه قالب توسط شش عدد پیچ آلن از طریق صفحه پشت‌بند محکم بسته می‌شوند. در ادامه، انتهای ماندل متحرک بر روی ابزار الاستومری واقع در داخل لوله قرار گرفته و سپس قالب بر روی میز دستگاه پرس قرار می‌گیرد. توجه به این نکته مهم است که قالب باید در مرکز دو جک واقع شود. با اعمال فشار از طریق رم پرس بر روی ماندل متحرک، این عضو قالب با فشردن سازی ابزار الاستومری باعث ایجاد نیروی شعاعی جهت انجام عملیات سوراخ‌کاری در لوله می‌شود که به دلیل مقاومت کم لوله در ناحیه حفره موجود در قالب بالا، عملیات سوراخ‌کاری به انجام می‌رسد. شکل ۲-۷ طرح‌واره فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۷- طرح‌واره فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری (RPP)

در جدول ۲-۲ نیز پارامترهای مهم فرایند و اندازه آنها آورده شده است.

جدول ۲-۲- پارامترهای قالب فرایند سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری

پارامتر	نام پارامتر	ابعاد (mm)
h_t	ارتفاع لوله	۶۰
h_r	ارتفاع ابزار الاستومری	۵۵
d_d	قطر سوراخ قالب	۱۲
d_{cp}	قطر سنبه مقابل	۱۳
X	فاصله سوراخ قالب از سنبه مقابل	۵
Y	فاصله ماندل ثابت تا سوراخ قالب	۱۵

در آزمایش‌های تجربی انجام‌شده، برای نمونه‌های با ضخامت ۱ mm از دو نوع ابزار الاستومری با سختی‌های ۵۰ و Shore-A ۸۵ استفاده شد. برای نمونه‌های با ضخامت ۱/۴ mm و ۱/۸ mm فقط از ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۸۵ استفاده شد. در جدول ۲-۳ شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده ارائه شده است.

جدول ۳-۲- شرایط آزمایش‌های تجربی انجام‌شده بر روی لوله آلومینیومی

شماره آزمون	ضخامت لوله (mm) t	قطر ابزار الاستومری (mm) d ₁	قطر ماندرل متحرک (mm) d ₂	سختی ابزار الاستومری (Shore-A)	با / بدون سنبه مقابل
T01	۱	۳۳	۳۳	۸۵	×
T02	۱	۳۳	۳۳	۸۵	×
T03	۱	۳۳	۳۳	۸۵	✓
T04	۱	۳۳	۳۳	۵۰	×
T05	۱	۳۳	۳۳	۵۰	✓
T06	۱	۳۳	۳۳	۵۰	✓
T07	۱/۴	۳۲/۲	۳۲/۲	۸۵	×
T08	۱/۴	۳۲/۲	۳۲/۲	۸۵	×
T09	۱/۴	۳۲/۲	۳۲/۲	۸۵	✓
T10	۱/۴	۳۲/۲	۳۲/۲	۸۵	✓
T11	۱/۸	۳۱/۴	۳۱/۴	۸۵	×
T12	۱/۸	۳۱/۴	۳۱/۴	۸۵	×
T13	۱/۸	۳۱/۴	۳۱/۴	۸۵	✓
T14	۱/۸	۳۱/۴	۳۱/۴	۸۵	✓

فصل ۳ شبیه‌سازی اجزای محدود

در این فصل پس از بیان مقدمه‌ای کوتاه بر روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس، توصیفی بر مکانیک آسیب و مبانی شکست نرم در فلزات و مدل شکست گرسون-تورگارد-نیدلمن ارائه می‌شود و سپس مدل‌سازی‌های انجام‌شده به منظور تحلیل فرایند سوراخ‌کاری با استفاده از ابزار الاستومری شرح داده می‌شود.

۳-۱- روش اجزای محدود

روش اجزای محدود یک روش عددی جهت حل مسائل فیزیکی و مهندسی است که رفتار حاکم بر آنها به کمک معادلات دیفرانسیل بیان می‌شود. به‌طور کلی حل ریاضی تحلیلی برای مسائلی با پیچیدگی هندسی، رفتار پیچیده ماده، شرایط مرزی و نیز بارگذاری‌های متنوع موجود در مسائل، واقعیت رسیدن به حل دقیق را با دشواری‌های فراوان روبرو ساخته است. استفاده از حل‌های تقریبی با دقت قابل قبول که در زمان محدود به‌دست‌آمده، گشایشی عظیم در حل این مسائل به شمار می‌رود. روش اجزای محدود یکی از بهترین انتخاب‌ها در این زمینه است. در این روش از توابع پیوسته چندتکه‌ای و هموار برای تقریب کمیت مجهول مورد نظر استفاده می‌شود. با توجه به پیشرفت دانش مهندسی و توسعه

نرم‌افزارها و سخت‌افزارها یکی از روش‌های مفید برای مطالعه یک پدیده مهندسی انجام شبیه‌سازی است. شبیه‌سازی صحیح فرایند و آزمایش پارامترهای مختلف آن در ابتدای تولید در توسعه آن فرایند بسیار مؤثر بوده و در نتیجه طراحی ساختار صحیح و انتخاب صحیح پارامترهای فرایند قبل از آزمایش عملی به‌سادگی امکان‌پذیر خواهد بود. در نتیجه زمان صرف شده و تعداد آزمایش و خطا کاهش یافته و منجر به کاهش هزینه‌های تولید خواهد شد.

روش اجزای محدود به پنج مرحله اصلی تقسیم می‌شود:

- ۱- تقسیم المان یا قطعه موردنظر به چندین المان کوچک‌تر
 - ۲- تعیین معادلات حاکم در نقاط مرزی و گره‌ای هر المان با تقریب‌های اولیه
 - ۳- ایجاد دستگاه معادلات از معادلات گره‌ها
 - ۴- حل دستگاه معادلات
 - ۵- محاسبه دیگر مقادیر مجهول‌ها از روی معلومات
- مزایای روش اجزای محدود بدین شرح است:

- توانایی مدل‌سازی سریع شکل‌های پیچیده و غیر منتظم
- توانایی مدل‌سازی چندین ماده مختلف در یک تحلیل به دلیل تعیین معادلات اجزاء به طور مجزا
- کنترل و اعمال شرایط مرزی خاص
- امکان تغییر اندازه اجزاء و استفاده از اجزاء کوچک‌تر در صورت لزوم
- توانایی به‌کارگیری بدون دشواری شرایط نیرویی کل فرایند
- امکان اصلاح نسبتاً آسان و کم هزینه مدل
- امکان بارگذاری دینامیکی
- کنترل رفتار غیرخطی مربوط به تغییر شکل‌های بزرگ

روش اجزای محدود در تحلیل‌های ساختاری، این امکان را برای طراح فراهم می‌سازد تا مسائل مربوط به تنش، ارتعاش و حرارت را در طی فرایند شناسایی و تغییرات طراحی را قبل از ساخت نمونه اولیه ارزیابی کند. همچنین در صورت استفاده صحیح از این روش، می‌توان تعداد نمونه‌های اولیه برای ساخت را کاهش داد [۴۶].

۳-۱-۱ معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی آباکوس

در بین نرم‌افزارهایی که از روش المان محدود جهت آنالیز مسائل مهندسی استفاده می‌نمایند، نرم‌افزار آباکوس به دلیل توانایی در حل مسائل با طیف وسیعی از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیل‌های غیرخطی پیچیده و راحتی استفاده، دقت و سرعت بالای محاسبات به‌عنوان نرم‌افزاری کاربردی در صنعت و دانشگاه شناخته‌شده است. این نرم‌افزار شامل کتابخانه گسترده‌ای از المان‌هاست که به کمک آنها می‌تواند هر نوع هندسه‌ای را مدل‌سازی کند. این نرم‌افزار همچنین دارای لیست گسترده‌ای از مدل‌های رفتاری مواد است که می‌تواند رفتار اغلب مواد مهندسی مانند فلزات، لاستیک، پلیمرها، مواد مرکب، بتن مسلح، فوم‌های شکننده و حتی مصالح ژئوتکنیکی مثل خاک و سنگ را شبیه‌سازی کند. تئوری کامل این نرم‌افزار مبتنی بر تحلیل غیرخطی المان محدود پیشرفته، با استفاده از جدیدترین روابط و نگارش ریاضی در راهنمای آن موجود است.

۳-۱-۲ حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس

این محصول آباکوس یک ابزار حل مسئله است که برای حل مسائل ویژه‌ای مانند مسائل دینامیکی گذرا از جمله برخورد^۱، ضربه انفجار^۲، آزمایش ضربه^۳، مچالگی^۴، مسائل شبه استاتیکی^۵ و مسائل غیرخطی که شرایط تماس در آنها تغییر می‌کند مانند فرایندهای شکل‌دهی کاربرد فراوان دارد. این محصول، معادلات

^۱ Impact

^۲ Blast

^۳ Drop test

^۴ Crushing

^۵ Quasi static

حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح به همراه ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو در مسائل غیرخطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم‌افزار بر اساس شرایط پایداری، میزان نمو در هر مرحله را به‌صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند. استفاده از انتگرال‌گیری صریح در تحلیل المان محدود، این حلگر را قادر می‌سازد تا بتواند مسائل شبه استاتیکی را به دلایلی مثل پیچیده بودن شرایط تماسی، با دقت قابل قبولی حل نماید. برای حل این مسائل در حلگر صریح نرم‌افزار آباکوس دو تکنیک سریع وجود دارد که یکی تکنیک افزایش سرعت^۱ و دیگری بزرگنمایی جرم^۲ است. باید توجه داشت که نسبت بزرگنمایی استفاده‌شده توسط کاربر تنها باعث سریع‌تر حل شدن مسئله شود و باعث وارد شدن اثرات دینامیکی در مسئله نشود. نتایج حاصل از حلگر صریح در مسائل شبه استاتیکی در صورتی قابل استناد است که انرژی جنبشی کسر کوچکی از انرژی داخلی کل بوده (کمتر از ۵ درصد) و تغییرات انرژی جنبشی فرایند دارای رفتار غیر نوسانی و نسبتاً مرتبط با فرایند باشد.

۳-۲- مکانیک آسیب^۳ و مبانی تئوری شکست نرم^۴

بررسی شکست و تسلیم مواد، به کمک دانش مکانیک شکست و از دو دیدگاه مکانیک کلاسیک و میکرومکانیکی انجام می‌پذیرد. بررسی رفتار مکانیکی فلزات نرم بر اساس مکانیک شکست کلاسیک با محدودیت‌هایی مواجه است. کاربرد روش مکانیک شکست کلاسیک تنها برای موادی باقابلیت شکل‌پذیری اندک و مدل‌هایی با هندسه‌ی ترک محدود، امکان‌پذیر است [۴۷]. وسعت ناحیه گسیختگی در مواد نرم، توصیف رفتار ماده بر اساس مکانیک شکست را با دشواری روبه‌رو می‌کند. امروزه مکانیک آسیب پیوسته^۵ به‌عنوان ابزاری کارآمد در شبیه‌سازی شکست نرم بوده و رفتار شکست در مواد نرم را به‌خوبی ارزیابی می‌کند. مدل‌های مکانیک آسیب می‌توانند فرایند جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن

^۱ Time scale

^۲ Mass scale

^۳ Damage mechanics

^۴ Ductile damage

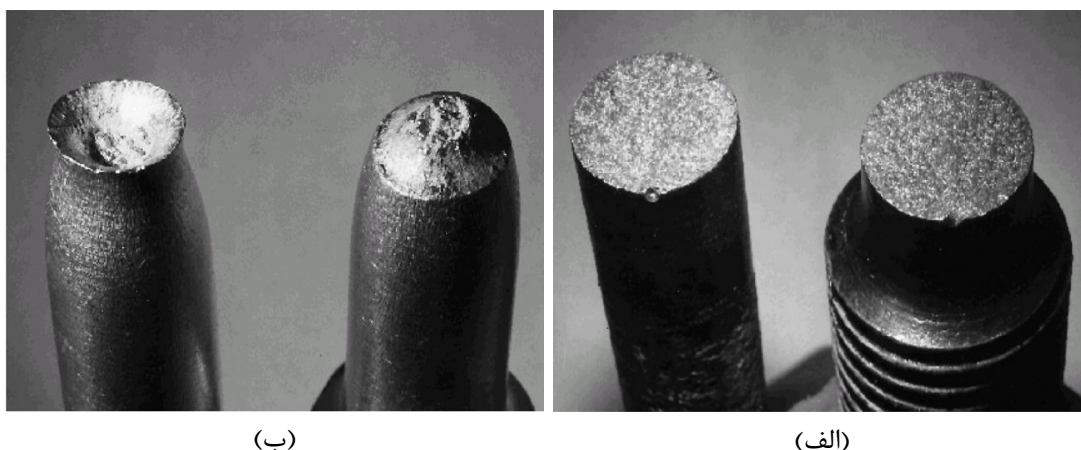
^۵ Continuum damage mechanics

حفره‌ها را با استفاده از معادلات مکانیک محیط‌های پیوسته شبیه‌سازی کنند. مزیت برجسته این روش در مقایسه با مکانیک شکست کلاسیک، وابستگی پارامترهای مدل تنها به ماده و عدم وابستگی آنها به هندسه مدل است. مدل‌های مکانیک آسیب، امکان ارزیابی آسیب در هر نقطه از سازه را بدون توجه به هندسه‌ی مدل و بارگذاری اعمالی بر آن، به کمک مکانیزم رشد آسیب و میدان تنش-کرنش فراهم می‌سازند [۴۸]. پدیده آسیب در مواد نرم، در نتیجه جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌های میکروسکوپی به وجود می‌آید. فلزات در اثر فرایند بارگذاری سرانجام به نقطه ناپایداری می‌رسند؛ در این نقطه، سختی کرنشی توانایی جبران کاهش سطح مقطع در ماده را ندارد. از این‌رو فرایند جوانه‌زنی ریز حفره‌ها، به واسطه ناخالصی‌ها و ذرات فاز دوم، در ساختار ماده آغاز می‌شود. رشد حفره‌ها تا رسیدن به اندازه‌ی بحرانی ادامه می‌یابد. با شکل‌گیری جریانی ماکروسکوپی، به واسطه رشد تدریجی حفره‌ها، ناپایداری مومسان موضعی بین حفره‌ها افزایش می‌یابد. به سبب این تغییر شکل مومسان، ریز حفره‌ها به یکدیگر پیوسته و ریز ترک‌هایی در مقیاس ماکروسکوپی به وجود می‌آورند که به گسیختگی نهایی ماده منجر می‌شود [۴۷]. استفاده از مکانیک آسیب در تحلیل فرایندهای شکل‌دهی فلزات تخمین دقیق‌تری از نیروهای مؤثر فرایند، نقاط آسیب‌پذیر ماده، نیروهای بحرانی فرایند، پیش‌بینی نقاط شروع ترک و نقاط شکست در ماده در اختیار طراح قرار می‌دهد. یکی از مدل‌هایی که برای پیش‌بینی رشد ریز حفره‌ها ارائه شده، مدل آسیب گرسون است که با اصلاحات بعدی توسط تورگارد و نیدلمن مورد بررسی قرار گرفته است. مدل آسیب گرسون توانایی مدل نمودن وقوع ریز حفره‌ها، رشد و به هم پیوستن آنها را دارد. از آنجا که این مدل منحصر به بارگذاری تناسبی (مد اول شکست) است در سازه‌ای که تحت بارگذاری ترکیبی به خصوص بار برشی قرار می‌گیرد نتایج مورد قبولی حاصل نمی‌شود.

۳-۲-۱ شکست

شکست، جدایش یا تقسیم شدن یک جسم جامد به دو یا چند قسمت در اثر اعمال تنش تعریف شده است. این فرایند شامل دو مرحله جوانه‌زنی ترک و رشد و گسترش ترک است. فرایند شکست از نظر

مقدار کرنش شکست به دو گروه عمده شکست نرم^۱ و شکست ترد^۲ تقسیم می‌شود. شکست نرم با مقدار قابل توجهی تغییر شکل مومسان قبل از مرحله پیشرفت ترک و در حین آن همراه است و معمولاً در سطوح شکست مقدار زیادی تغییر شکل ناخالص وجود دارد. این تغییر شکل مومسان سبب عدم انطباق سطوح شکست می‌شود که این مسئله در شکست ترد قابل مشاهده نیست. شکست ترد در فلزات با سرعت زیاد پیشرفت ترک و میزان خیلی کم تغییر شکل مومسان صورت می‌گیرد. این دو نوع شکست از نظر انرژی شکست نیز با هم اختلاف دارند. شکست ترد با تنش قابل کنترل است و دارای انرژی شکست کمتری است، بنابراین ترک سریع‌تر رشد کرده و ناپایدار می‌شود. برخلاف آن، در شکست نرم که با کرنش کنترل می‌شود، انرژی اضافی بیشتری با تغییر شکل مومسان به مصرف می‌رسد [۴۹]. در شکل ۱-۳ تفاوت سطح مقطع دو نوع شکست ترد و نرم ارائه شده است.



شکل ۱-۳ - مقایسه سطح مقطع دو نوع شکست، (الف) شکست ترد (فولاد)، (ب) شکست نرم (آلومینیوم) [۴۹]

۳-۲-۲ شکست نرم

برای بسیاری از فلزات و آلیاژهای آنها مانند آلومینیوم و آلیاژهای آن که دارای شبکه بلوری FCC هستند، در تمام درجه حرارت‌ها شکست نرم اتفاق می‌افتد. شکست نرم به آرامی و پس از تغییر شکل مومسان چشم‌گیری به ازای تنشی بالاتر از استحکام کششی ماده ظاهر می‌شود. از مشخصات شکست

¹ Ductile

² Brittle

نرم، تحت تأثیر تنش کششی، ظاهر شدن گلوپی یا باریک شدگی موضعی و ایجاد حفره‌های بسیار ریز در قسمت گلوپی و اتصال آنها به یکدیگر تا رسیدن به حد یک ترک ریز و رشد آرام ترک تا حد پارگی یا شکست نهایی است. در این نوع شکست علت ایجاد حفره‌های ریز در محدوده‌ی گلوپی می‌تواند تغییر شکل غیریکنواخت ناشی از ناخالصی‌های موجود در ماده اصلی زمینه باشد. لذا با ایجاد حفره‌های بسیار ریز در محدوده گلوپی حالت تنش سه محوری برقرار می‌شود که منجر به ایجاد ترک می‌شود [۵۰]. شکست نرم می‌تواند به اشکال مختلفی اتفاق بیفتد. شکل ۲-۳ انواع شکست نرم فلزات تحت تنش یک‌بعدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- انواع شکست نرم فلزات تحت تنش یک‌بعدی (الف) جوانه‌زنی و رشد حفره (مرزدانه‌ای)، (ب) جوانه‌زنی و رشد حفره (درون‌دانه‌ای)، (ج) گلوپی شدن [۵۱]

نوعی شکست با جوانه‌زنی^۱، رشد^۲ و به هم پیوستن حفره‌ها^۳ صورت می‌گیرد. شکل ۲-۳-الف این نوع شکست را که از نوع مرزدانه‌ای و شکل ۲-۳-ب که از نوع درون‌دانه‌ای است نشان می‌دهد. شکست درون‌دانه‌ای ناشی از جوانه‌زنی و رشد حفره با توجه به محل تشکیل ترک و چگونگی رشد ترک به دودسته تقسیم‌بندی می‌شود. در نوع اول که به شکست فنجان^۴ و مخروط^۵ معروف است، تشکیل ترک و رشد آن از مرکز نمونه شروع شده و سپس با ساز و کار برشی گسترش می‌یابد. نوع دیگر شکست درون‌دانه‌ای ناشی از جوانه‌زنی و رشد حفره است که در این حالت ترک از سطح به طرف داخل نفوذ

^۱ Void nucleation

^۲ Void growth

^۳ Void coalescence

^۴ Cup

^۵ Cone

می‌کند. نمونه‌های پلی کریستال (پر بلور) فلزات خیلی نرم مانند طلا و سرب به‌طور عملی تا نقطه پارگی می‌توانند تغییر شکل دهند. در کشش، شکست در این گونه مواد نسبتاً نرم، منجر به تغییر شکل مومسان و ایجاد یک ناحیه گلویی پیش از وقوع شکست می‌شود (شکل ۳-۲-ج).

۳-۲-۳ ساز و کار شکست نرم

مراحل معمول مشاهده شده در جریان میکرومکانیکی منجر به شکست، در مواد نرم به‌صورت زیر است:

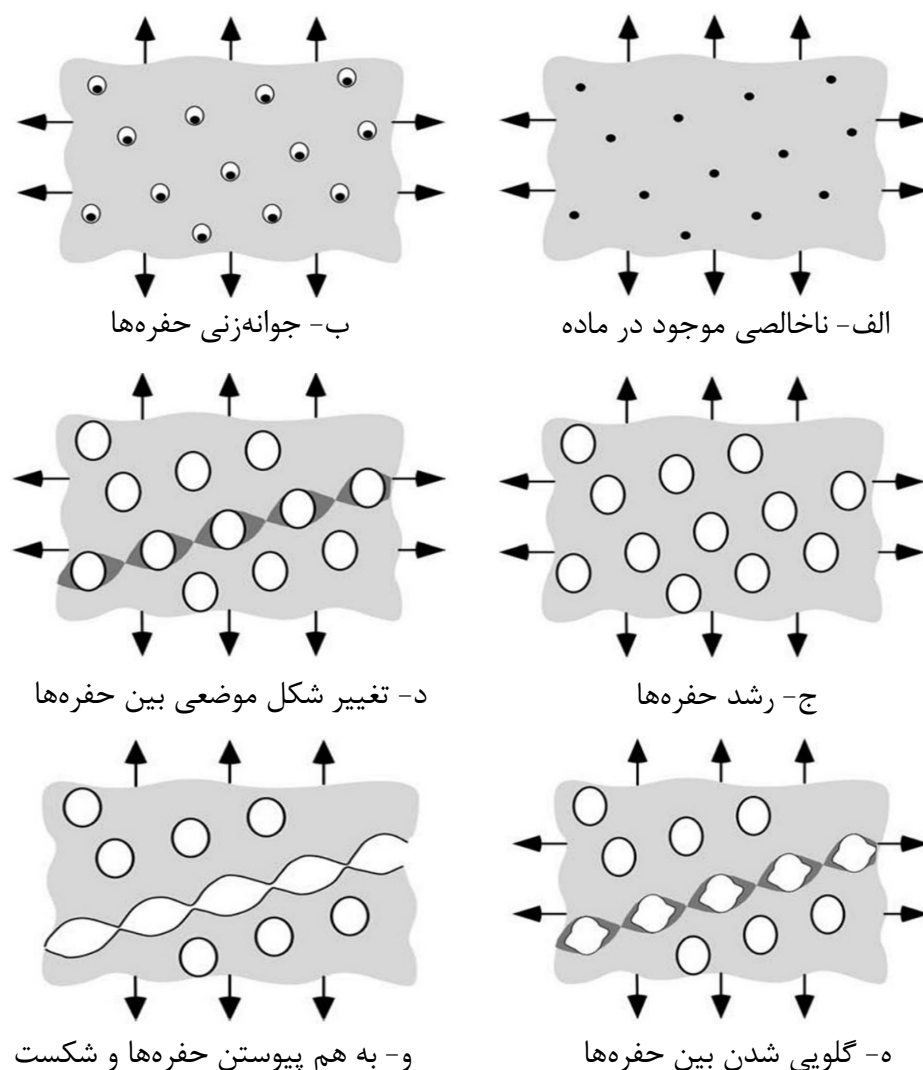
- ۱- شکل‌گیری یک سطح آزاد در ناخالصی‌ها یا ذرات فاز دوم به علت انسجام کم ذرات فصل مشترک یا ترک‌خوردگی ذرات.

- ۲- رشد حفره در اطراف ذرات بر اثر کرنش مومسان و تنش هیدرواستاتیک.

- ۳- به هم پیوستن حفره رشد یافته با حفره‌های مجاور. در این مرحله با به هم پیوستن حفره‌های مجاور ترک‌های ریز در داخل جسم شکل می‌گیرد.

در موادی که ذرات فاز دوم و ناخالصی‌ها پیوستگی خوبی در ماده زمینه دارند، جوانه‌زنی حفره‌ها اغلب یک مرحله‌ی بحرانی است؛ چرا که شکست بلافاصله پس از شکل‌گیری حفره‌ها اتفاق می‌افتد.

هنگامی که جوانه‌زنی حفره‌ها با کمی دشواری همراه باشد، ویژگی‌های شکست توسط رشد و به هم پیوستن حفره‌ها کنترل می‌شود. رشد حفره‌ها تا رسیدن به یک اندازه‌ی بحرانی، تابع فاصله بین حفره‌های مجاور بوده و توسعه‌ی ناپایداری مومسان موضعی بین حفره‌ها در نهایت منجر به شکست ماده می‌شود (شکل ۳-۳) [۴۷].



شکل ۳-۳- جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در فلزات نرم [۴۷]

برای توصیف شکست نرم، لازم است این جریان میکرومکانیکی با قوانین مکانیک محیط پیوسته شبیه‌سازی شود. در الگوهای مکانیک پیوسته، به جای اینکه هر حفره را به عنوان یک سوراخ کوچک توصیف کنند، رفتار کلی ماده متخلخل را شبیه‌سازی می‌نمایند. به علت فرمولاسیون موضعی این الگوها، پارامترهای ماده برای این الگو نباید هیچ‌گونه وابستگی به هندسه و نوع بارگذاری داشته باشند [۵۲].

۳-۲-۴ مدل شکست نرم گرسون

شکل‌گیری اولیه این مدل در سال ۱۹۷۷ توسط گرسون و بر اساس آنالیز حد بالای پلاستیسیته^۱ برای ماده کاملاً مومسان که درون آن یک حفره وجود داشته و از الگوی فون‌میزز پیروی می‌کند، ارائه شده [۵۳] و سپس به‌وسیله تورگارد [۵۴-۵۶] (۱۹۸۱-۱۹۸۴) و در ادامه توسط تورگارد و نیدلمن [۵۷] (۱۹۸۴) مورد اصلاح قرار گرفته است. آنالیز جریان پلاستیک در مدل گرسون در یک محیط متخلخل و با فرض رفتار پیوسته ماده صورت می‌پذیرد. حفره‌ها در این مدل به‌طور غیرمستقیم حضور داشته و بر رفتار کلی ماده تأثیر می‌گذارند. این تأثیر در سراسر ماده میانگین‌گیری شده و اثر آن بر شرایط تسلیم ماده لحاظ می‌گردد. سطح تسلیم در مدل گرسون، به میزان اندکی به تنش هیدرواستاتیک، σ_m ، وابسته است، در حالی که سطح تسلیم در پلاستیسیته کلاسیک مستقل از تنش هیدرواستاتیک در نظر گرفته می‌شود. برخلاف برخی مدل‌های مشابه (نظیر مدل رایس و تریسی)، امکان پیش‌بینی شکست بر اساس یک معیار گسیختگی در مدل گرسون میسر است. اساس مدل گرسون بر استفاده از تابع تسلیم گرسون، Φ ، برای یک ماده مومسان متخلخل با داشتن کسر حجمی حفره^۲ f استوار است که به‌صورت نسبت حجم کل حفره‌ها به حجم کل ماده زمینه تعریف می‌شود.

تابع تسلیم اولیه گرسون، که برای فلزاتی با تجمع اندک حفره‌ها ($f < 0.1$) به کار برده می‌شود، در سال ۱۹۷۷ توسط گرسون به شکل زیر ارائه شد [۵۳]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2f \cosh\left(\frac{3\sigma_m}{2\sigma_y}\right) - (1 + f^2) = 0 \quad ۱-۳$$

که در آن σ_{eq} ، بیانگر تنش معادل فون‌میزز، σ_y تنش تسلیم ماده، σ_m تنش میانگین (تنش هیدرواستاتیک) و f نیز کسر حجمی حفره‌هاست که به صورت نسبت حجم کل حفره‌ها به حجم کل

^۱ Upper bound plasticity

^۲ Void Volume Fraction (VVF)

ماده تعریف می‌شود. تنش معادل فون میزز و تنش میانگین (هیدرواستاتیک) از روابط ۲-۳ و ۳-۳ حاصل می‌شوند:

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}\right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad ۲-۳$$

و

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad ۳-۳$$

در رابطه‌ی ۲-۳، S_{ij} تنسور تنش انحرافی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad ۴-۳$$

که در آن δ_{ij} نماد دلتای کرونیکر بوده و $ij = 1, 2, 3$ است.

مدل اصلی گرسون بر پایه رشد یک حفره کروی در یک المان حجم ماده مومسان کاملاً صلب و پس از نرم شدن ساختار میکروسکوپی است. از آنجا که پیش‌بینی کرنش‌های گسیختگی در مواد کاربردی بر اساس معادله فوق، بسیار فراتر از حد واقعی صورت می‌پذیرد، که این موضوع از ضعف‌های اساسی مدل گرسون به شمار می‌رفت و موجب تفاوت‌هایی بین آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی رایانه‌ای می‌شد و سطوح تسلیم بعد از تسلیم اولیه کوچک‌تر از مقدار واقعی بود، تورگارد [۵۴-۵۶] برای کاهش این اختلاف دو پارامتر تعدیل‌کننده‌ی q_1 و q_2 را به تابع تسلیم گرسون اعمال نمود تا اثرات کرنش سختی و اثر متقابل حفره‌ها وارد مدل گردند. اعمال این تغییرات در مدل گرسون، به تقویت تأثیر تنش هیدرواستاتیک منجر شد و در نتیجه، تابع تسلیم اولیه گرسون به شکل رابطه ۳-۵ اصلاح شد که این مدل به مدل گرسون-تورگارد (G-T) معروف است.

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right) - (1 + q_1^2 f^2) = 0 \quad ۵-۳$$

در رابطه‌ی ۳-۵، اگر $q_1 = q_2 = 1$ باشد آنگاه این رابطه به تابع تسلیم اولیه گرسون تبدیل می‌شود و اگر $f = 0$ فرض شود، ماده کاملاً متراکم و بدون تخلخل بوده و تابع تسلیم گرسون به تابع تسلیم فون میز تبدیل می‌شود.

مدل اولیه گرسون تنها می‌توانست جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها را شبیه‌سازی کند و مرحله به هم پیوستن حفره‌ها را به حساب نمی‌آورد. در سال ۱۹۸۴ تورگارد و نیدلمن، تابعی برای کاهش سریع ظرفیت تحمل تنش در مراحل نهایی به هم پیوستن حفره‌ها به صورت رابطه‌ی ۳-۶ معرفی کردند [۵۷]:

$$f^*(f) = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \delta(f - f_c) & f > f_c \end{cases}, \quad \delta = \frac{f_u^* - f_c}{f_f - f_c} \quad ۳-۶$$

که در آن

$$f_u^* = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} \quad ۳-۷$$

است که در رابطه‌ی ۳-۷ نیز

$$q_3 = q_1^2 \quad ۳-۸$$

است.

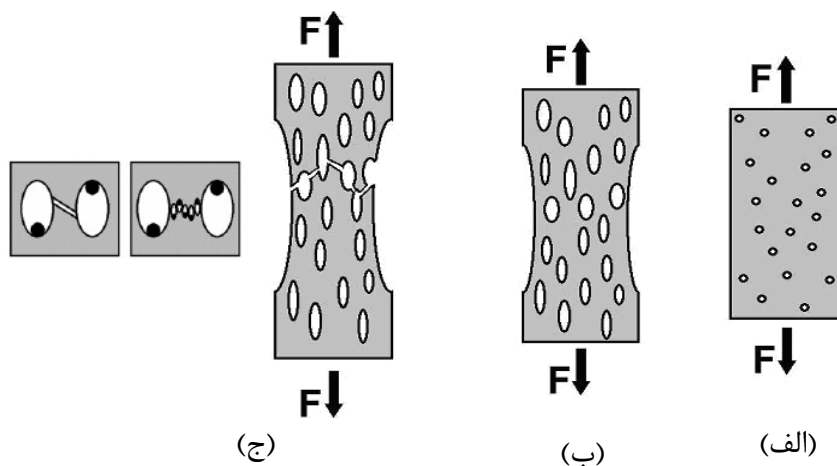
در روابط فوق q_1 ، q_2 و q_3 پارامترهای سطح تسلیم مدل [۵۵]، f_c مقدار بحرانی کسر حجمی حفره‌ها در لحظه شروع به هم پیوستن حفره‌ها (مقداری که در آن کاهش سریع ظرفیت تحمل تنش شروع می‌شود)، δ ، نرخ به هم پیوستن حفره‌ها، f_f کسر حجمی حفره‌ها در پایان شکست، $f_u^* = \frac{1}{q_1}$ و $f^*(f)$ نسبت حجم حفره اصلاح شده است [۵۶]. با جایگذاری f^* از رابطه‌ی ۳-۶ به جای f در رابطه‌ی ۳-۵، مدل گرسون-تورگارد-نیدلمن که به مدل GTN معروف است به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right) - (1 + q_1^2 (f^*)^2) = 0 \quad ۳-۹$$

که با بازنویسی این معادله با در نظر گرفتن رابطه‌ی ۳-۸، مدل اصلاح‌شده‌ی نهایی GTN به صورت رابطه‌ی ۳-۱۰ نوشته می‌شود:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right) - (1 + q_3 (f^*)^2) = 0 \quad ۳-۱۰$$

رابطه‌ی ۳-۱۰ معمولاً مدل گرسون-تورگارد-نیدلمن و یا به اختصار مدل GTN نامیده می‌شود. برای یک ماده بدون حفره مقدار f^* برابر صفر بوده و برای ماده کاملاً متخلخل مقدار آن برابر یک است. از دیدگاه میکروسکوپی پیشروی شکست نرم (پارگی) در بارگذاری کششی فلزات نرم شامل سه مرحله جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌های ریز است که منجر به رشد ترک می‌شود. شکل ۳-۴ این مراحل را به صورت طرح‌واره نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴- مراحل (الف) جوانه‌زنی (ب) رشد و (ج) به هم پیوستن حفره‌ها در بارگذاری کششی [۵۸]

رشد و تکامل کسر حجمی حفره شامل دو بخش است: رشد حفره‌های موجود و جوانه‌زنی حفره‌های جدید. افزایش کسر حجمی حفره در مدل GTN به صورت رابطه‌ی ۳-۱۱ بیان می‌شود:

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{growth}} + \dot{f}_{\text{nucleation}} \quad ۳-۱۱$$

از آنجا که ماده تراکم ناپذیر است، مؤلفه مربوط به رشد حفره‌های موجود یعنی $\dot{f}_{\text{growth}}$ ، مربوط به بخش هیدرواستاتیک کرنش مومسان بوده و به صورت رابطه‌ی ۳-۱۲ بیان می‌شود:

$$\dot{f}_{\text{growth}} = (1 - f)\dot{\bar{\varepsilon}}_p \quad ۱۲-۳$$

که در آن $\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ جزء هیدرواستاتیک نرخ کرنش مومسان معادل است. نرخ جوانه‌زنی حفره‌های جدید مبنی بر نرخ کرنش مومسان می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۱۳-۳ بیان گردد [۵۹].

$$\dot{f}_{\text{nucleation}} = A\dot{\bar{\varepsilon}}_p + B\dot{\sigma}_m \quad ۱۳-۳$$

فرض می‌شود که جوانه‌زنی حفره، توسط کرنش مومسان کنترل می‌شود، بنابراین در رابطه‌ی ۱۳-۳، $A > 0$ و $B = 0$ است که در این صورت:

$$\dot{f}_{\text{nucleation}} = A\dot{\bar{\varepsilon}}_p \quad ۱۴-۳$$

بوده و مقدار A از رابطه‌ی ۱۵-۳ به دست می‌آید [۵۹].

$$A = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon}^p - \varepsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad ۱۵-۳$$

در رابطه‌ی ۱۵-۳، f_N ، کسر حجمی مربوط به جوانه‌زنی حفره‌های جدید بوده و بیشترین مقدار جوانه‌زنی حفره است. ε_N کرنش میانگین جوانه‌زنی حفره و S_N انحراف معیار استاندارد توزیع این حفره‌ها و $\bar{\varepsilon}^p$ کرنش مومسان معادل است. فرض می‌شود که تابع جوانه‌زنی حفره‌ها یعنی $\frac{A}{f_N}$ دارای توزیع نرمال بوده و نیز فرض می‌شود که حفره‌ها تنها در اثر بارگذاری کششی شروع به جوانه‌زنی می‌کنند و جوانه‌زنی حفره‌ها تحت اثر بارگذاری فشاری اتفاق نمی‌افتد.

بنابراین با توجه به روابط ذکرشده، معیار شکست GTN دارای ۹ پارامتر اصلی است که عبارت‌اند از: q_1 ، q_2 و q_3 [پارامترهای تصحیح سطح تسلیم]، f_0 (کسر حجمی اولیه حفره‌ها)، f_c (مقدار بحرانی کسر حجمی حفره‌ها)، f_f (کسر حجمی حفره‌ها در لحظه نهایی شکست) [پارامترهای وابسته به رشد و به هم پیوستن حفره‌ها]، f_N (کسر حجمی حفره‌ها مربوط به ذرات در دسترس برای به هم پیوستن حفره‌ها)، ε_N (کرنش متوسط به هم پیوستن حفره‌ها) و S_N (انحراف معیار استاندارد توزیع حفره‌ها)

[پارامترهای وابسته به جوانه‌زنی حفره‌ها]. این پارامترها برای هر ماده باید به‌طور جداگانه تعیین شوند. همچنین رفتار سخت شدن کرنشی ماده نیز جهت شبیه‌سازی شکست باید مشخص گردد.

مزیت اصلی مدل شکست GTN آن است که پارامترهای آن به هندسه ماده و نوع بارگذاری آن بستگی نداشته و می‌توان آنها را جزیی از ذات ماده در نظر گرفت؛ اما مشکل اصلی این مدل به دست آوردن پارامترهای آن به صورت جداگانه برای هر ماده است که به آزمایش و شبیه‌سازی عددی نیاز دارد. از طرفی دیگر در این مدل شکست از اثر تنش برشی بر فرایند رشد حفره‌ها صرف‌نظر می‌شود که در حالت کلی نتایج را تا حدودی غیرواقعی می‌کند. برای رفع این نقص می‌توان مدل خرابی جانسون-کوک را به عنوان یک معیار اضافی خرابی به طور هم‌زمان با مدل GTN به کاربرد.

۳-۳- شرح مدل‌سازی عددی

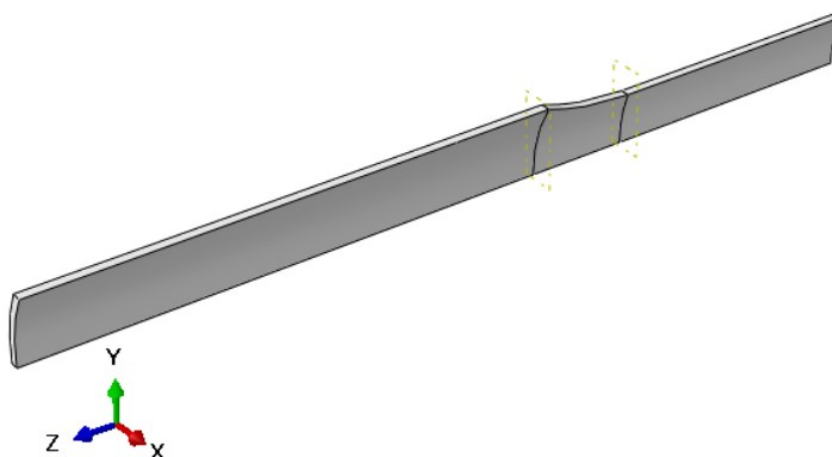
در این پژوهش برای انجام شبیه‌سازی‌های موردنظر از نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲-۱۴ به دلیل توانمندی بالای آن در تحلیل مسائل شکست، استفاده شد. در زمینه‌ی مکانیک شکست، آباکوس یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای تحلیلی است که الگوهای مختلف مربوط به رفتار مواد و شکست، توسط آن قابل شبیه‌سازی است. معیار شکست GTN نیز در زمینه‌ی شکست نرم به‌عنوان یک رفتار ماده در این نرم‌افزار گنجانده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این پژوهش شامل دو بخش است: شبیه‌سازی نخست، شبیه‌سازی آزمون کشش تک محوری لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ است که به منظور کالیبراسیون و تعیین مقادیر پارامترهای مدل شکست GTN انجام شده است و شبیه‌سازی دوم به منظور بررسی امکان سوراخ‌کاری (برش) لوله آلومینیومی به کمک فشار ابزار الاستومری و تأثیر عوامل مؤثر بر این فرایند انجام شده که در این مرحله از شبیه‌سازی، کلیه‌ی اجزای قالب صلب در نظر گرفته شد که در ادامه به شرح آن پرداخته خواهد شد.

۳-۳-۱ شبیه‌سازی آزمون کشش تک‌محوری

شبیه‌سازی عددی آزمون کشش تک‌محوری برای نمونه‌ی آزمون، با در نظر گرفتن شرایط واقعی آزمون و استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده مطابق مراحل زیر انجام شد:

الف) ایجاد مدل هندسی مسئله

اولین گام در شبیه‌سازی، ایجاد مدل هندسی مسئله است. در نرم‌افزار آباکوس می‌توان نمونه‌هایی که دارای تقارن هستند را به صورت دو بعدی مدل‌سازی و تحلیل کرد. همچنین در صورت تقارن قطعه می‌توان نصف یا یک‌چهارم آن را مدل‌سازی نمود. این امر باعث کاهش تعداد المان‌های مسئله و در نتیجه کاهش زمان مورد نیاز برای حل مسئله خواهد شد. در شبیه‌سازی آزمون کشش در این پایان‌نامه به دلیل تقارن صفحه‌ای تنها یک‌چهارم نمونه مدل‌سازی شد. در شکل ۳-۵ مدل هندسی آزمون کشش ارائه شده است.



شکل ۳-۵- مدل هندسی آزمون کشش

ب) تعریف خواص ماده نمونه لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

پس از ایجاد مدل هندسی مسئله و با ورود به محیط Property، می‌توان نوع و خواص ماده یا مواد را تعریف کرد. در این بخش ابتدا چگالی و خواص کشسان ماده (مدول یانگ E و نسبت پواسون ν) مطابق جدول ۳-۱ تعریف شدند.

جدول ۳-۱- خصوصیات مکانیکی لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ [۶۰]

چگالی (kg/m^3)	مدول کشسان (GPa)	ضریب پواسون ν
۲۷۰۰	۷۰	۰/۳۳

پس از تعریف چگالی و خواص کشسان ماده، برای تعریف خواص مومسان ماده، اطلاعات مربوط به چند نقطه از ناحیه مومسان نمونه مورد آزمون، با توجه به نمودار تنش- کرنش حقیقی به دست آمده از آزمون کشش آزمایشگاهی و با فرض همسانگرد بودن ماده، مطابق جدول ۳-۲ وارد نرم‌افزار شد. در معرفی خواص ماده مورد پژوهش با توجه به نوع حل و مدل استفاده شده برای شبیه‌سازی عددی، علاوه بر تعریف چگالی، خواص مومسان ماده و خواص ابزار الاستومری، باید پارامترهای مربوط به مدل شکست GTN را نیز تعریف نمود. برای کالیبراسیون و تعیین پارامترهای مدل شکست GTN با توجه به منابع موجود برای ورق آلومینیوم ۶۰۶۱، این پارامترها به صورت پیش فرض به نرم‌افزار داده شد. لازم به ذکر است برای تعریف کسر حجمی اولیه حفره‌ها (f_0) در بخش Porous metal plasticity و در قسمت Relative density می‌بایست مقدار $(1 - f_0)$ را وارد نرم‌افزار نمود.

مقدار بحرانی کسر حجمی حفره‌ها (f_c) و کسر حجمی حفره‌ها در لحظه نهایی شکست f_f ، کسر حجمی حفره‌ها مربوط به ذرات در دسترس برای به هم پیوستن حفره (f_N)، کرنش متوسط به هم پیوستن حفره‌ها (ϵ_N) و انحراف معیار استاندارد توزیع حفره‌ها (S_N) نیز وارد نرم‌افزار شدند. تعریف همسانگردی^۱ ماده نیز در همین بخش انجام شد.

^۱ Isotropic

جدول ۳-۲- خواص مومسان لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

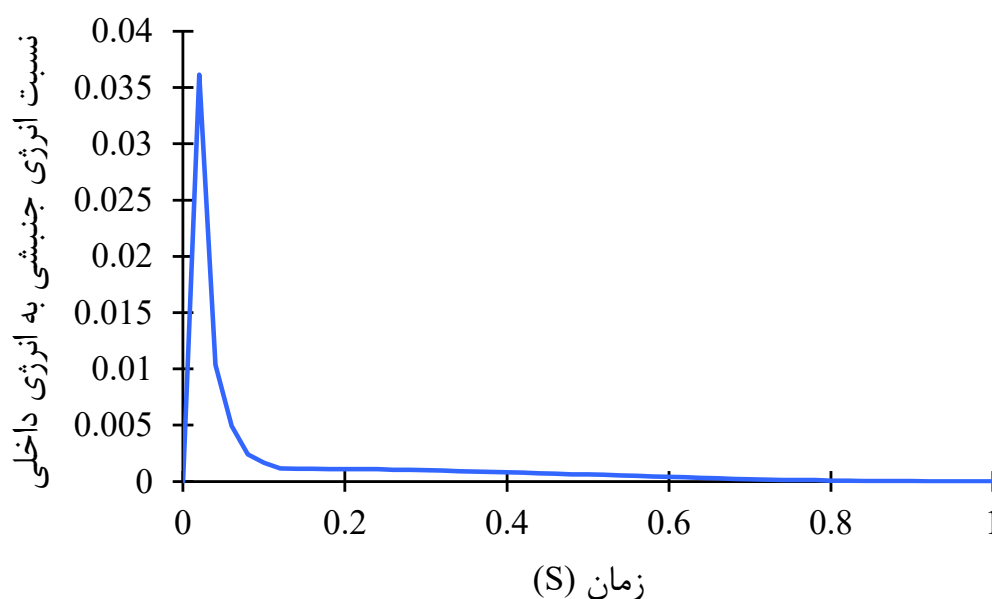
Yield stress (MPa)	Plastic strain
۹۵/۳۵	۰
۹۶/۸۹	۰/۰۰۴
۱۰۶/۳۲	۰/۰۰۸
۱۱۲/۲۵	۰/۰۱۲
۱۱۶/۶۶	۰/۰۱۶
۱۲۰/۲۱	۰/۰۲
۱۳۱/۹۱	۰/۰۴
۱۳۹/۲۷	۰/۰۶
۱۴۴/۷۴	۰/۰۸
۱۴۹/۱۴	۰/۱
۱۶۳/۶۵	۰/۲
۱۷۲/۷۹	۰/۳
۱۷۹/۵۸	۰/۴
۱۸۵/۰۴	۰/۵

ج) تعیین نوع تحلیل، مراحل تحلیل و خروجی‌های موردنظر

در نرم‌افزار آباکوس حل معادلات حاکم بر مدل GTN با روش دینامیکی صریح انجام می‌پذیرد. در این مدل‌سازی مسئله در یک گام^۱ حل می‌شود. زمان گام^۲ حل برابر یک ثانیه در نظر گرفته شد. در بخش Step قسمتی به نام مقیاس‌دهی جرمی وجود دارد که برای افزایش سرعت محاسبات به کار می‌رود. این عمل با افزایش چگالی مواد به صورت ساختگی برای کاهش نمونه‌های مورد نیاز در شبیه‌سازی امکان‌پذیر است. مقیاس‌دهی جرمی می‌تواند موجب خطاهای محاسباتی شود که در استفاده از آن باید دقت شود.

^۱ Step^۲ Step time

اگر چگالی مواد افزایش زیادی داشته باشد، نیروی اینرسی^۱، نتایج تحلیل را تغییر می‌دهد. برای اجتناب از این مسئله لازم است نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی کمتر از ۵٪ باقی بماند. در شکل ۳-۶ منحنی نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی برای نمونه آزمون کشش لوله به ضخامت ۱ mm ارائه شده است. همچنین خروجی‌های مورد نیاز شامل جابه‌جایی‌ها، نیروها و توزیع‌های موجود در ماده، تنش‌ها، کرنش‌ها و کسر حجمی حفره‌ها است.



شکل ۳-۶- نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی برای لوله به ضخامت ۱ mm در آزمون کشش لوله

د) شرایط مرزی و بارگذاری

به منظور اتصال گیره به نمونه آزمون کشش از قید هم‌بندی^۲ استفاده شده است. در بخش بار^۳ شرایط مرزی و نحوه بارگذاری تعیین می‌شود. در این مدل‌سازی با توجه به متقارن بودن مدل تنها یک‌چهارم نمونه مدل‌سازی شده و در دو راستای Z و Y از شرایط مرزی Z-Symm و Y-Symm استفاده شد. به نمونه تحت کشش در راستای Z جابه‌جایی^۴ اعمال شد.

^۱ Inertial

^۲ Tie

^۳ Load

^۴ Displacement

ز) شبکه‌بندی نمونه

در شبیه‌سازی آزمون کشش برای نمونه آزمون از المان C3D8R که یک المان پیوسته هشت گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته^۱ است استفاده شد. در شکل ۷-۳ مدل شبکه‌بندی شده نمونه نشان داده شده است.

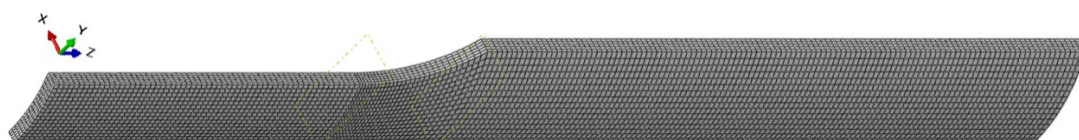


شکل ۷-۳- مدل شبکه‌بندی شده نمونه آزمون کشش

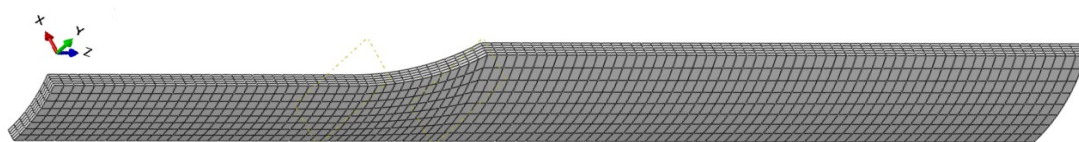
ح) آنالیز استقلال نتایج از شبکه‌بندی

یکی از اشکالات موجود در روش اجزای محدود، وابستگی آن به اندازه مش است. طبق اصل کلی، برای معتبر بودن یک حل اجزای محدود، باید همگرایی صورت گیرد. بدین معنی که از نظر تئوری، هر چه المان‌ها ریزتر انتخاب شوند، جواب‌ها تغییری نکنند. وقوع این اتفاق اصل معتبر بودن حل را تأمین می‌کند. برای دستیابی به این منظور، بهتر است یکی از پارامترهایی که باید همگرایی در مورد آن بررسی شده و اهمیت زیادی دارد، به عنوان خروجی گرفته شود. در این پژوهش پارامتر مورد بررسی، تعداد المان‌ها در نمونه آزمون کشش بود که به ازای آن تعداد المان، منحنی نیرو-جاب‌جایی حاصل از تحلیل المان محدود بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی منطبق شود و این تحلیل به عنوان یک تحلیل همگرا مورد پذیرش قرار گرفت. به منظور انتخاب تعداد المان مناسب در راستای ضخامت نیز تحلیل المان محدود آزمون کشش با تعداد المان متفاوت انجام شد. بر اساس نتایج حاصل از این تحلیل مشخص شد که منحنی نیرو-جاب‌جایی با ۵ المان در راستای ضخامت بیشترین مطابقت را با منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون تجربی دارد. در شکل ۸-۳ نمایی از چهار نوع مش‌بندی مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود با تعداد المان متفاوت نمایش داده شده است.

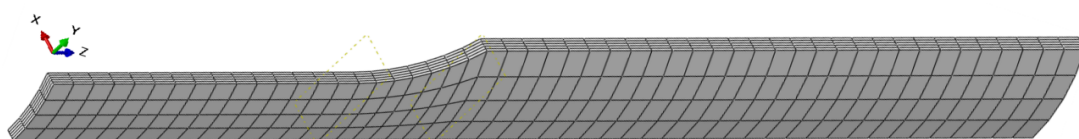
^۱ Reduced integration



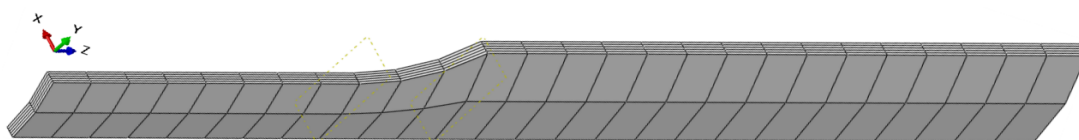
(الف)



(ب)



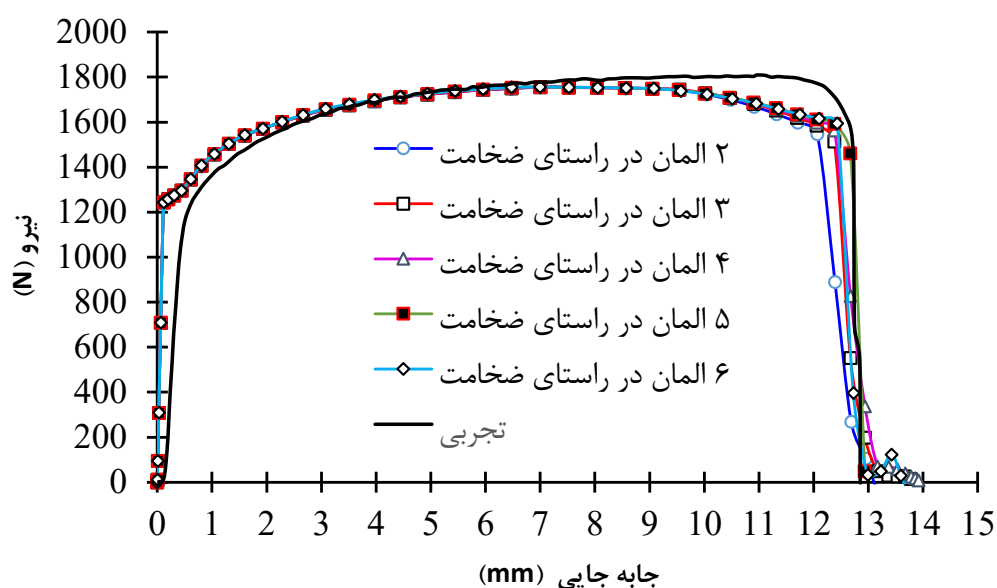
(ج)



(د)

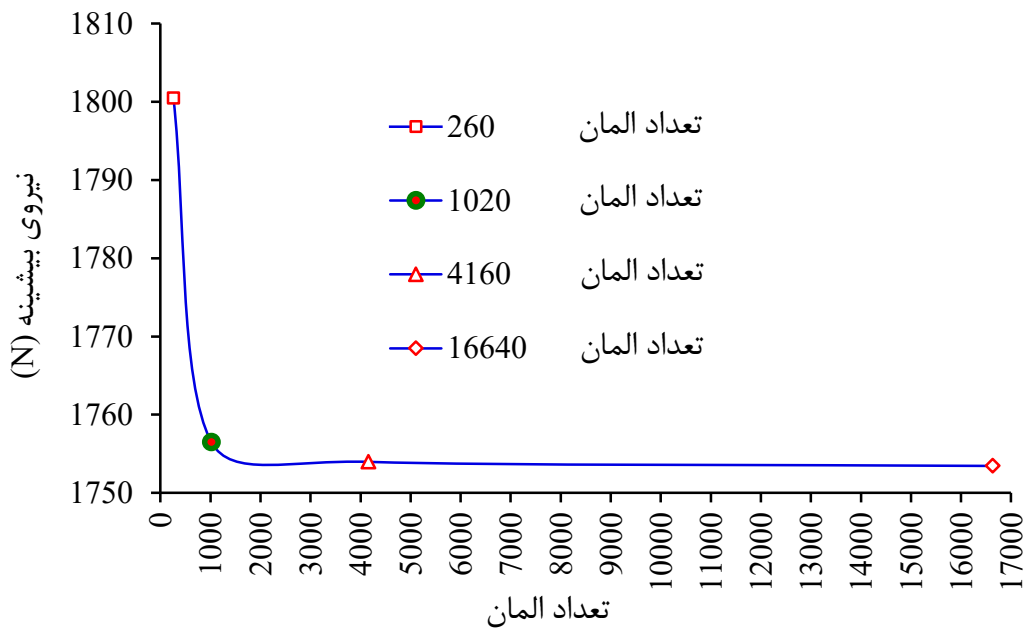
شکل ۳-۸- نمایی از چهار نوع مش‌بندی با تعداد المان متفاوت؛ الف) ۱۶۶۴۰ المان، ب) ۴۱۶۰ المان، ج) ۱۰۲۰ المان، د) ۲۶۰ المان

شکل ۳-۹ نیز منحنی نیرو-جابجایی تحلیل المان محدود را برای تعداد المان متفاوت در راستای ضخامت در آزمون کشش نشان می‌دهد. با توجه به این منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب پنج المان در راستای ضخامت برای انجام مش‌بندی مناسب است.



شکل ۳-۹- منحنی نیرو-جاب‌جایی تحلیل المان محدود برای تعداد المان متفاوت در راستای ضخامت

در شکل ۳-۱۰ منحنی اثر تعداد المان‌ها بر نیروی بیشینه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با اندازه مش خیلی درشت، تغییرات شیب منحنی زیاد بوده و با ریزتر شدن المان‌ها شیب منحنی کمتر شده است تا جایی که در ادامه و با کوچک‌تر شدن اندازه مش (افزایش تعداد المان‌ها) مقدار نیروی بیشینه تغییری نداشته و به عبارتی شیب منحنی تقریباً صفر شده است. برای انتخاب اندازه مش مناسب حالتی در نظر گرفته می‌شود که پس از آن شیب منحنی تقریباً برابر صفر است. بر اساس تحلیل فوق، تعداد کل المان‌ها در نمونه کشش، ۱۰۲۰ المان انتخاب شد.



شکل ۳-۱۰- استقلال نتایج از شبکه‌بندی

۳-۳-۲ روش تعیین پارامترهای مدل شکست نرم گرسون-تورگارد-نیدلمن (GTN)

با توجه به توصیف کامل معیار شکست GTN که در بخش‌های قبل ارائه شد، این مدل دارای نه پارامتر است که مقادیر آنها باید به درستی تعیین شوند. این نه پارامتر عبارت‌اند از: f_F ، f_C ، f_0 ، q_3 ، q_2 ، q_1 ، S_N ، ε_N ، f_N .

بر اساس پیشنهاد تورگارد و نیدلمن [۵۷] و نتایج پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهش‌گران دیگر که در جدول ۳-۳ آمده است، مقادیر پارامترهای تعدیل‌کننده سطح تسلیم یعنی q_1 ، q_2 و q_3 را می‌توان به ترتیب برابر $1/5$ ، 1 و $2/25$ فرض نمود. در واقع q_3 برابر توان دوم q_1 است. همچنین مقدار S_N معمولاً بدون توجه به جنس ماده برابر $0/1$ و مقدار ε_N نیز با توجه به بررسی مقالات همان پژوهش‌گران برابر $0/3$ در نظر گرفته می‌شود [۶۱-۸۱]. مقدار کسر حجمی اولیه حفره، یعنی f_0 نیز، برابر $0/00125$ در نظر گرفته شد [۸۲]. لازم به ذکر است که تعیین اکثر این پارامترها کار آسانی نیست و روش جامع منحصر به فردی برای تعیین آنها وجود ندارد.

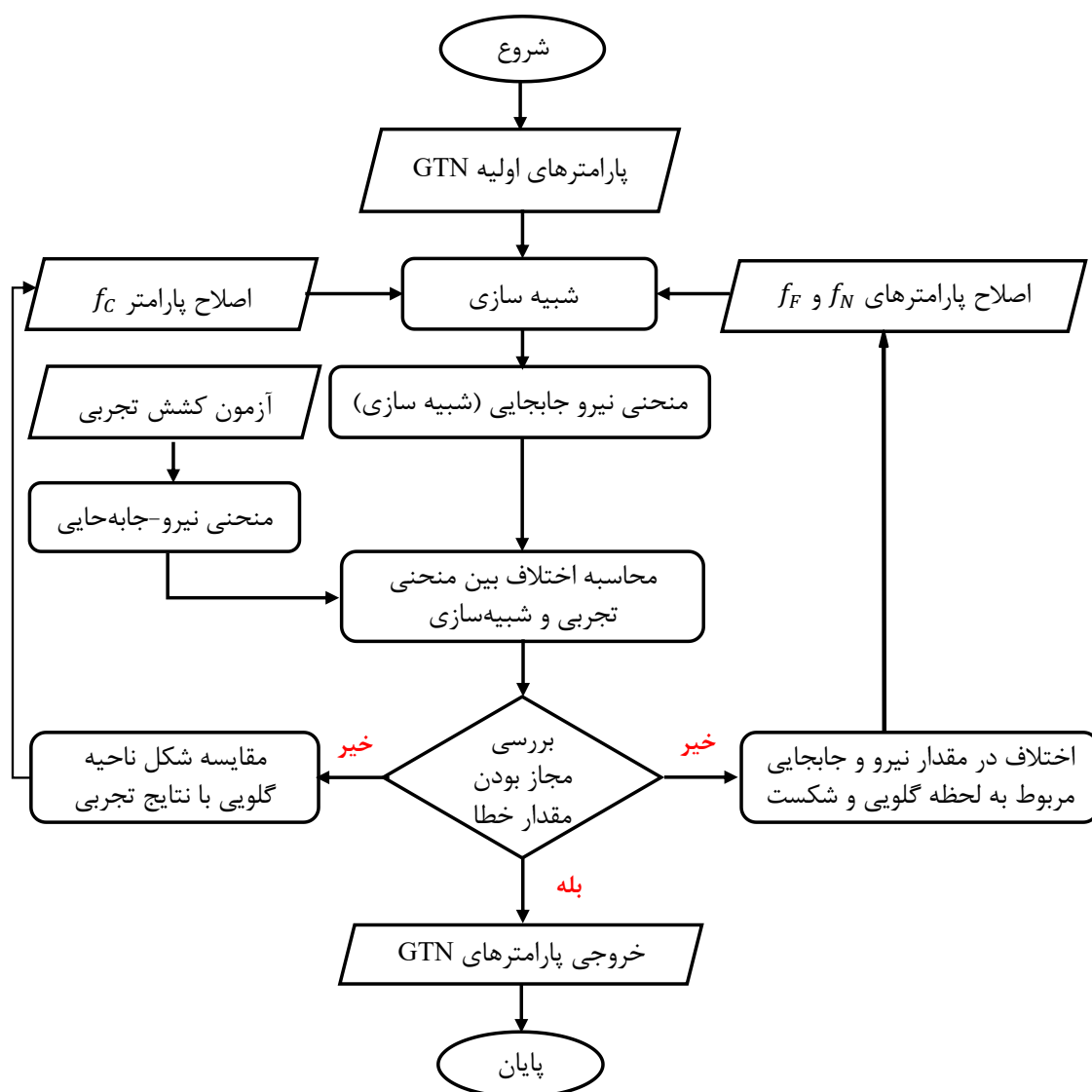
جدول ۳-۳- پارامترهای مدل شکست GTN در پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهش‌گران مختلف

Ref	q_1	q_2	q_3	f_0	f_c	f_F	f_N	ε_N	S_N	material	σ_y (MPa)
[61]	1.5	-	-	0.002	0.004	-	-	-	-	C-Mn steel (at 300 °C)	-
[62]	1.5	-	-	0.0015	0.035	0.15	0.00085	0.3	0.1	E690	779
[63]	1.5	-	-	0.001	0.02	1.141 67	0.04	0.3	0.1	20MnMoNi5 5	-
	1.43			0.114	0.13	0.272	-	-	-		366
	1.1			0.114	0.2	0.35	-	-	-		-
[64]	1.1	-	-	0.114	0.3	0.44	-	-	-	GGG40	-
	1.2	-	-	0.114	0.19	0.235	-	-	-		-
	1.2			0.114	0.175	0.235	-	-	-		-
[65]	1.25	-	-	0.00033	0.026	0.15	0.006	0.3	0.1		370
[66]	1.15	-	-	0.002	0.033	0.15	0.004	0.3	0.1	22NiMoCr37	-
[67]	1.5	-	-	0.077	0.12	0.2	-	-	-	GGG40	230
[68]	1.5	-	-	0.0023	0.004		-	-	-	CMn steel (300 1C)	90
[69]	-			0.001	0.003	-	0.01	-	0.01	AlMgSi alloy	260
[70]	1.5	-	-	-	0.15	0.25	0.04	0.3	0.1	-	-
[71]	1.5	-	-	0.0	0.04	0.195	0.008	0.3	0.1	-	366
[72]	1.5	-	-	0.00057	0.03		0.004	0.3	0.1		612
[73]	1.5	-	-	0.0025	0.021		0.02	0.3	0.1	E460 steel	
[74]	1.25	-	-	0.005	-	0.2	0.001	0.04	0.01	A533B	-
[75]	1.5	-	-	0	0.06	0.212	0.002	0.3	0.1	Steel	440
	1.5			0	0.04	0.197	0.002	0.3	0.1		620
	1.5			0	0.03	0.189	0.002	0.3	0.1		320
[76]	1.25	-	-	0.00033	0.026	0.15	0.006	0.3	0.1	CMn steel	360
[77]	1.47	-	-	0.002	0.028	-	-	0	-	Cu	312

ادامه جدول ۳-۳- پارامترهای مدل شکست GTN در پژوهش‌های انجام‌شده توسط پژوهش‌گران مختلف

Ref	q_1	q_2	q_3	f_0	f_c	f_F	f_N	ϵ_N	S_N	material	σ_y (MPa)
[78]	1.5	1	2.25	0.001	0.01	0.15	0.01	0.3	0.1	StE 690	690
[79]	1.5	1	-	0.000125	0.015	0.25	0.0008	0.3	0.1	API X65	464.5
[80]	1.5	1	2.25	0.001	0.01	0.15	0.01	0.3	0.1	AISI 304	480
[81]	1.1	1	-	0.00015	0.02	0.182	0.005	0.3	0.1	API X100	-

سه پارامتر باقیمانده‌ی این مدل یعنی، f_c ، f_F و f_N به روش کالیبراسیون معکوس^۱ و با استفاده از یک آزمون کشش استاندارد به دست آورده شدند. در این روش به کمک شبیه‌سازی‌های مکرر و توسط یک فلوچارت ساده مطابق شکل ۳-۱۱ مقادیر سه پارامتر ذکرشده در هر بار شبیه‌سازی اجزای محدود آزمون کشش به نحوی تغییر داده شدند تا منحنی نیرو-جابجایی حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی تا حد امکان بر یکدیگر منطبق گردند.



شکل ۳-۱۱- فلوچارت (روند نما) به دست آوردن مقادیر پارامترهای GTN

¹ Inverse calibration

بدین منظور دو تابع هدف به صورت روابط ۳-۱۶ به‌عنوان توابع خطا (مجموع حداقل مربعات) تعریف شدند.

$$\xi = \left[(F_{\max}^{\text{exp}} - F_{\max}^{\text{num}})^2 + (L_{\max}^{\text{exp}} - L_{\max}^{\text{num}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad ۱۶-۳$$

$$\psi = \left[(F_{\text{final}}^{\text{exp}} - F_{\text{final}}^{\text{num}})^2 + (L_{\text{final}}^{\text{exp}} - L_{\text{final}}^{\text{num}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

در این روش به منظور مقایسه منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی برای محاسبه مقدار خطا، مقادیر چهار متغیر شامل نیرو و جابه‌جایی در نقطه با نیروی بیشینه (گلوبی پخشی) و نیرو و جابه‌جایی در نقطه افت شدید نیرو (لحظه شکست) به عنوان متغیرهای شاخص مدنظر قرار گرفت. اعتبار استفاده از نمودار نیرو-جابه‌جایی در این رویه معکوس مطابق با پژوهش‌های گذشته مورد تأیید است [۸۳]. استفاده از روش کالیبراسیون معکوس در پژوهش‌های دیگر نیز دیده می‌شود. به طور نمونه اسپرینگمن و کونا در سال ۲۰۰۵ با استفاده از اختلاف نیروی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و نیروی اندازه‌گیری شده در آزمون تجربی تابع هدفی به‌صورت

$$\Sigma(P) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [F_i(P) - \bar{F}_i(P)]^2 \quad ۱۷-۳$$

تعریف کردند که با بهینه‌سازی این تابع هدف، مقادیر پارامترهای مدل شکست GTN را تعیین کردند [۷۸].

برای ورود مقادیر اولیه پارامترها به چرخه‌ی فلوچارت شکل ۳-۱۱، مقادیر آنها از پژوهش‌های دیگر برای ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ به عنوان پارامترهای اولیه مطابق جدول ۳-۴ استخراج شد و جهت ورود به نرم‌افزار به صورت فرضی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳-۴- مقادیر پارامترهای GTN ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در پژوهش‌های دیگر [۸۲]

پارامتر	q_1	q_2	q_3	f_0	f_C	f_F	f_N	ε_N	S_N
مقدار اولیه	۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۰۰۰۱۲۵	۰/۰۱۳	-	۰/۰۰۰۸	۰/۳	۰/۱

در این پژوهش مقدار f_F گزارش نشده است.

با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف و مقایسه منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی مطابق با فلوچارت نشان داده شده در شکل ۳-۱۱، مقدار خطای مجاز برای ξ و ψ به ترتیب حدود ۲/۸۴ درصد و ۰/۵۲ درصد شد.

۳-۳-۳ تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون کشش

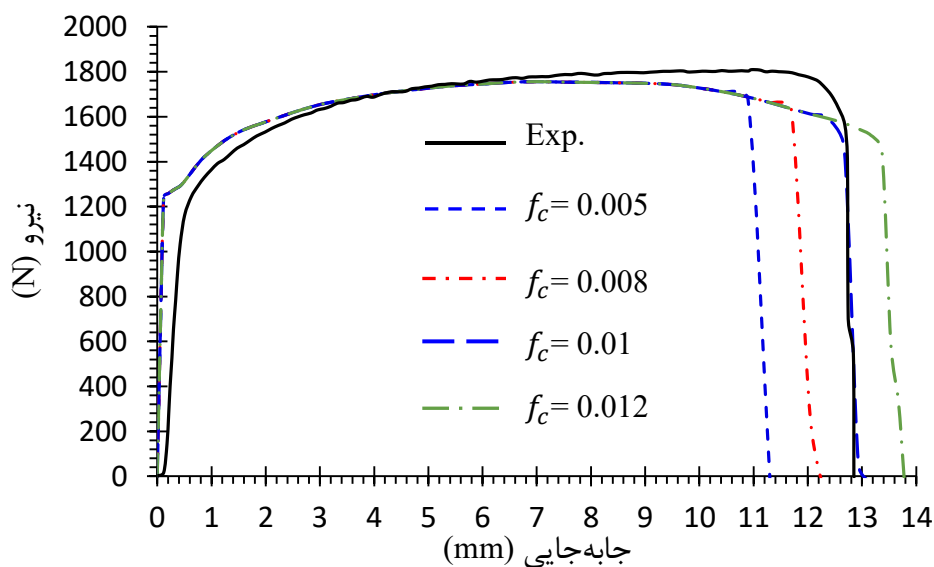
به هنگام بررسی و دستیابی به بهترین ترکیب از مقادیر پارامترهای مورد بررسی یعنی f_c ، f_F و f_N ، اثر آنها بر روی منحنی نیرو-جاب‌جایی ۱۰ مورد آزمون کشش تک‌محوری با توجه به جدول ۳-۵ به کمک نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت.

جدول ۳-۵- مقادیر مربوط به پارامترهای مدل GTN در بررسی اثر آنها بر منحنی نیرو-جاب‌جایی

شماره بررسی	f_c	f_F	f_N	ξ	ψ
۱	۰/۰۰۵			۵۲/۵۵	۱۱۳/۳۹
۲	۰/۰۰۸		۰/۰۰۷۶	۵۲/۵۵	۶۹/۶۵
۳	۰/۰۱			۵۲/۵۵	۲۸/۳۸
۴	۰/۰۱۲			۵۲/۵۵	۱۱۳/۰۲
۵		۰/۰۲۵	۰/۰۰۷۶	۵۲/۵۵	۱۹۰/۳۸
-		۰/۰۲۷		۵۲/۵۵	۲۸/۳۸
۶	۰/۰۱	۰/۰۳		۵۲/۵۵	۵۴/۶۴
۷		۰/۰۳۵		۵۲/۵۵	۵۴/۶۴
۸			۰/۰۰۶۶	۵۲/۶۶	۱۲۵/۴۵
۹		۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۲	۵۲/۷	۱۷۰/۲۴۱
-	۰/۰۱		۰/۰۰۷۶	۵۲/۵۵	۲۸/۳۸
۱۰			۰/۰۰۸۱	۵۲/۶	۳۷/۹۲
نتیجه	۰/۰۱	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۶	۵۲/۵۵	۲۸/۳۸

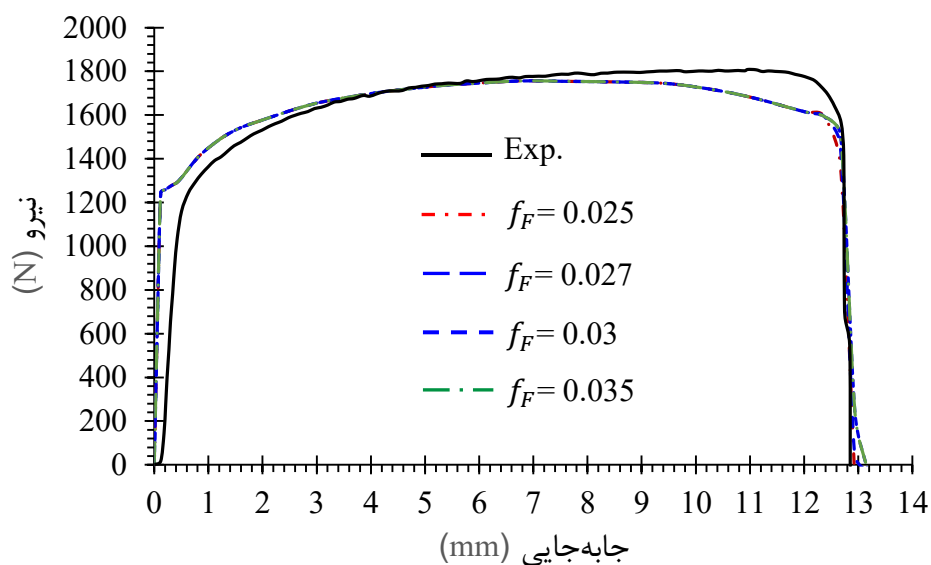
در بررسی اثر این پارامترها چنین فرض شد که تنها یکی از سه پارامتر مورد بررسی تغییر یافته و مقادیر پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شود. ابتدا تغییرات پارامتر f_c مورد مطالعه قرار گرفت که با توجه

به منحنی‌های شکل ۳-۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار این پارامتر، گلوئی و شکست نمونه (به هم پیوستن حفره‌ها) دیرتر اتفاق می‌افتد.



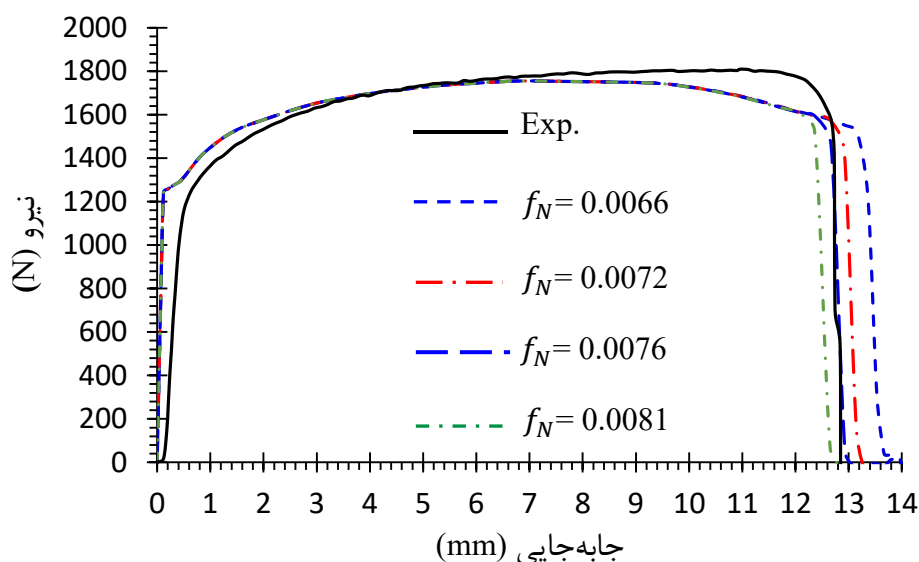
شکل ۳-۱۲- اثر تغییرات پارامتر f_c بر منحنی نیرو-جاب‌جایی

در بررسی اثر پارامتر f_F ، از مشاهده منحنی‌های شکل ۳-۱۳ چنین برمی‌آید که تغییرات این پارامتر به تنهایی تأثیر چندانی بر منحنی نیرو-جاب‌جایی نداشته است.



شکل ۳-۱۳- اثر تغییرات پارامتر f_F بر منحنی نیرو-جاب‌جایی

آخرین پارامتری که در این بررسی مورد مطالعه قرار گرفت، پارامتر جوانه‌زنی حفره‌ها یعنی f_N بود که منحنی‌های مربوط به تغییرات آن در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده‌اند. با توجه به این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار این پارامتر، گلوپی و شکست نمونه به دلیل به هم پیوستن سریع‌تر حفره‌ها زودتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۳-۱۴- اثر تغییرات پارامتر f_N بر منحنی نیرو-جابه‌جایی

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های فوق مشخص شد ترکیبی از پارامترهای مجهول که در این پایان‌نامه تعیین شدند و بیشترین مطابقت را با منحنی نیرو-جابه‌جایی حاصل از آزمون کشش ایجاد نمودند به صورت جدول ۳-۶ است:

جدول ۳-۶- پارامترهای کالیبره شده مدل GTN برای لوله آلومینیومی Al 6061

پارامتر کالیبره شده	مقدار
f_c	۰/۰۱
f_F	۰/۰۲۷
f_N	۰/۰۰۷۶

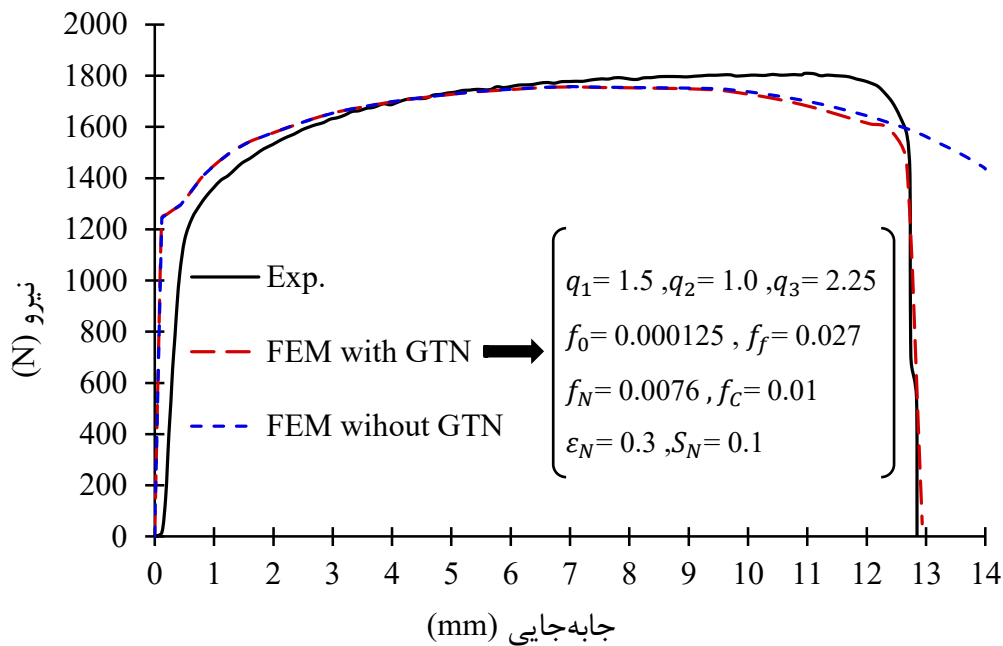
در جدول ۳-۷ نیز مقادیر نه پارامتر مدل شکست GTN برای جنس مذکور آورده شده است.

جدول ۳-۷- مقادیر پارامترهای معیار شکست GTN برای لوله آلومینیومی Al 6061

پارامتر	q_1	q_2	q_3	f_0	f_c	f_f	f_N	ε_N	S_N
مقدار	۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۰۰۰۱۲۵	۰/۰۱	۰/۰۲۷	۰/۰۰۷۶	۰/۳	۰/۱

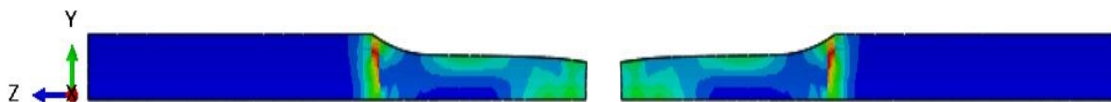
در بررسی و تعیین پارامترهای مدل شکست GTN و استفاده از این پارامترها توجه به این نکته ضروری است که این پارامترها منحصر به فرد نیستند [۸۴].

در شکل ۳-۱۵ منحنی نیرو-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی نمونه آزمون کشش با استفاده از معیار GTN و آزمون تجربی و نیز بدون استفاده از معیار GTN نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در شبیه‌سازی آزمون کشش بدون استفاده از معیار شکست GTN هیچ‌گونه افتی بر روی منحنی مشاهده نمی‌شود ولی با استفاده از معیار مذکور انطباق قابل قبولی بین منحنی تجربی و منحنی شبیه‌سازی شده با این معیار وجود دارد.



شکل ۳-۱۵- منحنی نیرو-جاب‌جایی در سه حالت؛ آزمون کشش تجربی، با ضرایب GTN و بدون ضرایب GTN

در شکل ۳-۱۶ نیز نمونه آزمون کشش شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار آباکوس و با استفاده از مقادیر پارامترهای معیار شکست به کار رفته نشان داده شده است که در آن شکست نمونه قابل رؤیت است.



شکل ۳-۱۶- نمونه کشیده شده در شبیه‌سازی و مشاهده پارگی

۳-۳-۴ مدل‌سازی فرایند سوراخ‌کاری لوله آلومینیومی با استفاده از فشار ابزار الاستومری

الف) تعریف مدل هندسی

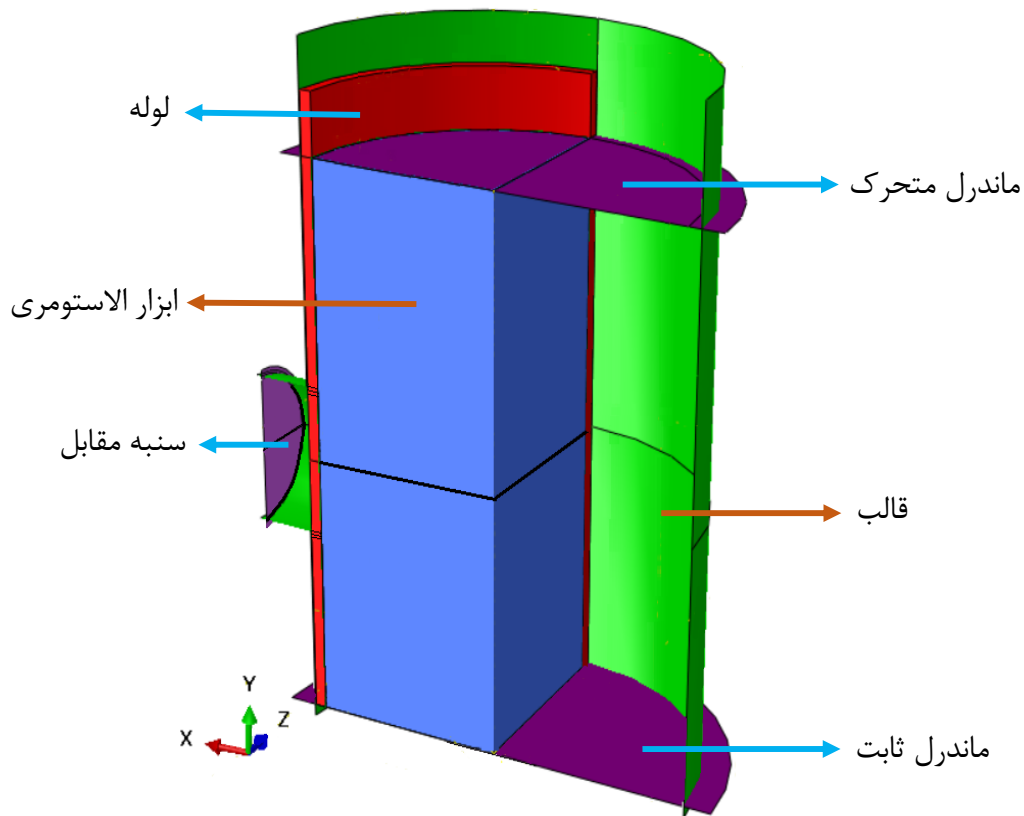
در این بخش مدل سه‌بعدی فرایند سوراخ‌کاری شامل قالب، ماندل متحرک، ماندل ثابت، سنبه مقابل، لوله و ابزار الاستومری انجام شد. در این مدل‌سازی؛ قالب، ماندل ثابت و ماندل متحرک به صورت پوسته‌ای^۱ و از نوع صلب گسسته^۲ انتخاب شد. مدل لوله و ابزار الاستومری نیز از نوع شکل‌پذیر^۳ می‌باشند. علاوه بر قطعات ذکر شده، در قسمتی از قالب و در تعدادی از شبیه‌سازی‌ها سنبه مقابل جهت کنترل جریان ماده و ابزار الاستومری در لحظه وقوع برش تعبیه شده است که آن نیز به صورت پوسته و از نوع صلب گسسته مدل‌سازی شد. در ادامه مدل‌سازی، به هریک از اجزای صلب یک نقطه مرجع^۴ جهت تعریف شرایط مرزی و بارگذاری اختصاص داده شد. لوله آلومینیومی در این شبیه‌سازی دارای قطر خارجی ۳۵ mm، طول ۶۰ mm و ضخامت‌های ۱ mm، ۱/۴ mm و ۱/۸ mm است. همچنین تنها یک چهارم مدل مورد نظر شبیه‌سازی شده است. در شکل ۳-۱۷ مدل هندسی اجزای فرایند ارائه شده است.

^۱ Shell

^۲ Discret rigid

^۳ Deformable

^۴ Reference point



شکل ۳-۱۷- مدل هندسی اجزای فرایند سوراخ‌کاری لوله

ب) خصوصیات لوله آلومینیومی

لوله آلومینیومی به صورت یک ماده با خواص کشسان-مومسان در نظر گرفته شد که خواص مکانیکی آن در جدول ۳-۸ مشاهده می‌شود. همچنین فرض شد که ماده در ناحیه تغییر شکل مومسان یکنواخت از قانون توانی (هولومون) پیروی می‌کند. شکل کلی این قانون به صورت معادله ۳-۱۸ است:

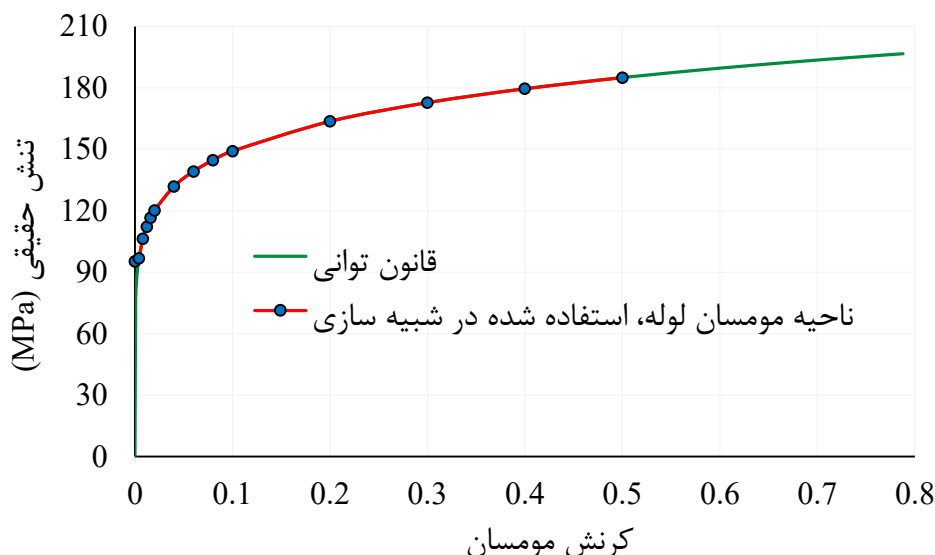
$$\bar{\sigma} = k \bar{\epsilon}^n \quad ۳-۱۸$$

در این معادله k و n به ترتیب ضریب کارسختی و نمای کارسختی ماده هستند. برای نمونه‌های آزمون k و n ثابت‌های معادله توانی $\bar{\sigma} = k \bar{\epsilon}^n$ محاسبه شدند که این مقادیر نیز در جدول ۳-۸ ارائه شده‌اند.

جدول ۳-۸- خواص مکانیکی لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

نمای کارسختی n	ضریب کارسختی k (MPa)	چگالی (kg/m^3)	مدول کشسان (GPa)	ضریب پواسون ν
۰/۱۳۴	۲۰۳/۰۵	۲۷۰۰	۷۰	۰/۳۳

برای تعیین تنش تسلیم و ناحیه مومسان لوله، منحنی تنش-کرنش مومسان به دست آمده از آزمون کشش تک‌محوری مطابق با شکل ۳-۱۸ به کار گرفته شد.



شکل ۳-۱۸- منحنی تنش-کرنش حقیقی لوله آلومینیومی و ناحیه مومسان استفاده شده در شبیه‌سازی

ج) الاستومرها

الاستومرها به علت توانایی تحمل کرنش‌های خیلی بزرگ بدون هیچ‌گونه گسیختگی و تغییر شکل دائمی، موادی ایده آل برای بسیاری از کاربردها هستند. از این رو، الاستومر به عنوان یک ماده‌ی مهندسی، کاربردهای گسترده‌ای در صنعت اتومبیل، نصب انواع موتورها، ساخت تایرها، جداگرهای لرزه‌ای، تکیه‌گاه‌های سازه‌ای، میراگرها و وسایل پزشکی دارند. همین عوامل اهمیت پیش‌بینی رفتار الاستومرها، مثل توزیع تنش-کرنش در المان‌های آنها را پراهمیت می‌کند. اما انتخاب مدل رفتاری دقیق که بتواند رفتار الاستومرها را در کرنش‌های مختلف به خوبی محاسبه کند چالشی در مدل‌سازی المان محدود این مواد محسوب می‌شود. به منظور پیش‌بینی رفتار غیرخطی الاستومرها، مدل‌های رفتاری آنها سال‌هاست که توسعه یافته است. رفتار ابرکشسان^۱ به دلیل غیرخطی بودن رابطه‌ی بین تنش-کرنش، به جای قانون هوک در این مواد برقرار است [۸۵].

^۱ Hyperelastic

ج- (۱) خصوصیات الاستومر مورد استفاده در پژوهش حاضر

در پژوهش حاضر از یک الاستومر از جنس پلی‌اورتان به شکل استوانه به‌عنوان جایگزین سنبه برش‌کاری در داخل لوله استفاده شد. جهت تعیین خواص مکانیکی این ماده الاستومری، رفتار مدل الاستومر تراکم‌ناپذیر به‌صورت چندجمله‌ای ابرکشسان با مدل انرژی کرنشی درجه یک مونی-ریولین بکار گرفته شد. ضرایب مونی-ریولین در شبیه‌سازی عددی برای ابزارهای پلی‌اورتان مورد استفاده در جدول ۳-۹ آمده است.

جدول ۳-۹- خصوصیات مکانیکی پلی‌اورتان با سختی‌های متفاوت [۸۶]

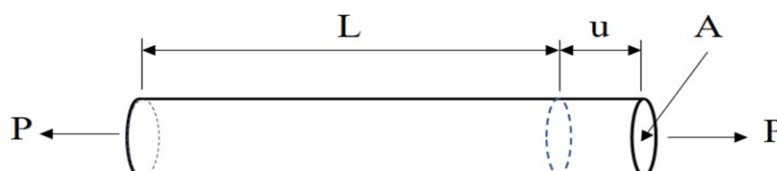
سختی ابزار الاستومری (Shore-A)	C_{10} (MPa)	C_{01} (MPa)	ضریب پواسون ν	چگالی (kg/m^3)
۵۰	۰/۳۰۲	۰/۰۷۶		
۷۰	۰/۷۳۶	۰/۱۸۴	۰/۴۹۹	۲۰۰۰
۹۰	۲/۸۲۴	۰/۷۰۶		

ج- (۲) بیان تابع انرژی کرنشی برحسب ثوابت تنسور تغییر شکل و خصوصیات ابزار

الاستومری

تفاوت بین یک ماده انعطاف‌پذیر خطی و یک ماده ابرکشسان در این واقعیت است که در مواد ابرکشسان رابطه‌ی تنش-کرنش از یک تابع چگالی انرژی کرنشی حاصل می‌شود. مفهوم تابع انرژی کرنشی را می‌توان با مثالی از یک میله الاستیک غیرخطی که در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است توصیف نمود

[۸۷].



شکل ۳-۱۹- میله‌ی الاستیک غیرخطی [۸۷]

برای تجزیه و تحلیل مواد ابرکشسان، کرنش (ε) اغلب توسط نسبت کشش (λ) جایگزین می‌شود که به صورت تقسیم طول لحظه‌ای بر طول اولیه با رابطه‌ی ۱۹-۳ تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{(l_1 - l_0) + l_0}{l_0} = \frac{l_0 + u}{l_0} = \varepsilon + 1 \quad 19-3$$

چگالی انرژی کرنشی به عنوان یک تابع، به شکل $W(\lambda)$ تعریف می‌شود که چگالی انرژی کرنشی را در حجم تغییر شکل نیافته از میله نشان می‌دهد. انرژی کرنشی کل U ، به صورت ضرب $W(\lambda)$ در حجم تغییر شکل نیافته با رابطه‌ی ۲۰-۳ بیان می‌شود:

$$U = Al_0 W(\lambda) \quad 20-3$$

نمو کار انجام‌شده توسط نیروی خارجی F ، باید برابر با نمود انرژی کرنشی کل باشد. بنابراین، تعادل انرژی به صورت رابطه ۲۱-۳ بیان می‌شود:

$$F du = dU \quad 21-3$$

نمود انرژی کرنشی کل با استفاده از $W(\lambda)$ را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۲۲-۳ بیان نمود:

$$dU = Al_0 \frac{dW(\lambda)}{d\lambda} d\lambda \quad 22-3$$

نمود جابه‌جایی نیز می‌تواند به صورت تابعی از نسبت کشش به شکل رابطه ۲۳-۳ نوشته شود.

$$\lambda = \frac{l_0 + u}{l_0} \Rightarrow u = (\lambda - 1)l_0 \quad 23-3$$

با مشتق‌گیری از u خواهیم داشت:

$$du = l_0 d\lambda \quad 24-3$$

که با جای‌گذاری آنها در معادله تعادل انرژی تسلیم (رابطه‌ی ۲۱-۳) داریم:

$$Fl_0 d\lambda = Al_0 \frac{dW(\lambda)}{d\lambda} d\lambda \Leftrightarrow \frac{F}{A} = \frac{dW(\lambda)}{d\lambda} \Leftrightarrow \sigma = \frac{dW}{d\lambda} \quad 25-3$$

بنابراین، بر اساس این مثال یک‌بعدی، نشان داده شد که تنش را می‌توان به طور مستقیم از تابع انرژی کرنشی به دست آورد.

در حالت چند محوره، تنش‌ها به روش مشابهی از تابع چگالی انرژی کرنشی به دست می‌آیند. در این شرایط، کرنش اندازه‌گیری شده، تنسور تغییر شکل کوشی-گرین چپ، B است. فرض کلی این است که W به تمام اجزای کرنش اندازه‌گیری به شکل رابطه‌ی ۳-۲۶ وابسته است:

$$W = W(B) \quad ۳-۲۶$$

با این حال، وضعیت تغییر شکل به طور کامل توسط ترم‌های کشش‌های اصلی و جهت‌های اصلی (n) تعیین می‌شود. در مواد همسانگرد، تابع چگالی انرژی کرنشی را می‌توان به شکل رابطه‌ی ۳-۲۷ نوشت:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, n_1, n_2, n_3) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad ۳-۲۷$$

برای به دست آوردن کشش‌های اصلی لازم است که ریشه‌های مشخصه چندجمله‌ای B را پیدا کرد. از آنجا که به دست آوردن ضرایب چندجمله‌ای مشخصه ساده‌تر است، به جای استفاده از کشش‌های اصلی، می‌توان W را به صورت تابعی از نامتغیرهای تنسور B (ثوابت تغییر شکل) به صورت رابطه‌ی ۳-۲۸ بیان کرد:

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

$$I_1 = \text{tr}(B) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad ۳-۲۸$$

$$I_2 = \frac{1}{2}((\text{tr} B)^2 - \text{tr}(B^2)) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

$$I_3 = \det(B) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

در مواد تراکم ناپذیر، $I_3 = 0$ است. بنابراین تابع چگالی انرژی کرنشی W به صورت $W = W(I_1, I_2)$ ارائه می‌شود که در مواد تراکم ناپذیر کشسان همسانگرد می‌توان به صورت تابعی خطی از $(I_1 - 3)$ و $(I_2 - 3)$ به شکل رابطه‌ی ۳-۲۹ بیان کرد:

$$W_0 = C_{ij}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad ۳-۲۹$$

که در آن $C_{ij}(i, j=1, \dots, n)$ ثابت‌های مربوط به ماده است. تابع انرژی پتانسیل در مدل مونی-ریولین برای مواد ابرکشسان تراکم ناپذیر به شکل معادله‌ی ۳-۳۰ بیان می‌شود.

$$W^M = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) \quad ۳۰-۳$$

که در این رابطه W^M انرژی کرنشی در واحد کسر حجمی اولیه، C_{01} و C_{10} دو پارامتر ماده و $\bar{I}_1$ و $\bar{I}_2$ ثابت‌های اول و دوم تنسور کرنش انحرافی^۱ می‌باشند که توسط ترم‌های کشش اصلی انحرافی $\bar{\lambda}_1$ و در قالب رابطه‌ی ۳-۳۱ تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \\ \bar{I}_1 &= \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \end{aligned} \quad ۳۱-۳$$

با فرض تراکم ناپذیری ابزار الاستومری همانند اکثر مواد با خواص کشسان، در آزمون تغییر شکل تک‌محوری در راستای کشش ۱ و با در نظر گرفتن روابط ۳-۳۲ می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \\ \lambda &= \frac{l_1}{l_0} = \frac{l_1 - l_0 + l_0}{l_0} = \varepsilon_1 + 1 \end{aligned} \quad ۳۲-۳$$

و اینکه λ نسبت کشش در راستای ۱ است روابط ۳-۳۳ برقرار است.

$$\lambda_1 = \lambda; \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{(-\frac{1}{2})}; \quad \lambda = 1 + \varepsilon_1 \quad ۳۳-۳$$

ثابت‌های کرنش در آزمون کشش تک‌محوری در قالب رابطه‌ی ۳-۳۴ بیان می‌شوند.

$$\bar{I}_1 = I_1 = \lambda^2 + 2\lambda^{-1}; \quad \bar{I}_2 = I_2 = \lambda^{-2} + 2\lambda \quad ۳۴-۳$$

با استفاده از پتانسیل انرژی کرنشی می‌توان وابستگی بین تنش اسمی و تابعی از کرنش را تعیین نمود که برای مدل مونی-ریولین رابطه ۳-۳۵ حاصل می‌شود.

$$\frac{P}{A_0} = 2 \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) (\lambda C_{10} + C_{01}) = 2 \left\{ \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) C_{10} + \left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) C_{01} \right\} \quad ۳۵-۳$$

^۱ Deviatoric

در رابطه بالا P نیروی محوری خارجی در آزمون، A_0 سطح مقطع اولیه و λ نسبت کشش^۱ است که از رابطه ۳-۳۶ تعیین می‌شود.

$$\lambda = \frac{h}{h_0} \quad ۳-۳۶$$

که در آن h و h_0 به ترتیب ارتفاع لحظه‌ای و اولیه ابزار الاستومری است.

در یک رابطه بندی کلی برای مدل مونی-ریولین، می‌توان به کمک رابطه ۳-۳۷ پارامترهای C_{10} و C_{01} را تعیین نمود [۸۸].

$$C = \frac{P}{2A_0(1 - \lambda^{-3})} = \lambda C_{10} + C_{01} \quad ۳-۳۷$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تابع C یک تابع خطی برحسب λ است که شیب آن برابر C_{10} و عرض از مبدأ آن C_{01} است.

د) مونتاژ اجزای قالب

در این بخش تمامی مدل‌های هندسی که در بخش Part به صورت جداگانه ایجاد شده‌اند، باید در موقعیت مناسبی نسبت به هم استقرار یابند تا هندسه کلی فرایند شکل یابد.

ه) تعیین تعداد مراحل و نوع حل مسئله

در این مدل‌سازی، مسئله در یک گام حل می‌شود. با توجه به تغییر شکل زیاد لوله که از فرایندهای شکل‌دهی است و شرایط پیچیده تماسی، از حلگر صریح دینامیکی استفاده شد. زمان گام حل برابر یک ثانیه در نظر گرفته شد.

^۱ Stretch ratio

و) تعیین نوع تماس سطوح اجزاء با یکدیگر

در این پژوهش، اثر متقابل سطوح^۱ به صورت تماس عمومی^۲ انتخاب شد. شرایط تماس نیز از نوع مکانیکی با رفتار مماسی^۳ و با مدل اصطکاک پنالتی با ضریب اصطکاک ۰/۱ تعیین شد. ضریب اصطکاک بین لوله و ابزار الاستومری نیز برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد [۳۵]. بر هم کنش بین ماندل متحرک و قالب نیز در نظر گرفته نشده است.

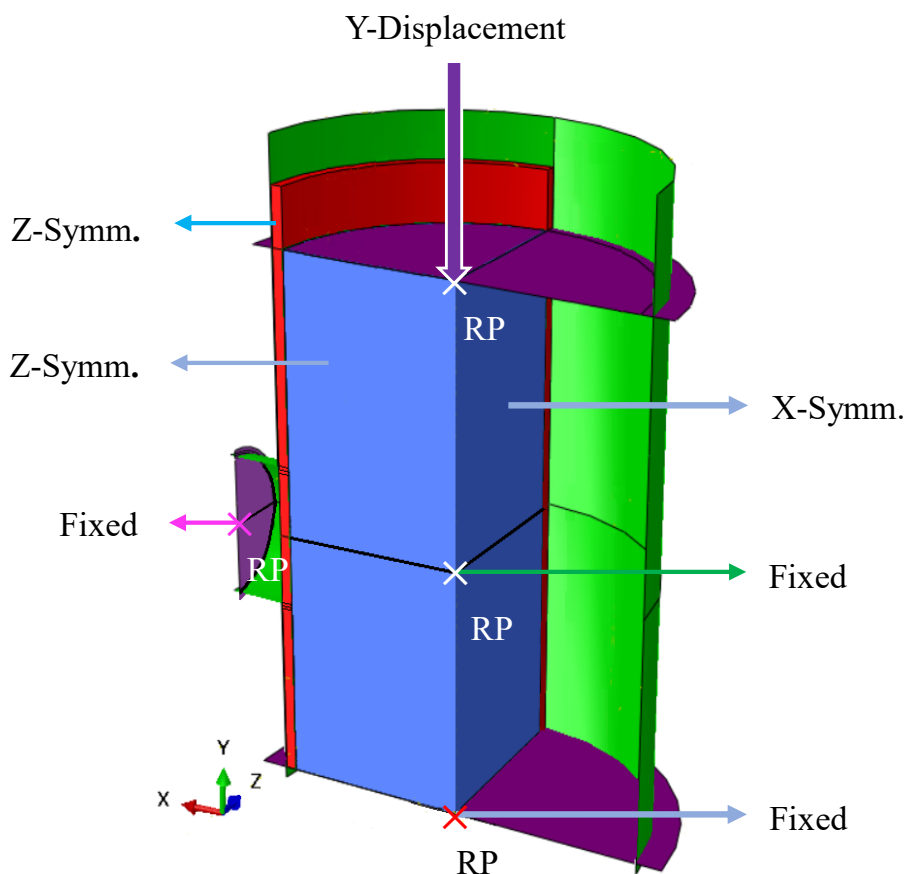
ز) شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی به کار رفته در این مدل‌سازی به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول مربوط به قیدهای تقارن است که در دو جهت X و Z به ابزار الاستومری و در جهت Z به لوله اعمال شده است. قیدهای دسته‌ی دوم از نوع بدون حرکت‌اند که به گره مرجع قالب، ماندل ثابت و سنبه مقابل نسبت داده شده است. سپس به منظور فراهم نمودن نیروی سوراخ‌کاری، به گره مرجع ماندل متحرک، قید جابه‌جایی اعمال شده است. شکل ۳-۲۰ شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

^۱ Interaction

^۲ General Contact

^۳ Tangential Behavior

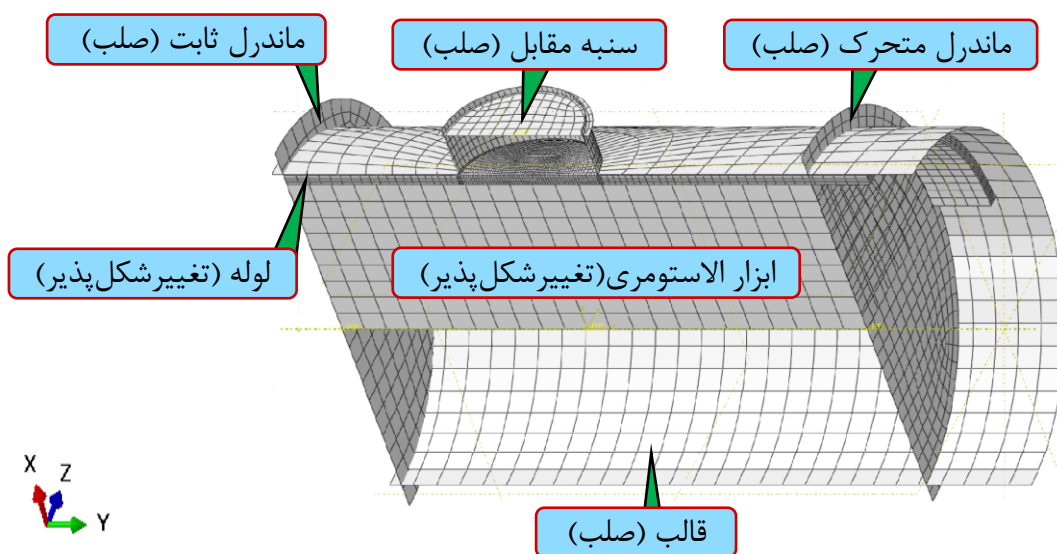


شکل ۳-۲۰- شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی

ح) شبکه‌بندی

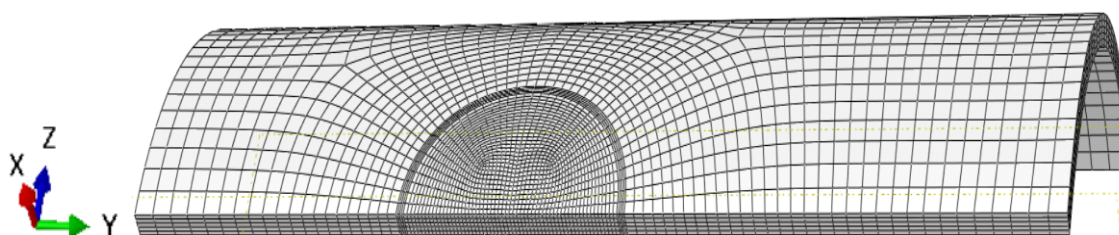
برای شبکه‌بندی قالب، ماندل ثابت، ماندل متحرک و سنبه مقابل، المان از نوع R3D4 که یک المان صلب سه‌بعدی با تعداد چهار گره^۱ است، استفاده شد. برای لوله و ابزار الاستومری نیز المان از نوع C3D8R که المانی پیوسته، سه‌بعدی، هشت‌گره‌ای و با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته است؛ انتخاب شد. در شکل ۳-۲۱ نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی اجزاء قالب نمایش داده شده است.

^۱ 4-node 3D rigid



شکل ۳-۲۱- نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی اجزاء قالب و لوله

در شکل ۳-۲۲ نیز شبکه‌بندی لوله در فرایند سوراخ‌کاری با ابزار الاستومری نمایش داده شده است.



شکل ۳-۲۲- نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی لوله

ط) تحلیل فرایند

تحلیل‌های این مدل‌سازی با استفاده از یک رایانه با پردازنده چهار هسته‌ای ۲/۶ گیگاهرتزی انجام شد و زمان تقریبی حل برای هریک از شبیه‌سازی‌ها حدود ۱۸۰۰ s بوده است.

۳-۴- شرایط آزمون‌های شبیه‌سازی شده در فرایند سوراخ کاری لوله

برای شبیه‌سازی فرایند سوراخ کاری با نرم‌افزار آباکوس هشت مورد شبیه‌سازی با در نظر گرفتن شرایط مختلف از جمله تغییر ضخامت لوله، اثر سختی ابزار الاستومری و استفاده یا عدم استفاده از سنبه مقابل مطابق با جدول ۳-۱۰ انجام شد.

جدول ۳-۱۰- شرایط آزمون‌های طراحی شده در شبیه‌سازی فرایند سوراخ کاری

شماره آزمون	آزمون تجربی معادل	ضخامت لوله	سختی ابزار الاستومری	با / بدون سنبه مقابل
S01	T01 و T02	۱	۸۵	×
S02	T03	۱	۸۵	✓
S03	T04	۱	۵۰	×
S04	T05 و T06	۱	۵۰	✓
S05	T07 و T08	۱/۴	۸۵	×
S06	T09 و T10	۱/۴	۸۵	✓
S07	T11 و T12	۱/۸	۸۵	×
S08	T13 و T14	۱/۸	۸۵	✓

فصل ۴ نتایج و بحث

در این فصل، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی همراه با تصاویر و نمودارهای آن، ارائه شده است. به همین منظور ابتدا نتایج حاصل از آزمون کشش تک‌محوری و نیز نتایج حاصل از آزمون فشار ابزار الاستومری جهت تعیین ضرایب مدل مونی-ریولین بیان شد. در ادامه تأثیر پارامترهای مورد بررسی شامل اثر ضخامت لوله، سختی ابزار الاستومری و نیروی مورد نیاز برش برای ایجاد یک سوراخ دایره‌ای در لوله، مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های شبیه‌سازی شده فرایند سوراخ‌کاری با نمونه‌های قطعات سوراخ‌کاری شده به کمک ابزار الاستومری در آزمایشگاه مقایسه شد.

۴-۱- نتایج آزمون تعیین خواص مکانیکی

۴-۱-۱ آزمون کشش تک‌محوری

اطلاعات خروجی آزمون کشش تک‌محوری از دستگاه اینسترون شامل داده‌های مربوط به نیرو و جابه‌جایی فک‌های دستگاه است که با تقسیم نیرو بر سطح مقطع و تعیین کرنش محدوده گیج نمونه تحت آزمون کشش، منحنی تنش کرنش مهندسی محاسبه شد. منحنی تنش-کرنش مهندسی بر

اساس مقادیر بار-ازدیاد طول رسم می‌شود. شکل منحنی تنش-کرنش هر فلز به ترکیب شیمیایی، عملیات حرارتی، تاریخچه قبلی تغییر شکل مومسان، نرخ کرنش، دما و حالت تنش در هنگام آزمون بستگی دارد. منحنی تنش-کرنش مهندسی نشان‌دهنده دقیق ویژگی‌های تغییر شکل یک فلز نیست؛ زیرا این منحنی بر مبنای ابعاد اولیه نمونه به دست می‌آید و این در حالی است که ابعاد نمونه در طول آزمون دائماً تغییر می‌کند همچنین یک فلز انعطاف‌پذیر تحت آزمون کشش ناپایدار شده و دچار گلوپی می‌شود. بنابراین از آنجا که در این مرحله از آزمون سطح مقطع نمونه به سرعت کاهش می‌یابد، بار مورد نیاز برای ادامه تغییر شکل نیز کم می‌شود. تنش متوسط بر اساس سطح مقطع اولیه کاهش یافته و این مسئله موجب افت منحنی تنش-کرنش مهندسی بعد از نقطه حداکثر بار می‌شود، اما در واقع فلز تا لحظه شکست به کرنش سختی ادامه می‌دهد و تنش مورد نیاز برای تغییر شکل افزایش می‌یابد. اگر تنش واقعی بر اساس سطح مقطع واقعی نمونه‌ها در نظر گرفته شوند، منحنی تنش-کرنش به‌طور پیوسته تا ایجاد شکست افزایش می‌یابد. اگر مقدار کرنش نیز بر اساس اندازه‌گیری لحظه‌ای باشد، منحنی حاصل موسوم به منحنی تنش-کرنش حقیقی است. منحنی تنش کرنش حقیقی را منحنی جریان نیز می‌نامند، زیرا معرف ویژگی‌های جریان مومسان ماده است. در این منحنی مقادیر کرنش نیز برحسب مقادیر لحظه‌ای محاسبه می‌شود. رابطه‌ی بین تنش حقیقی σ و تنش مهندسی S به صورت رابطه ۱-۴ است.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} (1 + e) = s(1 + e) \quad 1-4$$

که در آن P نیروی کشش وارد بر نمونه، A_0 سطح مقطع اولیه نمونه و e کرنش مهندسی است که با فرض ثابت بودن حجم نمونه در طی آزمون همراه است ($AL = A_0 L_0$). کرنش واقعی، از تقسیم لحظه‌ای طول نمونه (dL) بر طول واقعی (L) طبق رابطه ۲-۴ به دست می‌آید.

$$\int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad 2-4$$

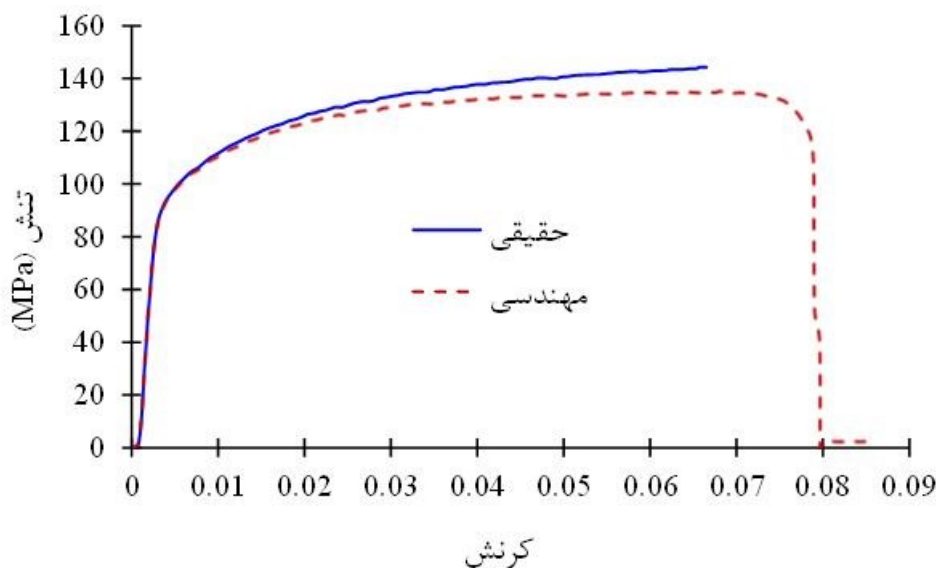
رابطه کرنش حقیقی ϵ برحسب کرنش مهندسی e نیز به صورت رابطه ۳-۴ است.

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad ۳-۴$$

رابطه ۳-۴ را تا شروع گلویی شدن می‌توان به کاربرد. پس از شروع گلویی، کرنش حقیقی از سطح مقطع حقیقی یا بر مبنای قطر واقعی، طبق رابطه ۴-۴ به دست می‌آید.

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{(\pi D_0^2)/4}{(\pi D^2)/4} = 2 \ln \frac{D_0}{D} \quad ۴-۴$$

در شکل ۱-۴ منحنی تنش-کرنش حقیقی و تنش-کرنش مهندسی لوله آلومینیومی مورد استفاده در این پژوهش که با استفاده از روابط بین تنش-کرنش حقیقی و تنش-کرنش مهندسی (روابط بالا) به دست آمده، نمایش داده شده است.



شکل ۱-۴- منحنی تنش-کرنش حقیقی و مهندسی بر اساس نتایج آزمون کشش تک‌محوری

در شکل ۲-۴ نمونه پس از اجرای آزمون کشش تک‌محوری و به وجود آمدن گلویی موضعی در آن نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- نمونه آزمون کشش پس از اجرای آزمون و تشکیل گلویی موضعی

۴-۱-۲ خصوصیات مکانیکی لوله آلومینیومی

لوله آلومینیومی مورد استفاده در این پژوهش به صورت یک ماده با خواص کشسان-مومسان در نظر گرفته شد که از قانون توانی (هولمن) پیروی می‌کند. برای نمونه‌های آزمون کشش، تنش تسلیم مطابق با کرنش 0.002 ، تنش نهایی، درصد ازدیاد طول و همچنین k و n ثابت‌های معادله توانی $\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n$ محاسبه شد که این مقادیر در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

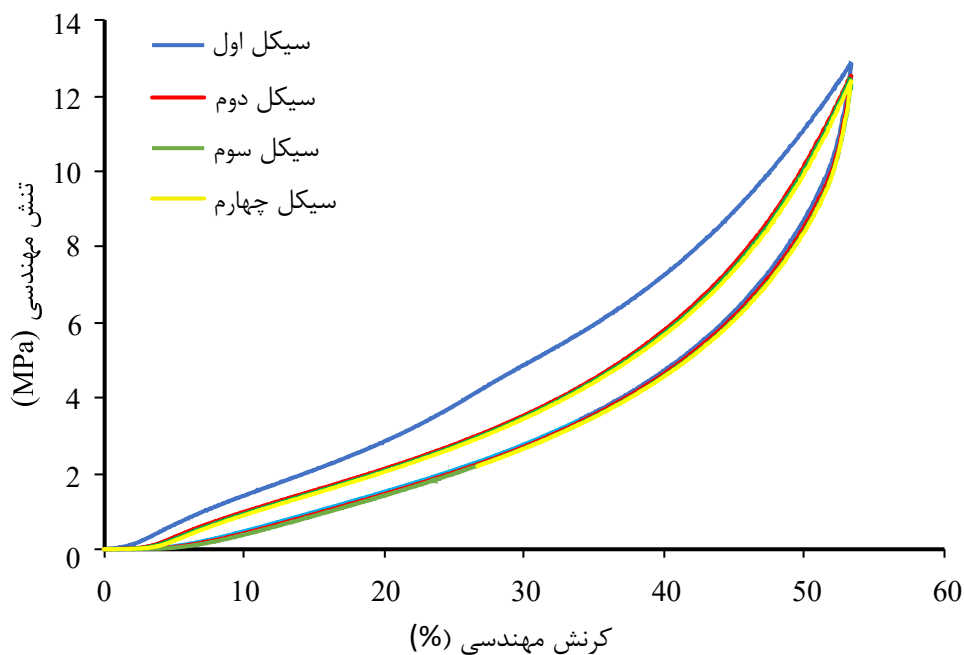
جدول ۴-۱- خواص مکانیکی لوله آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

نمای کارسختی n	ضریب کارسختی k (MPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)
۰/۱۳۴	۲۰۳/۰۵	۱۳۵/۱	۹۵/۳	۸/۵

۴-۱-۳ آزمون فشار ابزار الاستومری

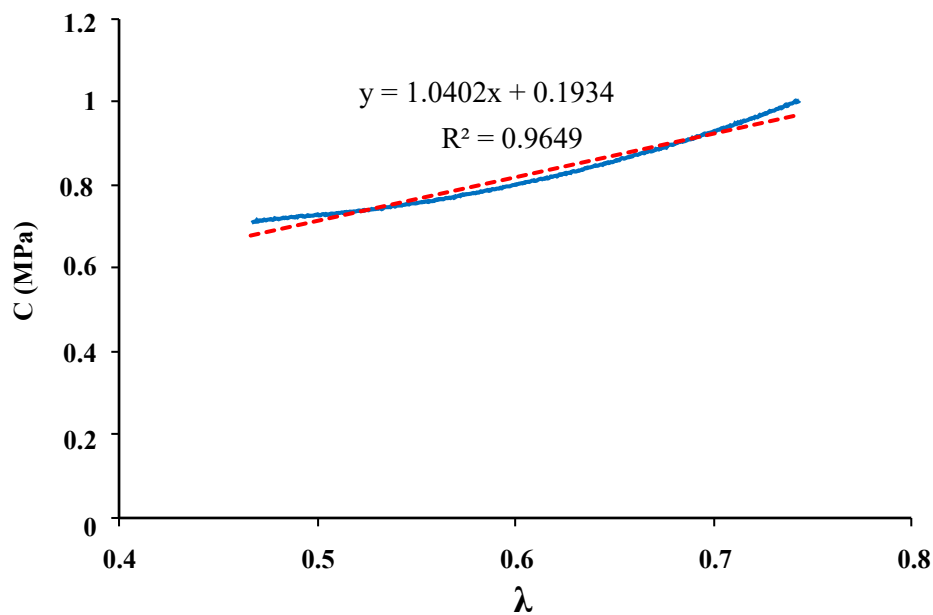
منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی و تنش-کرنش مواد الاستومری عموماً دارای حلقه‌ی هیستریزیس^۱ می‌باشند که پس از چند مرحله بارگذاری سیکل به حالت اشباع می‌رسد. به همین جهت آزمون فشار بر روی ابزار الاستومری در چند سیکل بارگذاری و باربرداری انجام شد که منحنی تنش-کرنش مربوط به پلی‌اورتان (PU) در شکل ۴-۳ ارائه شده است.

^۱ Hysteresis loop



شکل ۴-۳- منحنی تنش-کرنش فشاری پلی‌اورتان با سختی Shore-A ۸۵

مشاهده می‌شود که از سیکل دوم به بعد منحنی تنش-کرنش بر هم منطبق شده است. از این رو برای تعیین ثوابت مونی-ریولین که روابط آن در فصل سوم بیان شد، از رفتار ماده در سیکل بارگذاری دوم استفاده شد. در شکل ۴-۴ منحنی $C = \frac{p}{2A_0(1-\frac{1}{\lambda^3})}$ برحسب λ در ناحیه خطی رسم شده است که طبق روابط گفته شده C_{10} و C_{01} به ترتیب برابر $1/0.4 \text{ MPa}$ و $0/193 \text{ MPa}$ است [۳۵]. برای ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۵۰ نیز ضرایب مونی-ریولین یعنی C_{10} و C_{01} طبق جدول ۳-۹ به ترتیب برابر $0/302 \text{ MPa}$ و $0/076 \text{ MPa}$ می‌باشند.



شکل ۴-۴- منحنی C برحسب λ

۴-۲- نتایج تجربی و عددی فرایند سوراخ کاری لوله با ابزار الاستومری

با توجه به اینکه در فرایندهای برش و سوراخ کاری یکی از پارامترهای مهم فرایند، نیروی برش و ظرفیت پرس است. بنابراین در این بخش اثر هر یک از پارامترهای سختی ابزار الاستومری، ضخامت لوله و نیز اثر سنبه مقابل بر روی منحنی نیرو-جابجایی فرایند در دو حالت تجربی و تحلیل عددی بررسی و سپس نتایج حاصل از آزمون تجربی جهت اعتبار سنجی، با نتایج عددی مقایسه می‌شود. در بررسی اثر هر یک از پارامترها، تنها پارامتر مورد بررسی تغییر می‌کند و پارامترهای دیگر برای آزمون‌ها یکسان هستند.

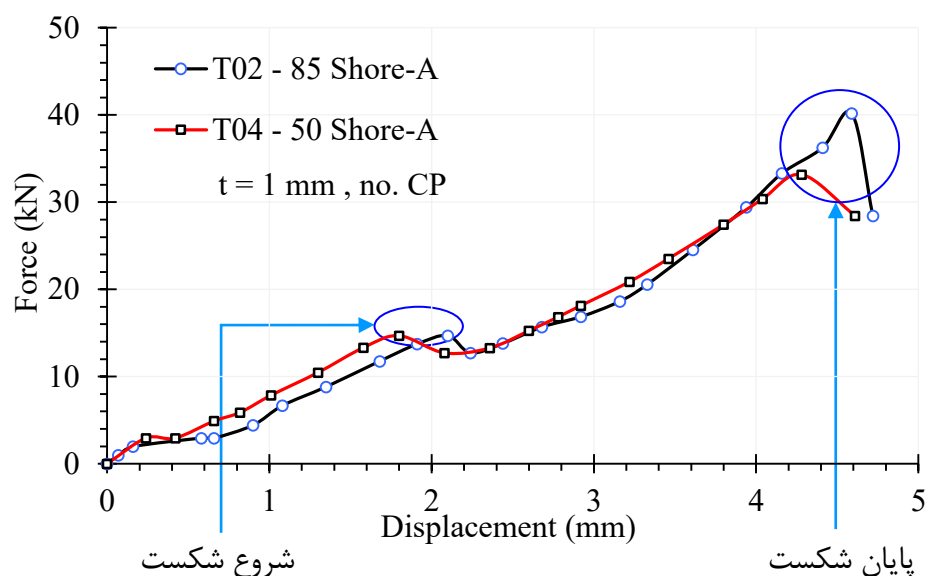
۴-۲-۱- بررسی اثر پارامترها بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی

۴-۲-۱-۱- بررسی اثر سختی ابزار الاستومری

الف) بدون استفاده از سنبه مقابل

با توجه به اینکه برای سوراخ کاری لوله در این پژوهش فقط برای لوله با ضخامت ۱ mm از دو نوع ابزار الاستومری با سختی‌های ۵۰ Shore-A و ۸۵ Shore-A و در بقیه ضخامت‌ها فقط از ابزار با سختی

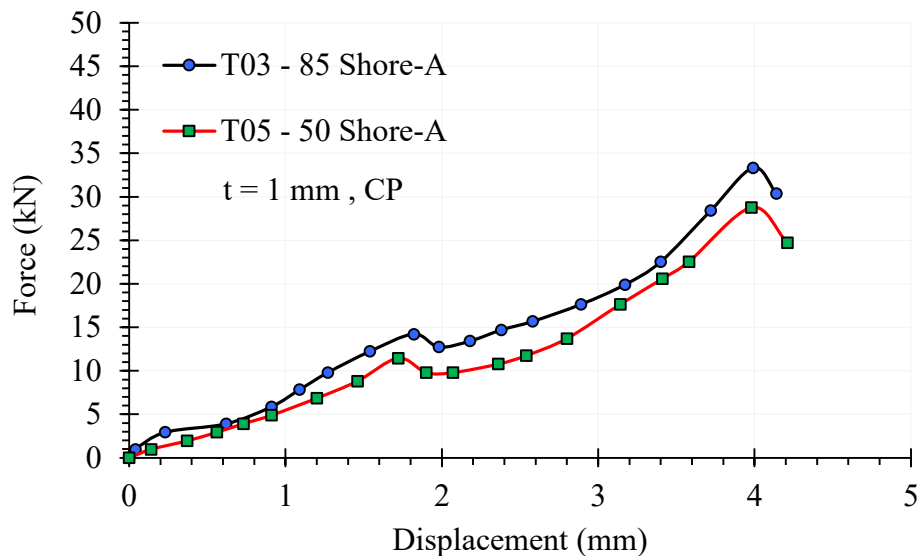
Shore-A ۸۵ استفاده شده است بنابراین جهت بررسی اثر سختی ابزار الاستومری آزمون‌های تجربی T02 و T04 که هر دو آزمون بدون استفاده از سنبه مقابل انجام شده‌اند با یکدیگر مقایسه می‌شوند. منحنی‌های شکل ۴-۵ اثر سختی ابزار الاستومری را بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی در حالتی که از سنبه مقابل استفاده نشده است نشان می‌دهند. با توجه به این منحنی‌ها نتیجه می‌شود که در آزمون‌های T02 و T04 استفاده از ابزار الاستومری با سختی کمتر منجر به نیروی نهایی شکست کمتری شده است. در منحنی نیرو-جاب‌جایی دو افت نیرو مشاهده می‌شود که افت اول مربوط به شروع شکست برشی است. تا رسیدن به افت دوم در ناحیه پلیسه تغییر شکل کششی رخ داده و در نقطه افت دوم که پایان شکست است برش نمونه کامل می‌شود.



شکل ۴-۵- اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی بدون استفاده از سنبه مقابل برای لوله به ضخامت ۱ mm

ب) با استفاده از سنبه مقابل

در این حالت آزمون‌های تجربی T03 و T05 که هر دو با استفاده از سنبه مقابل انجام شده‌اند با یکدیگر مقایسه می‌شوند. منحنی‌های شکل ۴-۶ اثر سختی ابزار الاستومری را بر منحنی نیرو-جاب‌جایی تجربی در این حالت نشان می‌دهند. با مقایسه این منحنی‌ها می‌توان دریافت که استفاده از ابزار الاستومری با سختی کمتر منجر به نیروی شکست کمتری شده است.



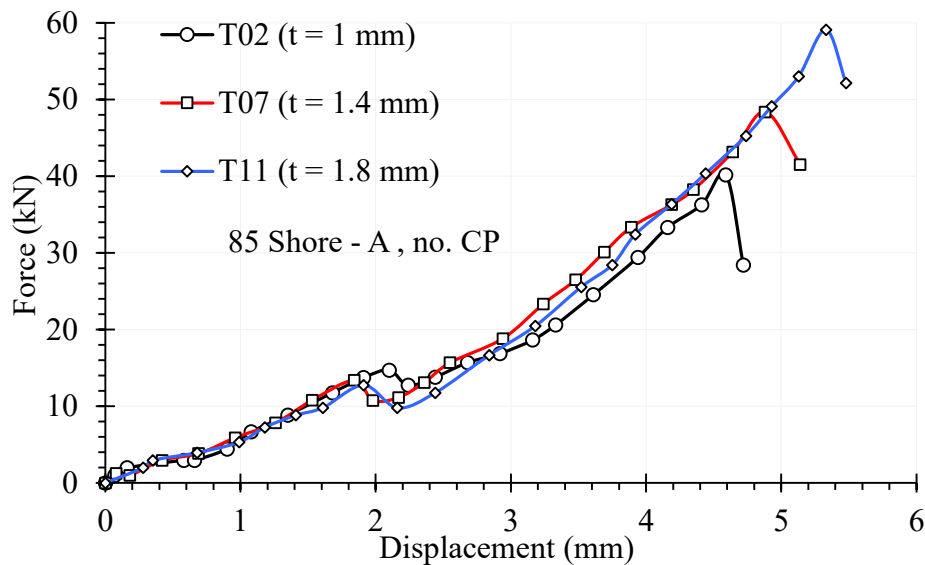
شکل ۴-۶- اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی با استفاده از سنبه مقابل برای لوله به ضخامت ۱ mm

۴-۲-۱-۲ بررسی اثر ضخامت لوله

در فرایند سوراخ کاری لوله در پژوهش حاضر از سه نوع نمونه با ضخامت‌های ۱ mm، ۱/۴ mm و ۱/۸ mm استفاده شده است. بنابراین جهت بررسی اثر ضخامت لوله مطابق با شرایط تجربی موجود در جدول ۲-۳ دو حالت وجود دارد:

الف) بدون استفاده از سنبه مقابل

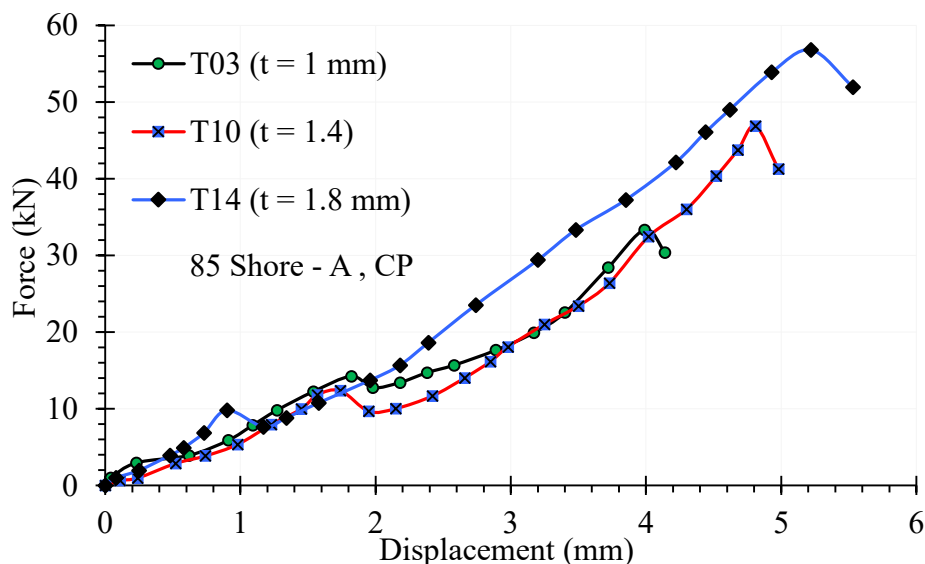
شکل ۴-۷ اثر ضخامت لوله را بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی که از ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۸۵ استفاده شده است، نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لوله باعث افزایش نیروی فرایند سوراخ کاری شده است که به علت افزایش سطح مقطع شکست نمونه است. همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های T07 و T11 ضخامت لوله افزایش ۴۰ درصدی و ۸۰ درصدی داشته اما نیروی فرایند افزایش ۴۰ درصدی و ۸۰ درصدی نداشته است، که این مسئله به پارامترهایی چون لقی و اصطکاک بین ابزار الاستومری و لوله وابسته است.



شکل ۴-۷- اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی بدون استفاده از سنبه مقابل در مقایسه آزمون‌های T02 ، T07 و T11

(ب) با استفاده از سنبه مقابل

شکل ۴-۸ اثر ضخامت لوله را بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی با استفاده از ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۸۵ نشان می‌دهند. مقایسه منحنی‌ها نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لوله باعث افزایش نیروی فرایند سوراخ‌کاری لوله می‌شود. افزایش سطح مقطع شکست لوله دلیل این افزایش نیرو است.



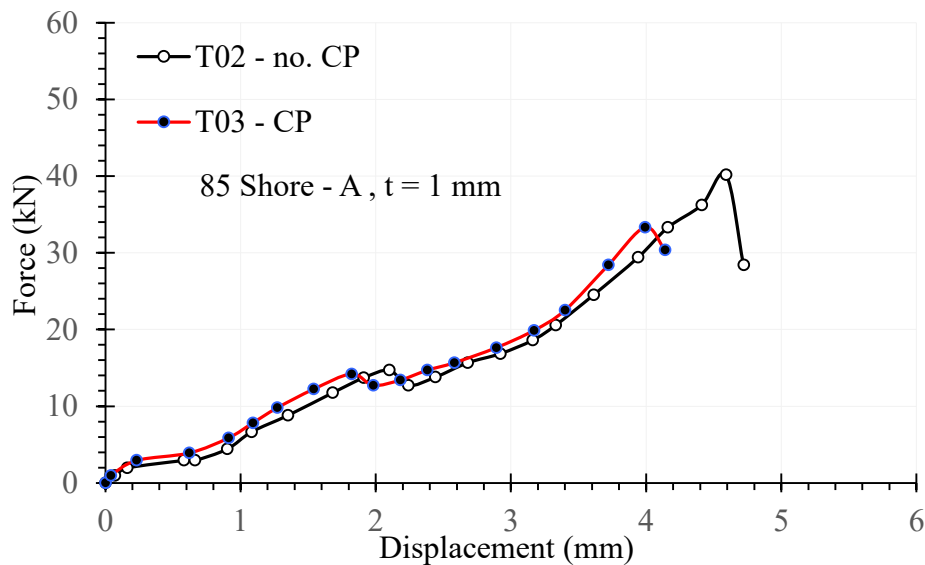
شکل ۴-۸- اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی با استفاده از سنبه مقابل در مقایسه آزمون‌های T03 ، T10 و T14

۴-۲-۱-۳ بررسی اثر سنبه مقابل

مطابق با شرایط موجود در جدول ۳-۲ (طراحی آزمون‌های تجربی) برای بررسی اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابه‌جایی چهار حالت به شرح زیر پیش می‌آید:

الف) استفاده از ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore-A و لوله با ضخامت ۱ mm

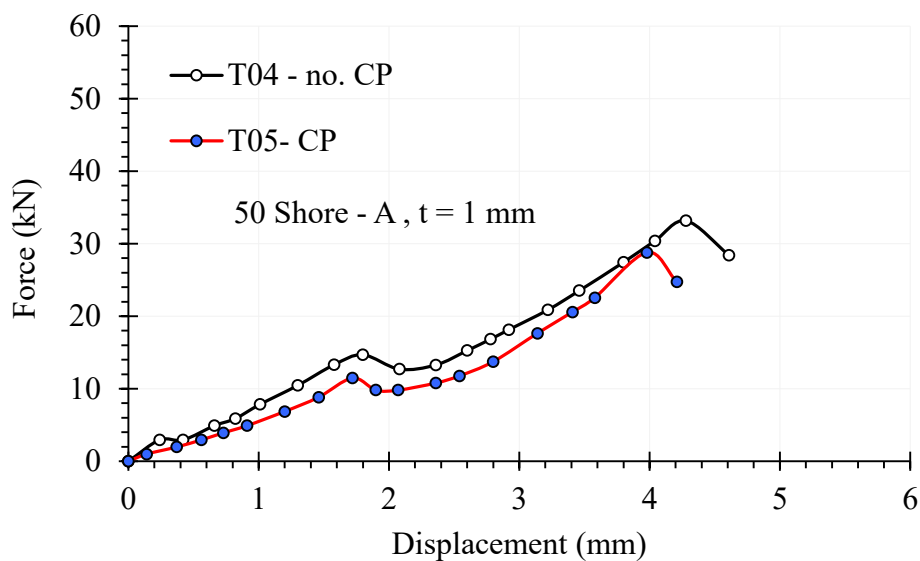
مقایسه منحنی‌های مربوط به دو آزمون T02 و T03 که در شکل ۴-۹ ارائه شده‌اند نشان می‌دهد که به هنگام استفاده از سنبه مقابل سوراخ‌کاری لوله با جابه‌جایی کمتری شروع شده و با جابه‌جایی کمتری نیز به پایان می‌رسد. علت آن است که در اثر برخورد پلیسه به سنبه مقابل، سطح پلیسه تخت شده و تغییر شکل پلیسه از حالت کششی به حالت برشی تغییر مکانیزم می‌یابد. از طرفی هنگام استفاده از سنبه مقابل پس از شروع برش به علت برخورد پلیسه به سنبه مقابل، ابزار الاستومری محبوس شده و با جابه‌جایی ماندل متحرک فشار محفظه شکل‌دهی بالا رفته و نیروی فرایند افزایش می‌یابد. ضمن آنکه هنگام استفاده از سنبه مقابل پس از برخورد پلیسه به سنبه مقابل نرخ جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها با سرعت بیشتری انجام شده و با اعمال نیروی کمتر نمونه شکسته می‌شود. وجود سنبه مقابل موجب توسعه یکنواخت فشار هیدرواستاتیک و در نتیجه سهولت به هم پیوستن حفره‌ها و گسترش ترک در ناحیه برش می‌شود که در نتیجه موجب شکست نمونه می‌شود.



شکل ۴-۹- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی در مقایسه آزمون‌های T02 و T03

(ب) استفاده از ابزار الاستومری با سختی ۵۰ Shore-A و لوله با ضخامت ۱ mm

در مقایسه منحنی‌های مربوط به این آزمون‌ها که در شکل ۴-۱۰ ارائه شده‌اند نیز می‌توان به نتیجه‌ای مشابه حالت قبل رسید. در این دو آزمون که از ابزار الاستومری با سختی ۵۰ Shore-A استفاده شده است نسبت به حالتی که از ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore-A استفاده شده است به نیروی شکست کمتری نیاز است.

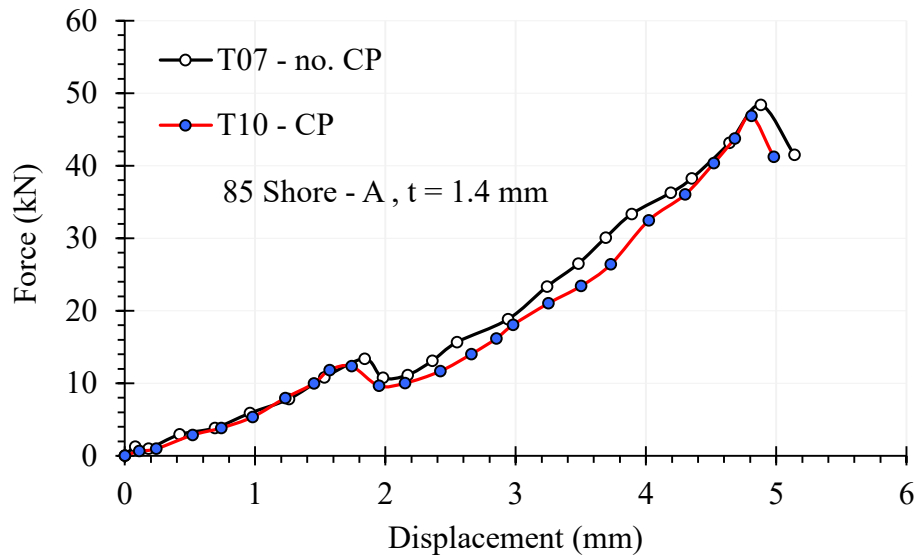


شکل ۴-۱۰- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی در مقایسه آزمون T04 با آزمون

T05

ج) استفاده از ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore-A و لوله با ضخامت ۱/۴ mm

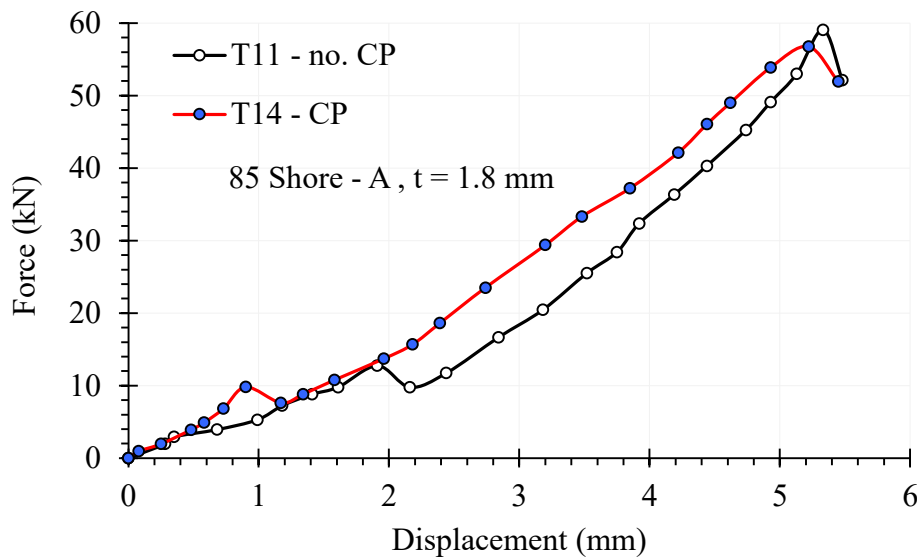
در منحنی‌های شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که استفاده از سنبه مقابل در این آزمون‌ها باعث کاهش نیروی شکست شده است.



شکل ۴-۱۱- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابه‌جایی تجربی در مقایسه آزمون T07 با آزمون T10

د) استفاده از ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore-A و لوله با ضخامت ۱/۸ mm

با مقایسه منحنی‌های شکل ۴-۱۲ می‌توان دریافت که استفاده از سنبه مقابل (همانند شکل ۴-۱۱) باعث کاهش نیروی لازم شکست شده است. در این حالت نیز استفاده از سنبه مقابل میزان جابه‌جایی نقطه شکست را کاهش داده است.



شکل ۴-۱۲- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابجایی تجربی در مقایسه آزمون‌های T11 و T14

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری با ابزار الاستومری

۴-۳-۱ بررسی اثر پارامترها بر منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی

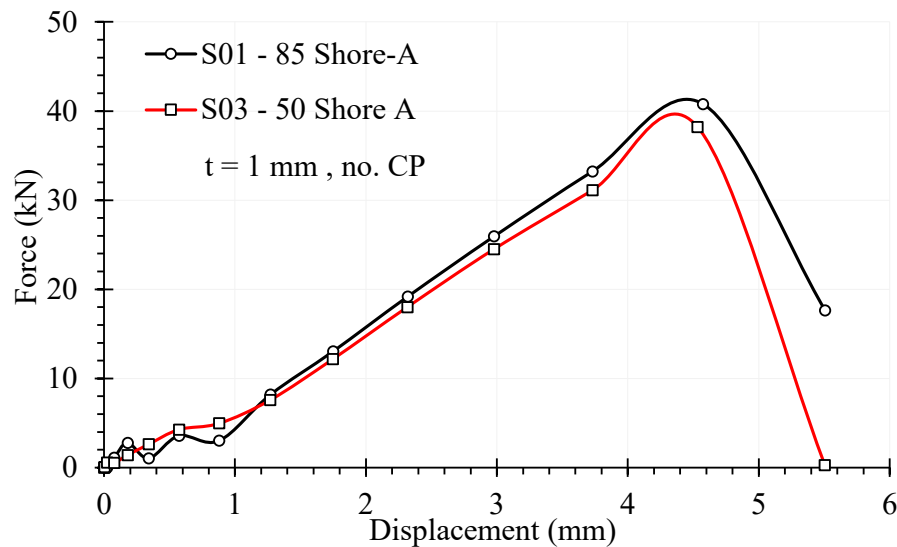
در این بخش ابتدا اثر پارامترهای فرایند سوراخ‌کاری در شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس ارائه شده و سپس نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمون‌های تجربی مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۳-۱-۱ بررسی اثر سختی ابزار الاستومری

نتایج تحلیل عددی در بررسی اثر سختی ابزار الاستومری بر روی منحنی نیرو-جابجایی، به کمک آزمون‌های شبیه‌سازی معادل، به ترتیب در دو حالت بدون استفاده از سنبه مقابل (S01 و S03) و با استفاده از سنبه مقابل (S02 و S04) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف) مقایسه آزمون‌های شبیه‌سازی (S01) و (S03)

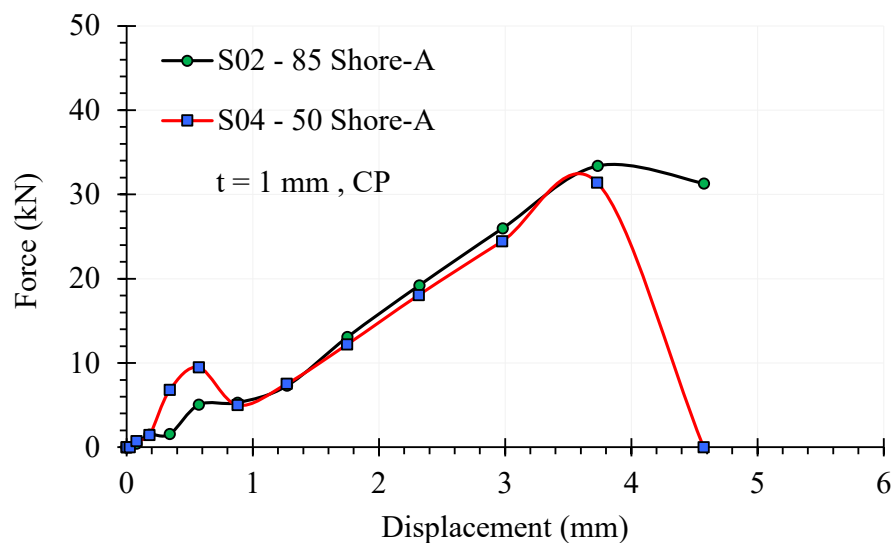
در شکل ۴-۱۳ منحنی‌های مربوط به دو آزمون شبیه‌سازی طراحی شده‌ی S01 و S03 ارائه شده‌اند. با دقت در این منحنی‌ها این نتیجه به دست می‌آید که میزان جابجایی نقاط شروع و پایان شکست در این دو شبیه‌سازی تقریباً یکسان بوده اما هنگام استفاده از ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۵۰ مقدار نیروی نهایی شکست کمتر می‌شود.



شکل ۴-۱۳- اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی بدون استفاده از سنبه مقابل برای لوله با ضخامت ۱ mm

ب) مقایسه آزمون‌های شبیه‌سازی (S02) و (S04)

با توجه به منحنی‌های شکل ۴-۱۴ که مربوط به آزمون‌های شبیه‌سازی S02 و S04 هستند نتیجه می‌شود که در این آزمون‌ها استفاده از ابزار الاستومری با سختی کمتر منجر به نیروی نهایی شکست کمتری به میزان ناچیز می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها نیز به ازای جابه‌جایی یکسان نقاط شروع و پایان شکست، استفاده از ابزار الاستومری با سختی ۵۰ Shore-A منجر به نیروی برش کمتری می‌شود.



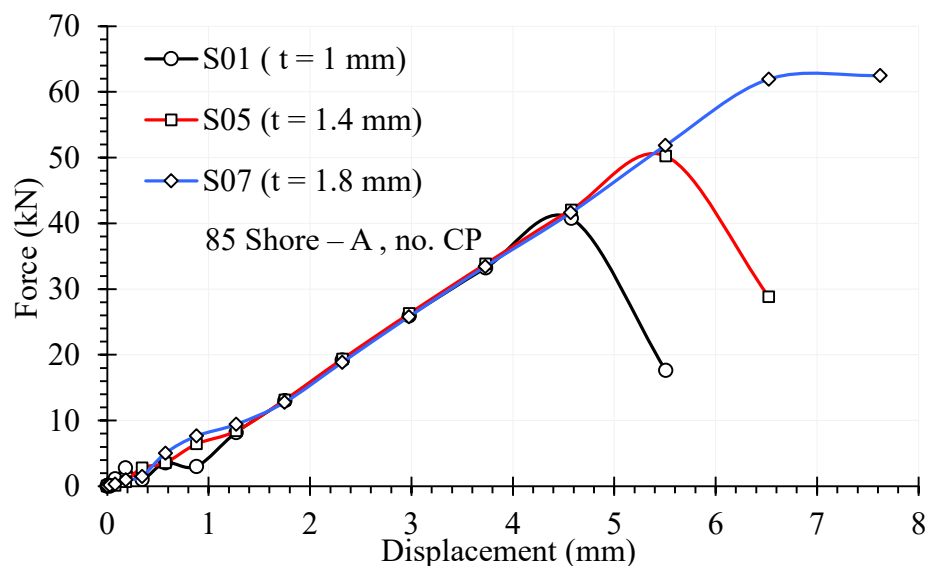
شکل ۴-۱۴- اثر سختی ابزار الاستومری بر منحنی نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از سنبه مقابل برای لوله با ضخامت ۱ mm

۴-۳-۲ بررسی اثر ضخامت لوله

جهت بررسی اثر ضخامت لوله در بخش عددی نیز همانند حالت تجربی، دو حالت وجود دارد:

الف) بدون استفاده از سنبه مقابل

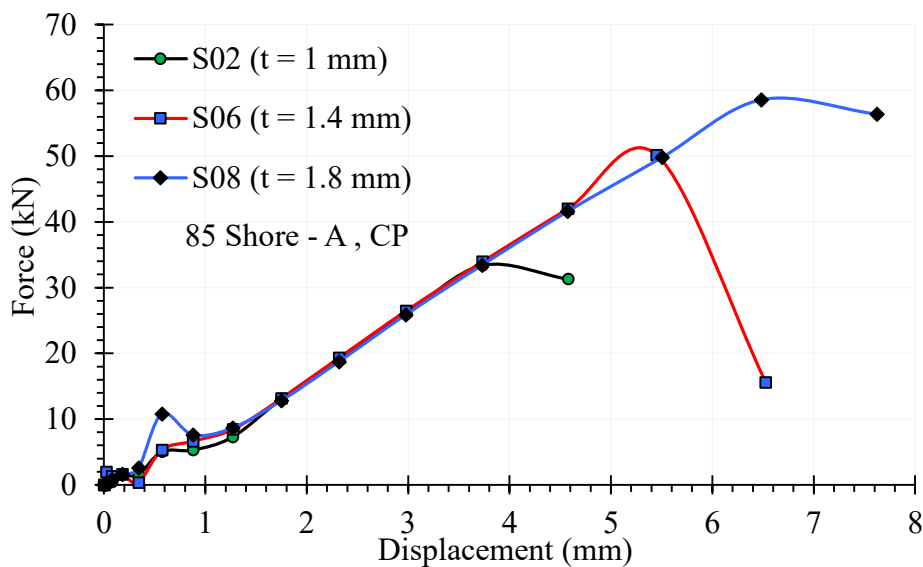
در این حالت آزمون‌های شبیه‌سازی S01، S05 و S07 با یکدیگر مقایسه می‌شوند. منحنی‌های شکل ۴-۱۵ اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی را در این حالت که از ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۸۵ استفاده شده است نشان می‌دهند. با توجه به این منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لوله باعث افزایش نیروی فرایند سوراخ‌کاری لوله شده است.



شکل ۴-۱۵- اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی بدون استفاده از سنبه مقابل

ب) با استفاده از سنبه مقابل

در این حالت آزمون‌های شبیه‌سازی S02، S06 و S08 با یکدیگر مقایسه می‌شوند. منحنی‌های شکل ۴-۱۶ اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی را در این حالت که از ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۸۵ استفاده شده است نشان می‌دهند. با توجه به این منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت لوله در این حالت نیز باعث افزایش نیروی فرایند سوراخ‌کاری لوله شده است. دلیل این افزایش نیرو افزایش سطح مقطع شکست نمونه است.



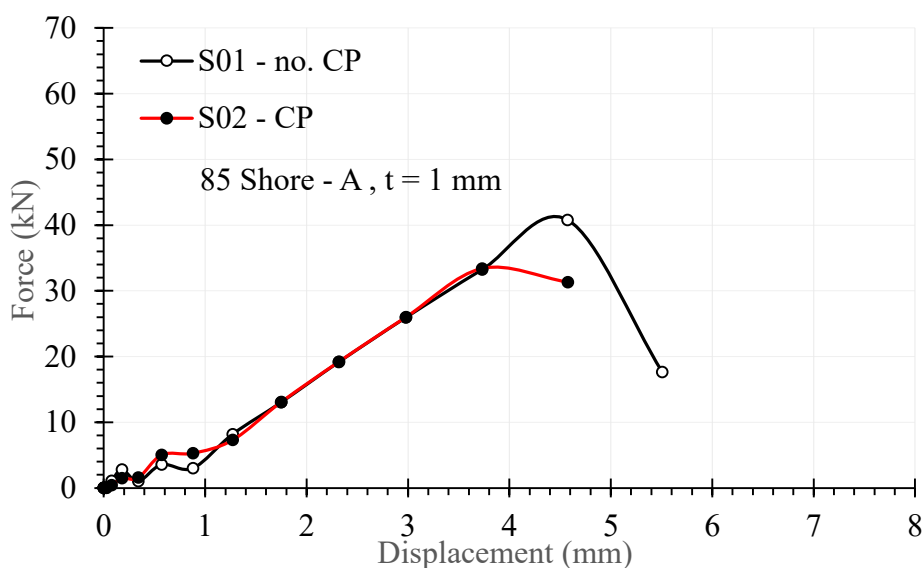
شکل ۴-۱۶- اثر ضخامت لوله بر منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی با استفاده از سنبه مقابل

۴-۳-۱-۳ بررسی اثر سنبه مقابل

برای بررسی اثر سنبه مقابل بر روی منحنی نیرو-جابجایی چهار حالت به شرح زیر پیش می‌آید:

الف) مقایسه آزمون‌های شبیه‌سازی S01 و S02

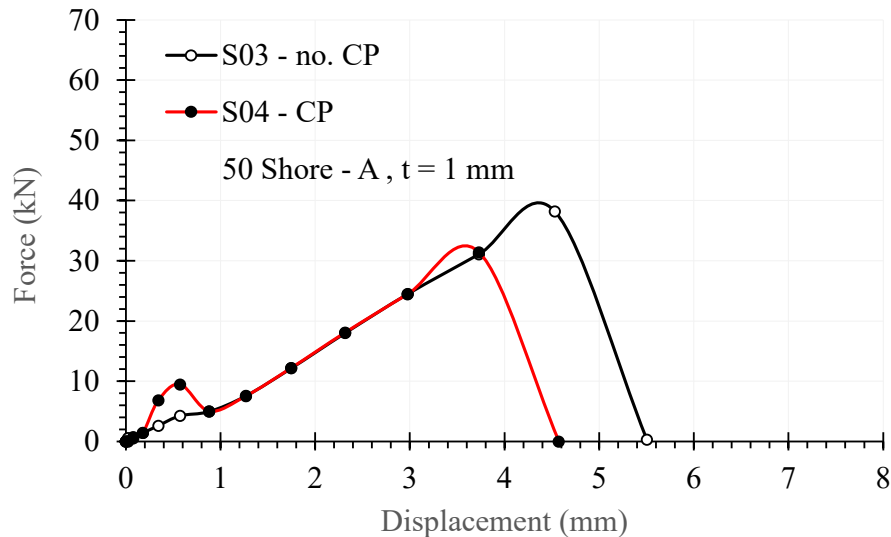
منحنی‌های مربوط به این دو آزمون در شکل ۴-۱۷ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی آزمون با استفاده از سنبه مقابل به نیروی نهایی شکست کمتری نیاز است.



شکل ۴-۱۷- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی در آزمون‌های S01 و S02

ب) مقایسه آزمون‌های شبیه‌سازی S03 و S04

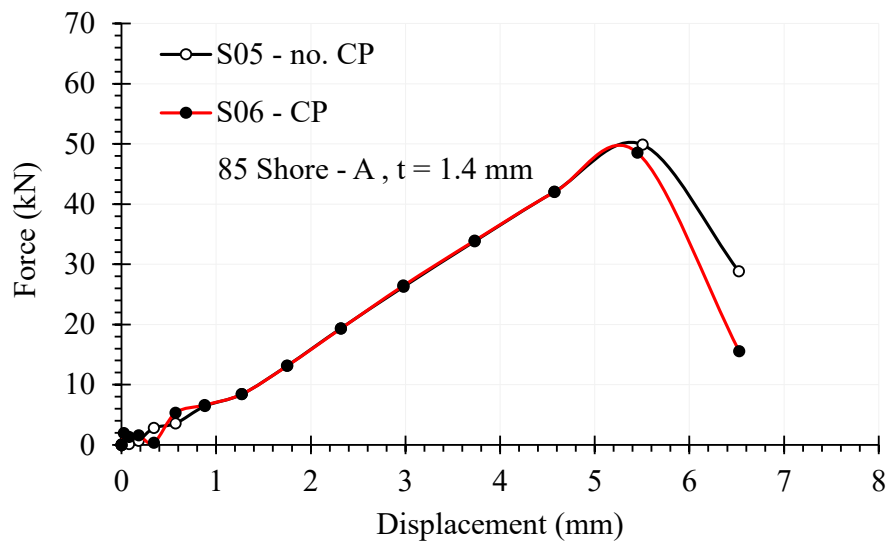
منحنی‌های مربوط به این دو آزمون در شکل ۴-۱۸ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی آزمون با استفاده از سنبه مقابل به نیروی نهایی شکست کمتری نیاز است.



شکل ۴-۱۸- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی در آزمون‌های S03 و S04

ج) مقایسه آزمون‌های شبیه‌سازی S05 و S06

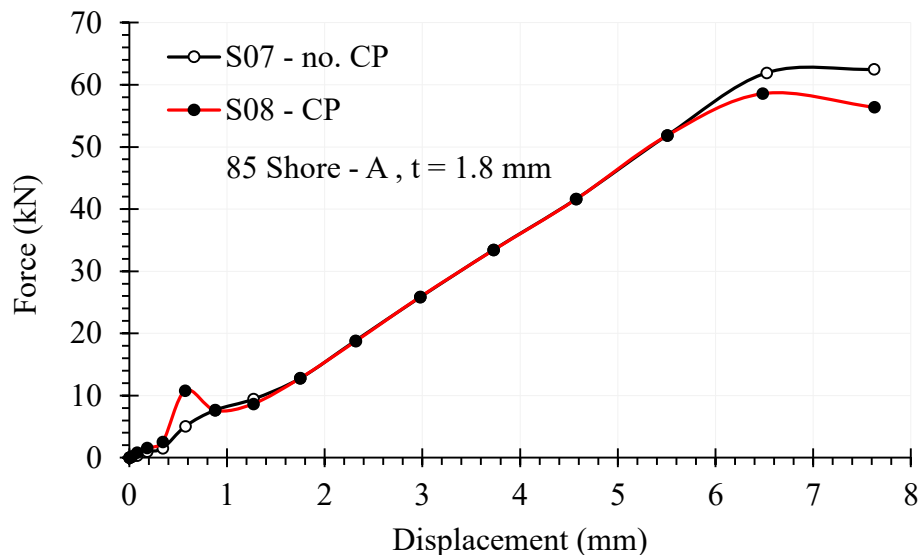
در این آزمون‌ها که منحنی‌های مربوط به آنها در شکل ۴-۱۹ ارائه شده‌اند، استفاده از سنبه مقابل تأثیر چندانی بر منحنی نیرو-جابجایی نداشته است.



شکل ۴-۱۹- اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جابجایی شبیه‌سازی در آزمون‌های S05 و S06

د) مقایسه آزمون‌های شبیه‌سازی S07 و S08

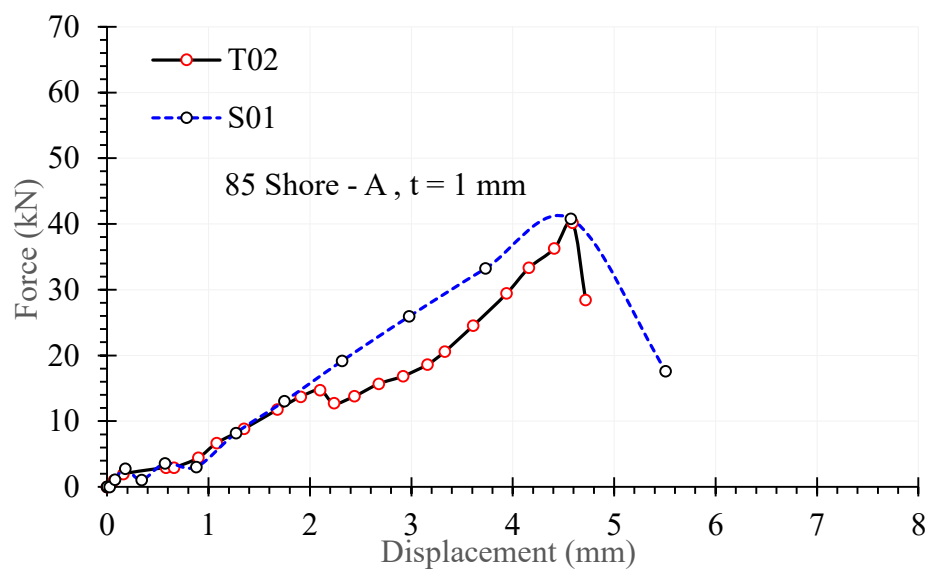
منحنی‌های این دو آزمون که در شکل ۴-۲۰ ارائه شده‌اند مؤید این نتیجه‌اند که استفاده از سنبه مقابل همانند حالت قبل تأثیر چندانی بر منحنی نیرو-جاب‌جایی نداشته است.



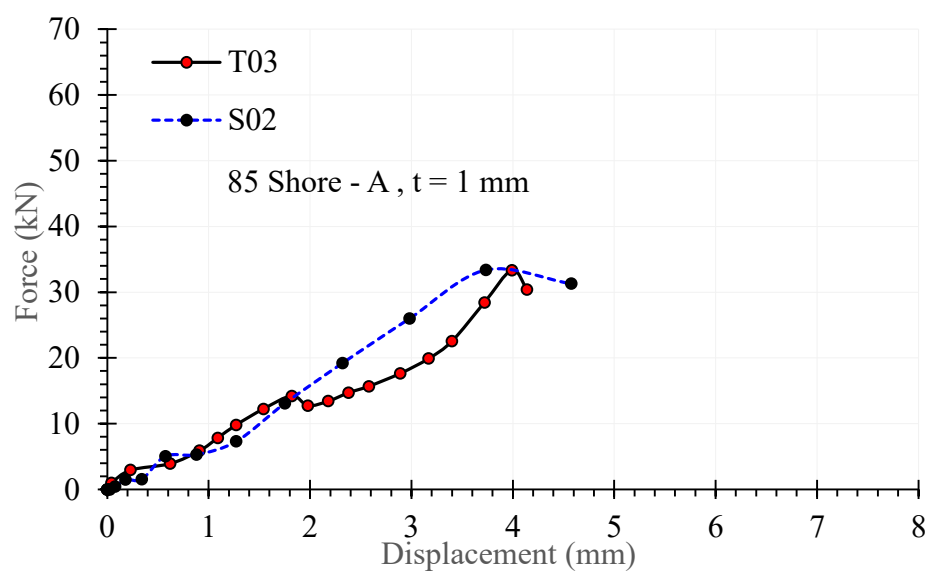
شکل ۴-۲۰ اثر سنبه مقابل بر منحنی نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی در مقایسه آزمون‌های S07 و S08

الف) اعتبار سنجی نتایج آزمون‌های شبیه‌سازی

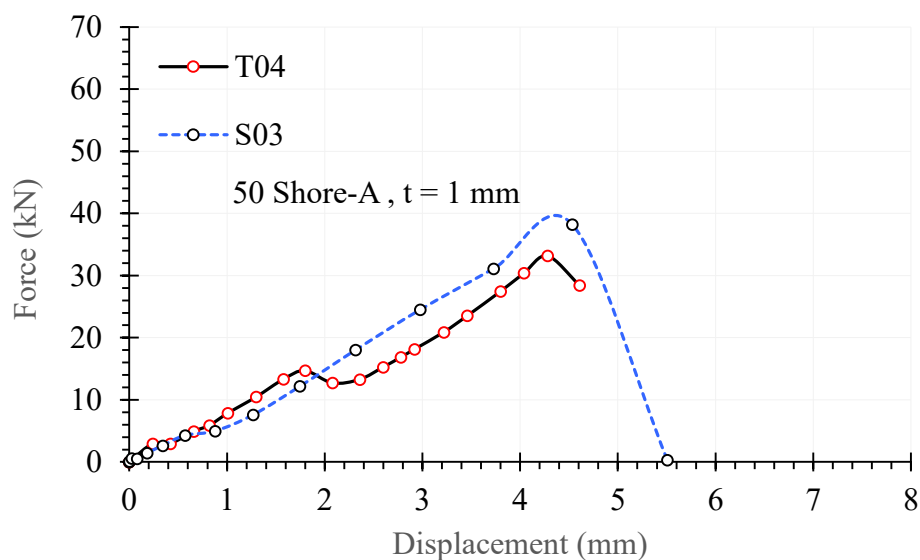
همان‌طور که در فصل دوم گفته شد، جهت انجام آزمون‌های تجربی، پارامترهای ضخامت لوله، سختی ابزار الاستومری و استفاده یا عدم استفاده از سنبه مقابل و تأثیر آنها بر روی نیروی سوراخ‌کاری لوله به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی اثر این پارامترها هشت مورد شبیه‌سازی با مشخصات موجود در جدول ۳-۱۰ انجام شد. پس از انجام شبیه‌سازی و مطالعه اثر پارامترهای ذکر شده قالبی با ابعاد و مشخصات ارائه شده در پیوست‌های دو و سه طراحی و ساخته شد و آزمون‌های تجربی با مشخصات مندرج در جدول ۳-۲ انجام شد. بنابراین برای اطمینان از درستی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، لازم است مقایسه‌ای بین نتایج آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی صورت گیرد. به همین منظور منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اثر پارامترهای مختلف در شکل‌های ۴-۲۱ الی ۴-۲۸ ارائه شده‌اند.



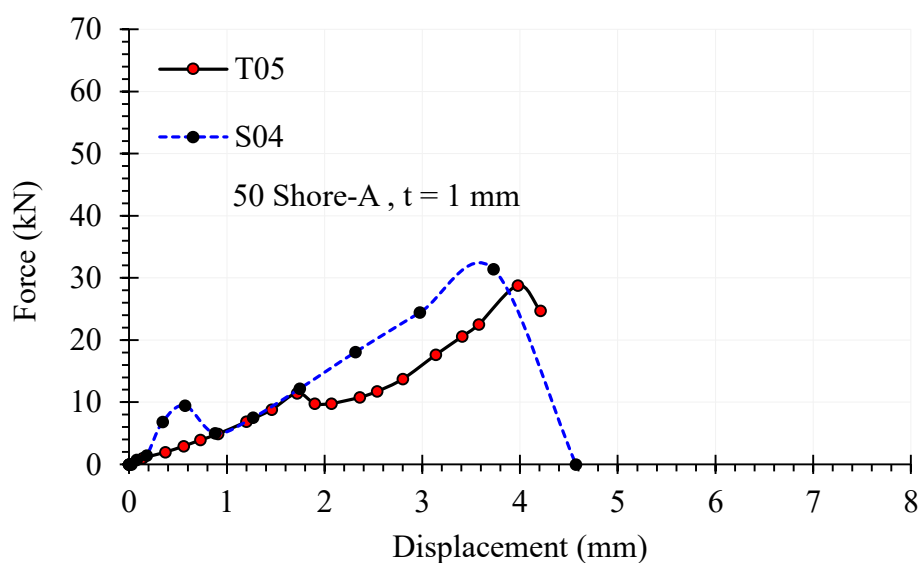
شکل ۴-۲۱- منحنی نیرو-جابجایی آزمون شبیه‌سازی S01 و معادل تجربی آن T02 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



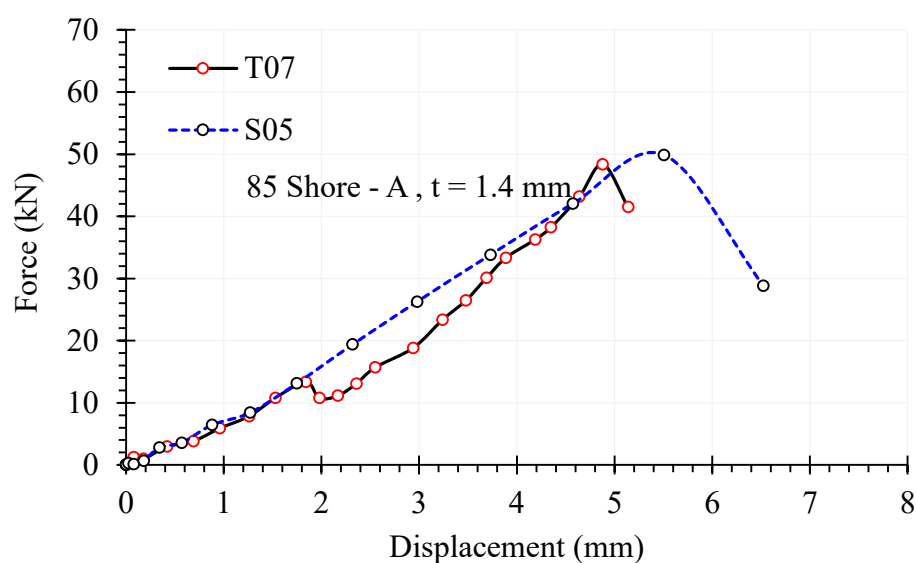
شکل ۴-۲۲- منحنی نیرو-جابجایی آزمون شبیه‌سازی S02 و معادل تجربی آن T03 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



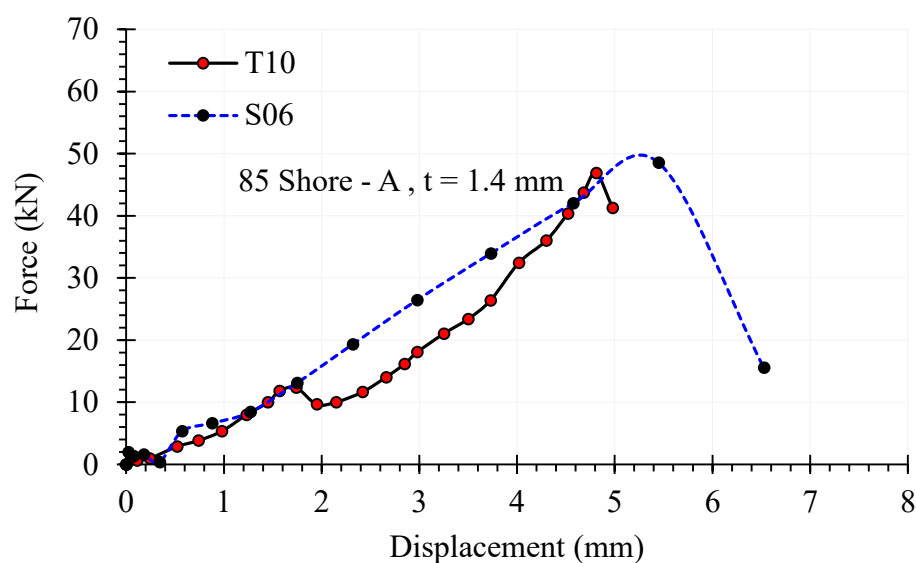
شکل ۴-۲۳- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S03 و معادل تجربی آن T04 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



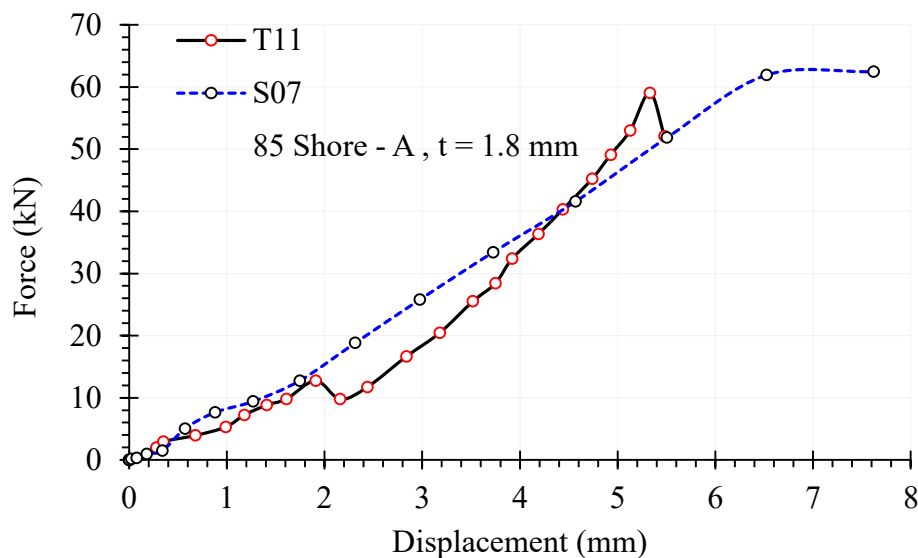
شکل ۴-۲۴- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S04 و معادل تجربی آن T05 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



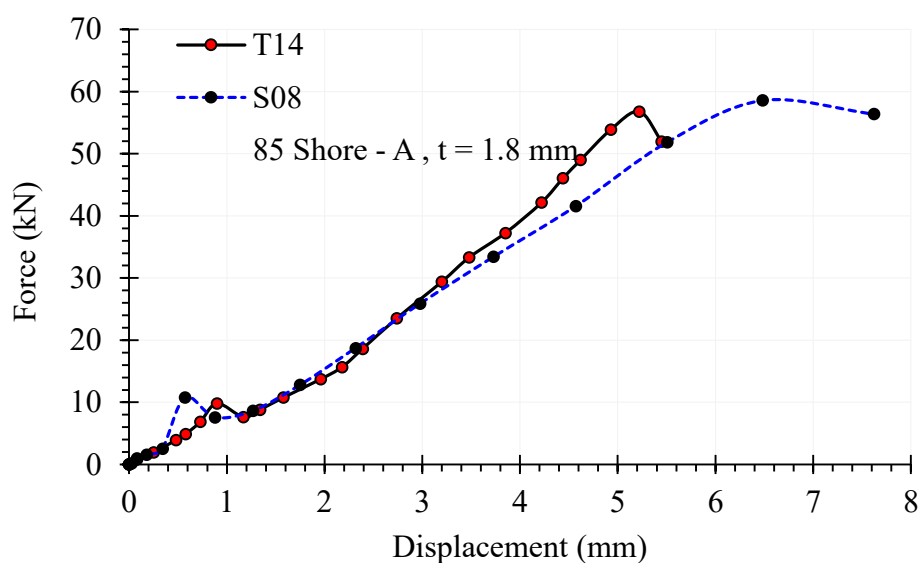
شکل ۴-۲۵- منحنی نیرو-جابجایی آزمون شبیه‌سازی S05 و معادل تجربی آن T07 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



شکل ۴-۲۶- منحنی نیرو-جابجایی آزمون شبیه‌سازی S06 و معادل تجربی آن T10 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



شکل ۴-۲۷- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S07 و معادل تجربی آن T11 (دایره توخالی بدون استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)



شکل ۴-۲۸- منحنی نیرو-جاب‌جایی آزمون شبیه‌سازی S08 و معادل تجربی آن T14 (دایره توپر با استفاده از سنبه مقابل و خطوط نقطه‌چین شبیه‌سازی)

در جدول ۴-۲ نیز شرایط آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی و نتایج استخراج شده از منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی برای نقطه پایان شکست ارائه شده است.

جدول ۴-۲- نتایج حاصل از تحلیل نیرو-جابجایی در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های معادل

شماره و نوع آزمون	ضخامت لوله	سختی ابزار الاستومری	با / بدون سنبه مقابل	جابجایی در نقطه پایان شکست (mm)	نیرو در نقطه پایان شکست (KN)
T01	۱	۸۵	×	نمونه T01 آزمایشی بوده و داده تجربی ندارد.	
T02	۱	۸۵	×	۴/۵۹	۴۰/۱۸
S01	۱	۸۵		۴/۵۷	۴۰/۷۶
T03	۱	۸۵	✓	۳/۹۹	۳۳/۳۲
S02	۱	۸۵		۳/۷۳	۳۳/۳۸
T04	۱	۵۰	×	۴/۲۸	۳۳/۱۶
S03	۱	۵۰		۴/۵۳	۳۸/۱۹
T05	۱	۵۰	✓	۳/۹۸	۲۸/۷۸
T06	۱	۵۰		۳/۹۲	۳۱/۰۵
S04	۱	۵۰	✓	۳/۷۳	۳۱/۴
T07	۱/۴	۸۵	×	۴/۸۸	۴۸/۳۷
T08	۱/۴	۸۵		۴/۸۴	۴۸/۲۳
S05	۱/۴	۸۵	✓	۵/۵	۴۹/۸۶
T09	۱/۴	۸۵		۴/۸۳	۴۷/۴۱
T10	۱/۴	۸۵	✓	۴/۸۱	۴۶/۸۷
S06	۱/۴	۸۵		۵/۴۵	۴۸/۵۴
T11	۱/۸	۸۵	×	۵/۳۳	۵۹/۰۸
T12	۱/۸	۸۵		۵/۳۶	۵۹/۴۲
S07	۱/۸	۸۵	✓	۶/۵۲	۶۱/۹۳
T13	۱/۸	۸۵		۴/۸۸	۵۵/۷
T14	۱/۸	۸۵	✓	۵/۲۲	۵۶/۷۸
S08	۱/۸	۸۵		۶/۴۸	۵۸/۵۷

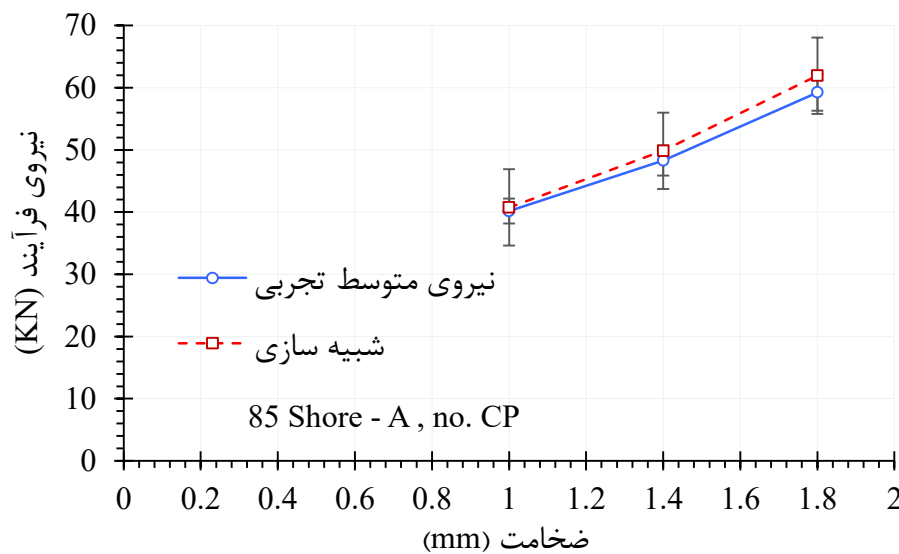
آنچه که در بررسی منحنی‌های شکل‌های ۴-۲۱ تا ۴-۲۸ به دست می‌آید آن است که در ضخامت‌های پایین‌تر لوله با استفاده از ابزار الاستومری با سختی کمتر نیروی فرایند کاهش می‌یابد. از طرفی استفاده از ضخامت‌های کمتر لوله در عملیات سوراخ‌کاری با هر دو نوع سختی ابزار الاستومری منجر به تولید نمونه‌های با سطح شکست بهتری می‌شود. نتایج نشان دادند در ضخامت‌های بالاتر لوله استفاده از سنبه مقابل تأثیر چندانی بر روی منحنی نیرو-جاب‌جایی فرایند ندارد. استفاده از ابزار الاستومری با سختی کمتر زمانی که ظرفیت پرس پایین یا میزان تولید کم باشد گزینه مناسبی است. اما استفاده از ابزار الاستومری با سختی کمتر در آزمون‌های تجربی این عیب را داشت که تنها در تعداد محدودی از سیکل کاری قابل استفاده بود و در حین آزمون دچار گسیختگی و تخریب می‌شد.

یکی از نتایج مهمی که در بررسی منحنی‌ها به دست می‌آید آن است که شکست اولیه نمونه‌ها در فاصله زمانی و مکانی کمی پس از شروع فرایند اتفاق می‌افتد. علت این امر آن است که فضای لقی بین نمونه‌های ابزار الاستومری و دیواره داخلی لوله بسیار ناچیز بوده و با اعمال نیرو از طریق ماندل متحرک به ابزار الاستومری، این فضا بلافاصله پر شده و افزایش تدریجی اعمال فشار بر ابزار الاستومری باعث می‌شود با توجه به تراکم ناپذیری ابزار الاستومری، در قسمتی از دیواره بیرونی لوله که سوراخ قالب وجود دارد مقاومت لوله کم شده و شکل‌گیری عملیات برش آغاز شود.

در ادامه فرایند و با افزایش جابه‌جایی، نیروی فرایند افزایش می‌یابد که این نیرو موجب جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها و شکست اولیه در لوله در ناحیه سوراخ واقع در قالب می‌شود. با افزایش نیرو سرعت جوانه‌زنی و رشد حفره‌های جدید و به هم پیوستن آنها افزایش یافته و شکست ثانویه در لوله اتفاق می‌افتد و فرایند برش به انجام می‌رسد. همچنین با دقت در این منحنی‌ها می‌توان به این مسئله پی برد که به هنگام استفاده از سنبه مقابل شکست نهایی در نمونه‌ها به دلیل افزایش سرعت جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این نتایج با توجه به مقایسه منحنی‌های شکل‌های ۴-۲۱ الی ۴-۲۸ مورد تأیید آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی است.

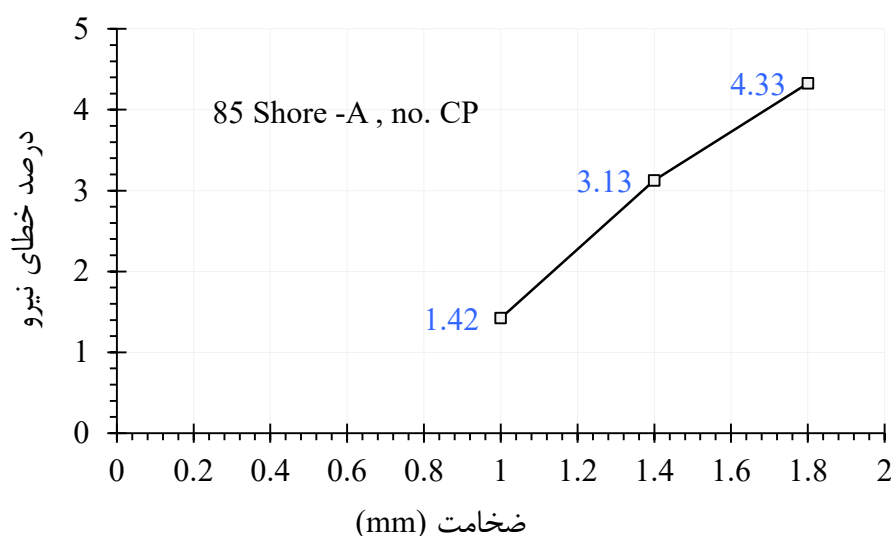
۴-۴- محاسبه میزان خطای بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی

در شکل ۴-۲۹ منحنی نیروی متوسط آزمون‌های تجربی و نیروی شبیه‌سازی برای نمونه‌های آزمون در ضخامت‌های مختلف با سختی ابزار الاستومری ۸۵ Shore - A و بدون استفاده از سنبه مقابل ارائه شده است. با توجه به این منحنی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت نمونه‌ها اختلاف بین نیروی متوسط تجربی و شبیه‌سازی افزایش می‌یابد.



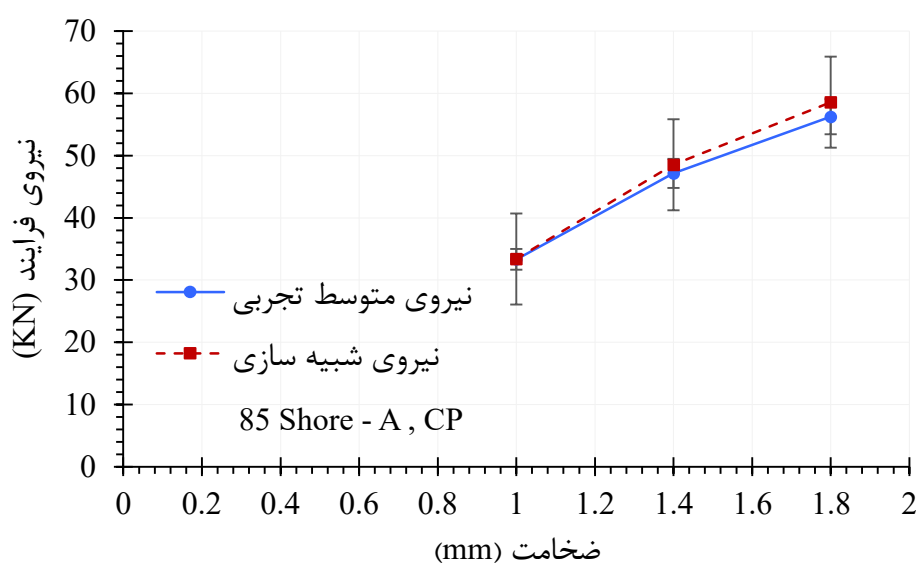
شکل ۴-۲۹- منحنی نیروی فرایند بر حسب ضخامت نمونه‌ها بدون استفاده از سنبه مقابل

در شکل ۴-۳۰ منحنی درصد خطای بین نیروی تجربی و شبیه‌سازی در برابر ضخامت نمونه‌ها ارائه شده است. در این حالت که از ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore - A استفاده شده و سنبه مقابل به کار نرفته است، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت نمونه‌ها میزان خطای بین نیروی تجربی و شبیه‌سازی نیز افزایش می‌یابد.



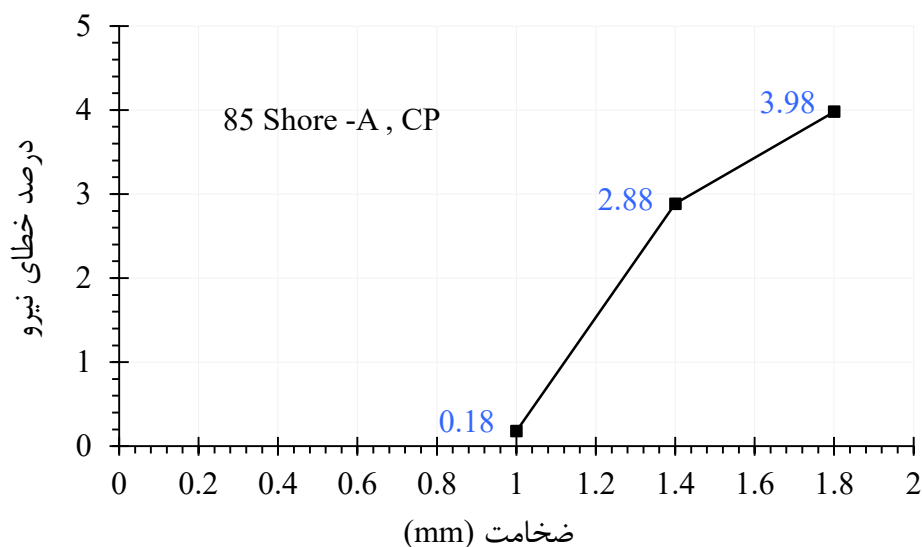
شکل ۴-۳۰- منحنی درصد خطای بین نیروی متوسط تجربی و شبیه‌سازی بر حسب ضخامت نمونه‌ها بدون استفاده از سنبه مقابل

در شکل ۴-۳۱ نیز منحنی نیروی متوسط آزمون‌های تجربی و نیروی شبیه‌سازی برای نمونه‌های آزمون در ضخامت‌های مختلف با سختی ابزار الاستومری ۸۵ Shore - A در حالی که از سنبه مقابل استفاده شده، ارائه شده است. با توجه به این منحنی‌ها نیز می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت نمونه‌ها اختلاف بین نیروی تجربی و شبیه‌سازی افزایش می‌یابد ولی این اختلاف نسبت به حالتی که از سنبه مقابل استفاده نشده، کمتر است.



شکل ۴-۳۱- منحنی نیروی فرایند بر حسب ضخامت نمونه‌ها با استفاده از سنبه مقابل

همچنین در شکل ۴-۳۲ منحنی درصد خطای بین نیروی تجربی و شبیه‌سازی در برابر ضخامت نمونه‌ها ارائه شده است. در این حالت که از ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore - A و سنبه مقابل استفاده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت نمونه‌ها میزان خطای بین نیروی تجربی و شبیه‌سازی نیز افزایش می‌یابد ولی خطاهای به وجود آمده در این حالت نسبت به حالتی که از سنبه مقابل استفاده نشده است کمتر است.



شکل ۴-۳۲- منحنی درصد خطای بین نیروی متوسط تجربی و شبیه‌سازی بر حسب ضخامت نمونه‌ها با استفاده از سنبه مقابل

بنابراین بر اساس منحنی‌های مربوط به شکل‌های ۴-۲۹ تا ۴-۳۲ می‌توان دریافت که بهترین حالت برای سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری حالتی است که در آن از سنبه مقابل و ابزار الاستومری با سختی ۸۵ Shore - A استفاده شده است.

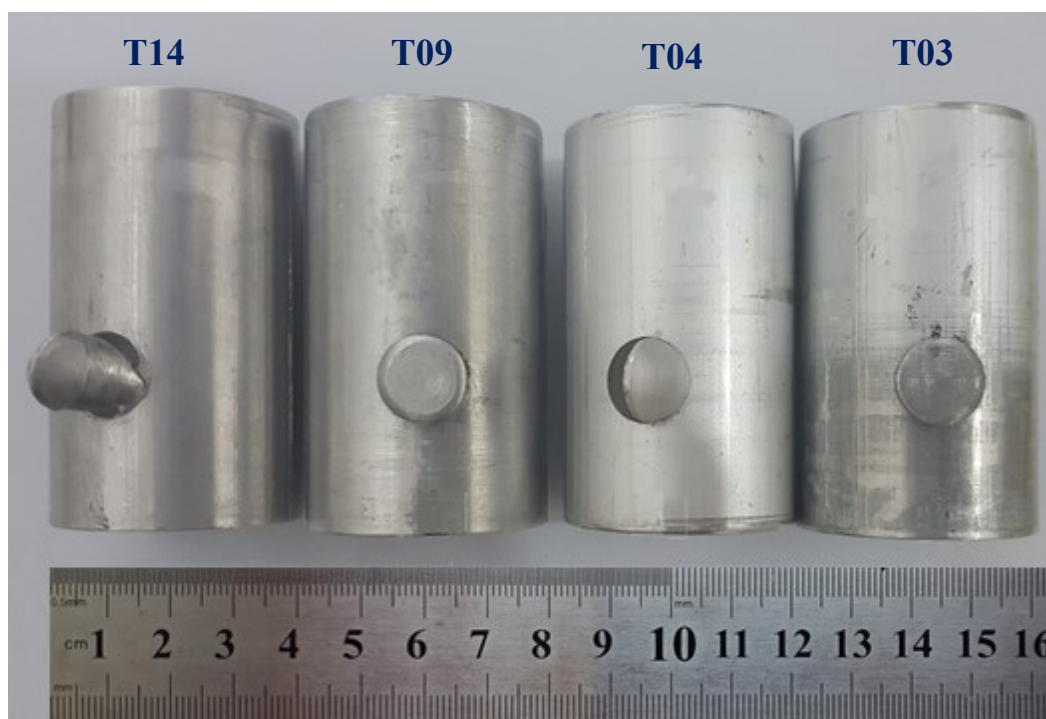
۴-۵- نمونه‌های تجربی سوراخ‌کاری لوله با ابزار الاستومری

پس از آماده‌سازی قالب، لوله‌ها و ابزار الاستومری، آزمون‌های تجربی مطابق با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۳-۲ انجام شد. نمونه‌های سالم و معیوب سوراخ‌کاری تحت شرایط مختلف به ترتیب در شکل‌های ۴-۳۳ و ۴-۳۴ مشاهده می‌شوند. به‌منظور مشاهده مناطق برش تعدادی از نمونه‌ها در راستای طولی

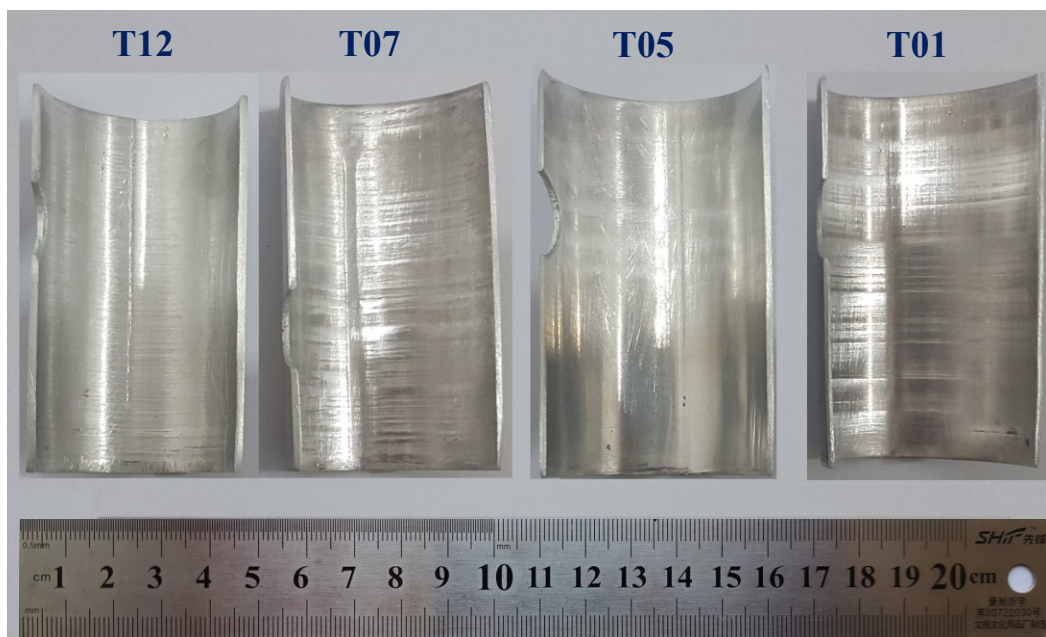
برش داده شدند. این نمونه‌ها نیز در شکل ۳۵-۴ نشان داده شده‌اند. ابزارهای الاستومری با سختی کمتر
حین انجام آزمون معیوب شدند که این نمونه‌ها در شکل ۳۶-۴ نمایش داده شده‌اند.



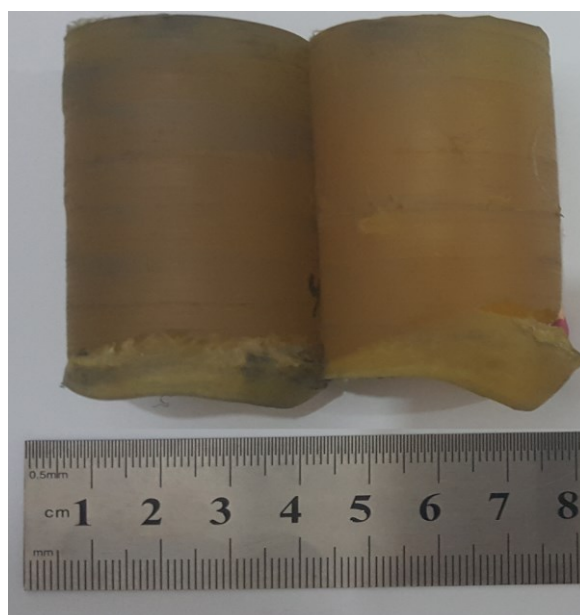
شکل ۳۳-۴ نمونه‌های سالم سوراخ کاری لوله با ابزار الاستومری



شکل ۳۴-۴ نمونه‌های معیوب (پلیسه دار) سوراخ کاری لوله با ابزار الاستومری

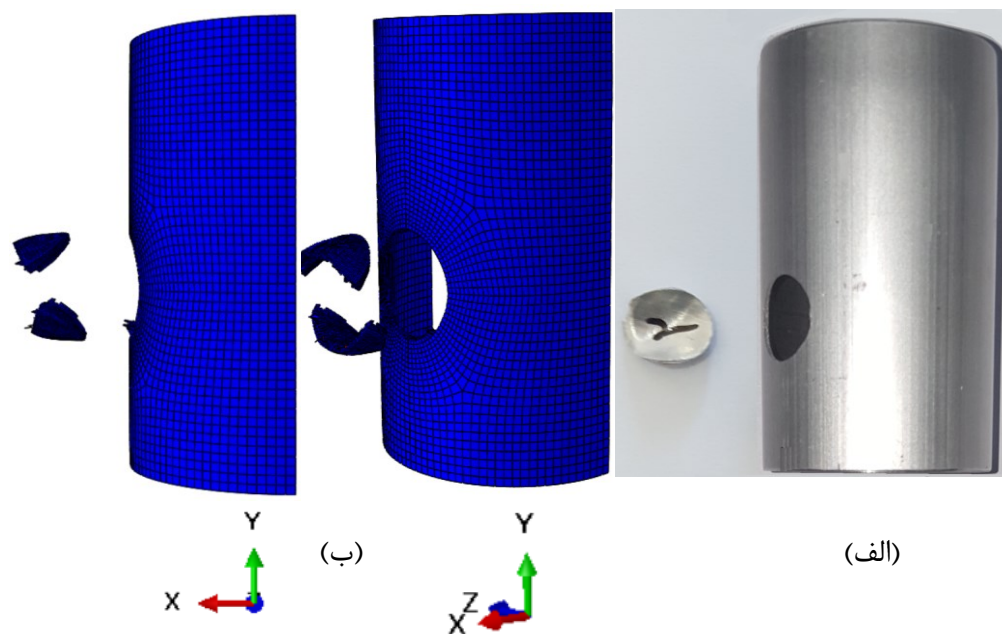


شکل ۴-۳۵- نمونه‌های برش داده شده و مناطق برش

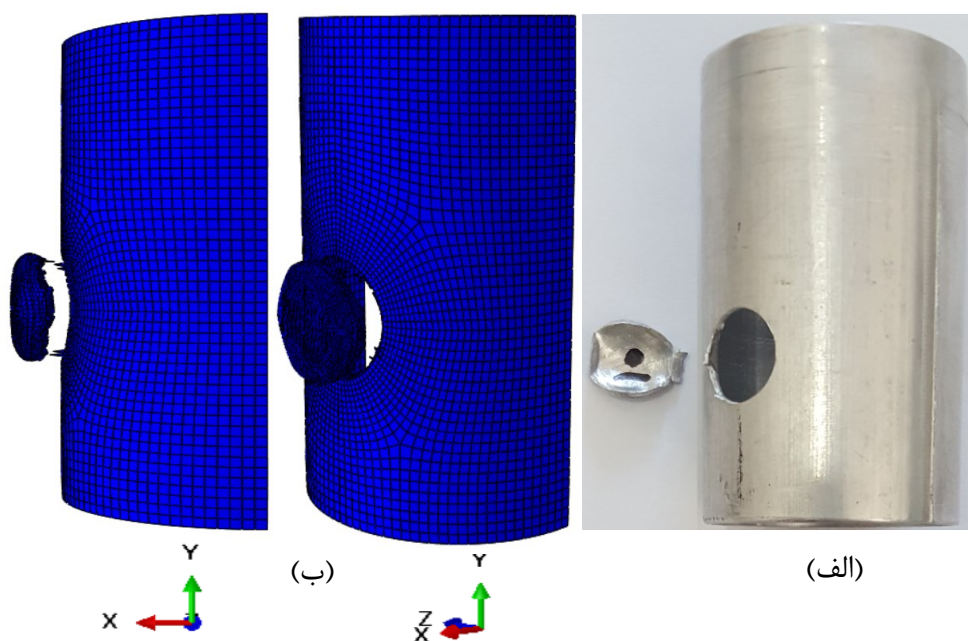


شکل ۴-۳۶- نمونه‌های معیوب شده ابزار الاستومری با سختی Shore-A ۵۰ حین اجرای آزمون

در شکل‌های ۴-۳۷ و ۴-۳۸ هندسه قطعات سوراخ‌کاری شده برای دو نمونه T02 و T10، به ترتیب بدون استفاده از سنبه مقابل و با استفاده از سنبه مقابل در آزمون‌های تجربی در مقایسه با شبیه‌سازی معادل آنها در کنار یکدیگر نشان داده شده است که انطباق بسیار خوبی میان آنها مشاهده می‌شود.



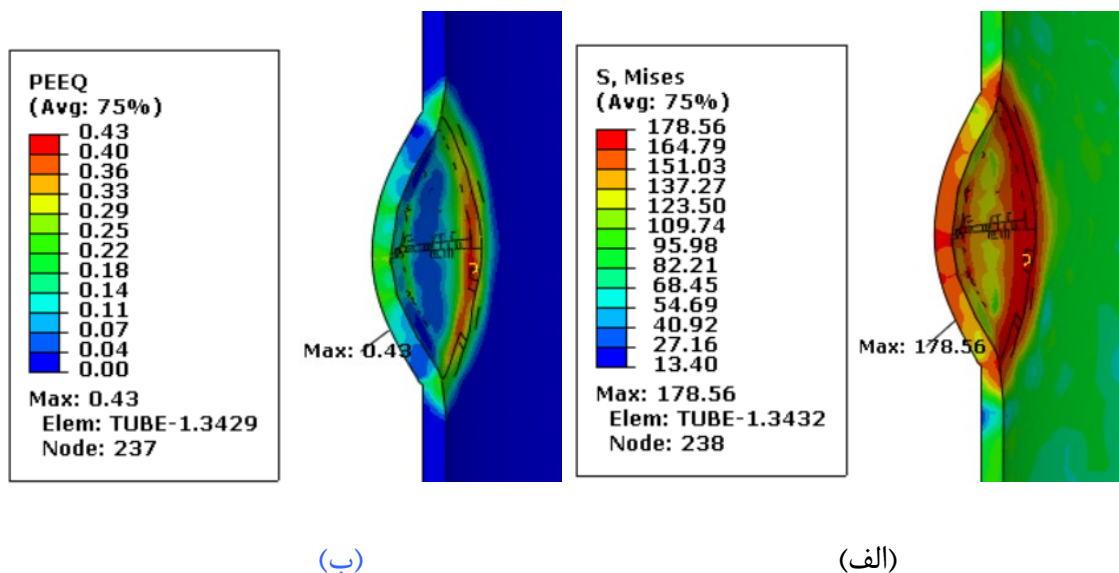
شکل ۴-۳۷- هندسه تغییر شکل الف) نمونه تجربی T02 ب) شبیه‌سازی معادل آن (S01) در دو وضعیت



شکل ۴-۳۸- هندسه تغییر شکل الف) نمونه تجربی T10 ب) شبیه‌سازی معادل آن (S06) در دو وضعیت

۴-۶- بررسی شکست در نمونه‌های شبیه‌سازی

همان‌گونه که گفته شد، در آزمون‌های تجربی فرایند سوراخ کاری لوله با ضخامت‌های ۱ mm، ۱/۴ mm و ۱/۸ mm، نمونه‌ها دچار شکست شدند. نرم‌افزار آباکوس تنظیماتی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا شرایط شکست نمونه از طریق حذف المان‌هایی که شرایط شکست در مورد آنها ارضا می‌شود، شبیه‌سازی شود. در مورد نمونه‌های شبیه‌سازی شده با المان‌های C3D8R، شکست به درستی شبیه‌سازی شده که در نمایش بصری قابل مشاهده است. در شکل ۴-۳۹ به طور نمونه توزیع مقدار تنش فون میزز و کرنش مومسان معادل (PEEQ) در ناحیه شکست برای آزمون شبیه‌سازی شماره S01 در لحظه قبل از شکست ارائه شده است. همان‌طور که می‌دانیم رسیدن کرنش به مقدار PEEQ به معنی شکست نمونه است [۸۹]. با توجه به این توزیع‌ها مشخص است بیشترین مقدار تنش و کرنش برای نمونه‌ای که در آستانه شکست است در ناحیه تماس نمونه با لبه تیز سوراخ قالب اتفاق می‌افتد. بنابراین با افزایش فشار وارده بر ابزار الاستومری این ناحیه مستعد پارگی و وقوع شکست است.



شکل ۴-۳۹- الف) توزیع تنش فون میزز (MPa) بر اساس معیار شکست GTN (ب) کرنش مومسان معادل برای آزمون شبیه‌سازی S01

۴-۷- معیار حذف المان‌ها از محاسبه‌ها

برای محاسبه محدوده‌ی شکل‌پذیری، به خصوص برش در بسیاری از مطالعات تجربی از معیارهای شکست نرم مختلف استفاده می‌شود. در این پژوهش از معیار شکست نرم کرنش مومسان معادل استفاده شد. این معیار به صورت رابطه ۴-۵ تعریف می‌شود [۱۲]:

$$\varepsilon_{eq} = C \quad 4-5$$

که در آن ε_{eq} کرنش مومسان معادل و C مقدار ثابتی است که جزء خواص ماده بوده و از آزمون‌های تجربی مثل آزمون کشش به دست می‌آید که در جدول ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳- معیار شکست نرم برای حذف المان‌ها از محاسبه‌ها

مقدار ثابت C	رابطه مربوطه	معیار شکست نرم
۰/۴۵	$\varepsilon_{eq} = C$	کرنش مومسان معادل

با توجه به این معیار هنگامی که کرنش پلاستیک معادل در نمونه‌های آزمون به مقدار ثابت C برسد قطعه به شکست می‌رسد.

۴-۸- بررسی تغییرات کسر حجمی حفره‌ها در شبیه‌سازی

یکی از متغیرهای مدل شکست GTN، کسر حجمی حفره‌ها (VVF) است که در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به مطالعه آن می‌پردازیم.

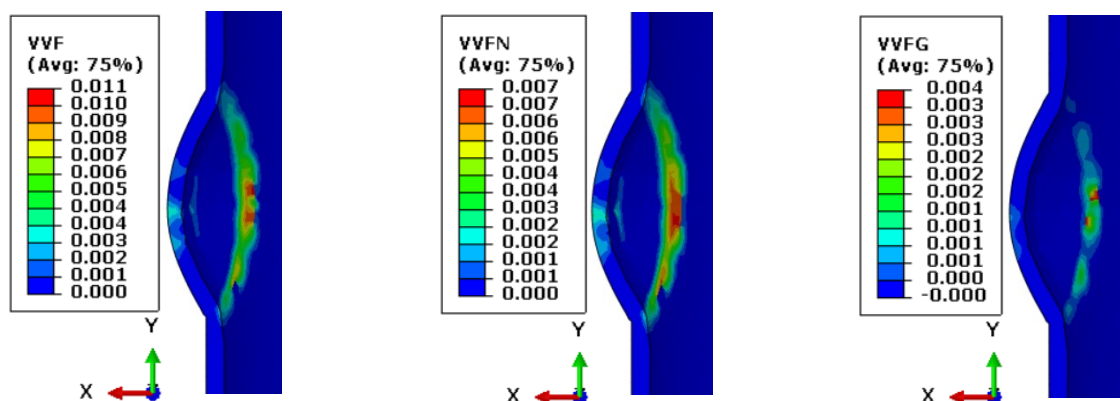
در شکل‌های ۴-۴۰ الی ۴-۴۷ کسر حجمی حفره‌ها، کسر حجمی جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی شده ارائه شده است که به طور نمونه به بررسی این مطلب در مورد آزمون شبیه‌سازی S01 (شکل ۴-۴۰) می‌پردازیم.

در شکل ۴-۴۰ الف توزیع کسر حجمی حفره‌ها (VVF) در لحظه قبل از شکست (لحظه شروع تخریب اولین المان) نمایش داده شده است. نمو کسر حجمی حفره‌ها، ناشی از نمو رشد کسر حجمی حفره‌ها و

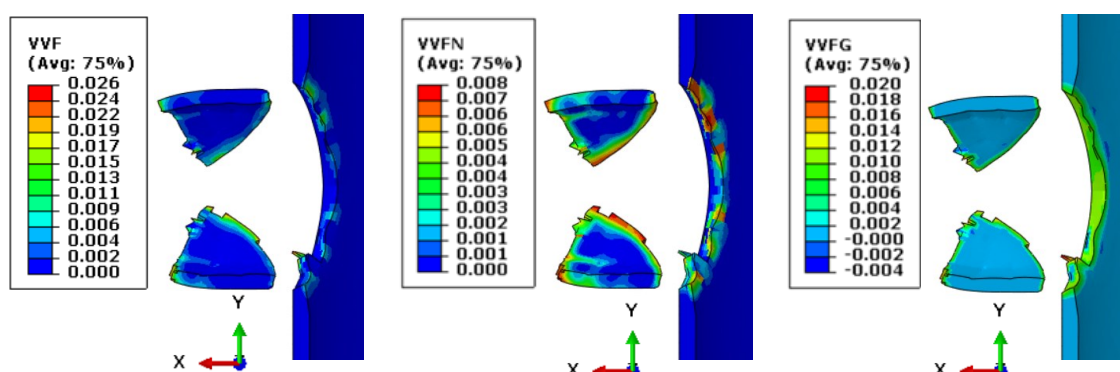
نمو جوانه‌زنی حفره‌ها بر اساس رابطه ۳-۱۱ است که بیشترین مقدار خود را در مرکز ناحیه شکست (جایی که تنش هیدرواستاتیک حداکثر است) دارد که با رنگ قرمز مشخص شده است.

در شکل ۴-۴۰-ب نیز توزیع کسر حجمی حفره‌ها پس از شکست نمونه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کسر حجمی حفره‌ها (VVF) مقداری کمتر از مجموع نمو کسر حجمی حفره‌ها ناشی از نمو رشد کسر حجمی حفره‌ها و نمو جوانه‌زنی حفره‌ها دارد که به معنی وقوع شکست در نمونه است. نمو رشد حفره‌ها در اثر نمو کرنش مومسان حجمی بر اساس رابطه ۳-۱۲ به وجود می‌آید که نقش عمده در نمو کسر حجمی حفره‌ها دارد که بیشترین مقدار آن در المان‌های شکل ۴-۴۰-ب به رنگ قرمز مشاهده می‌شود.

همچنین در همان شکل ۴-۴۰-ب توزیع کسر حجمی حفره‌ها ناشی از جوانه‌زنی حفره‌ها (VVFN) بعد از تخریب اولین المان ارائه شده است. نمو جوانه‌زنی حفره‌ها در اثر نمو کرنش مومسان انحرافی بر اساس رابطه ۳-۱۴ به وجود می‌آید و مقدار حداکثر آن در جایی از ماده به وجود می‌آید که شروع و انتشار ترک در آن ناحیه (ناحیه تماس ابزار الاستومری با دیواره داخلی لوله) ایجاد می‌شود که با شروع روند جوانه‌زنی حفره‌ها، کاهش سریع ظرفیت تحمل بار در نمونه سوراخ‌کاری ایجاد می‌شود.

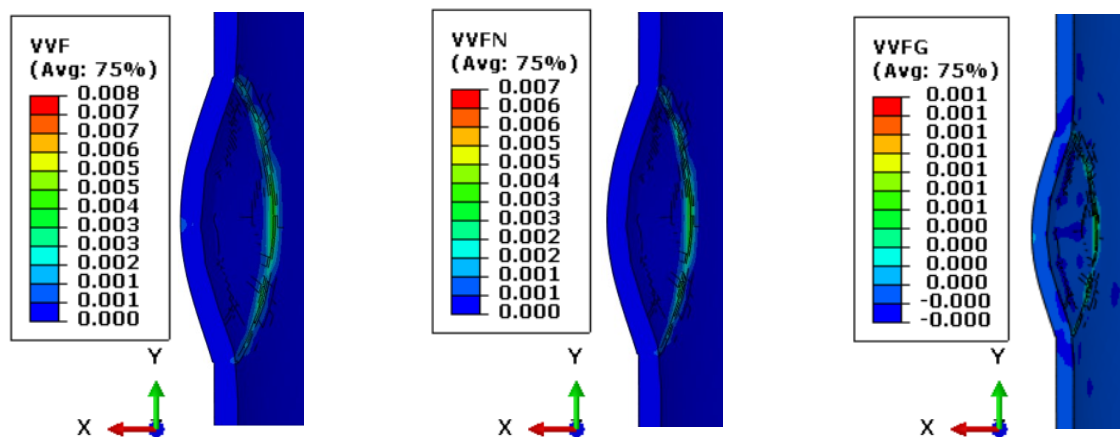


(الف)

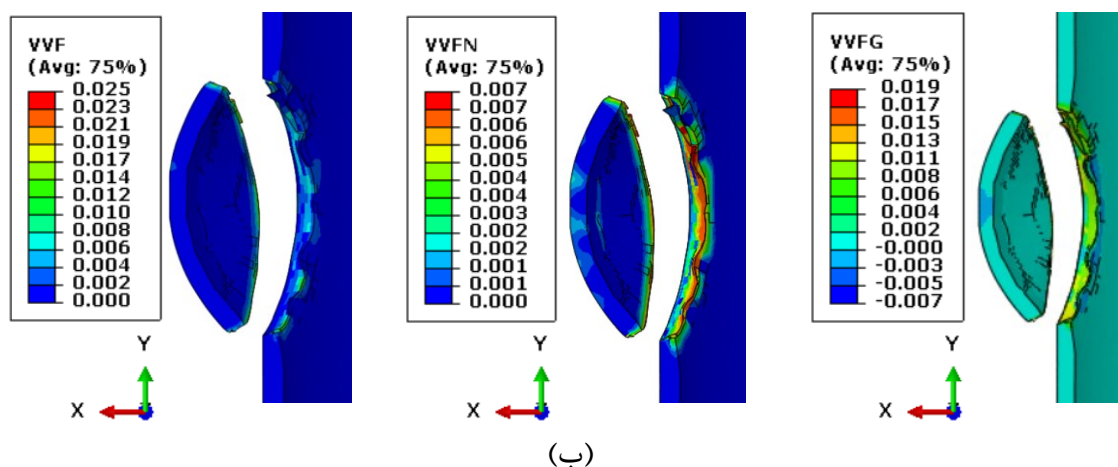


(ب)

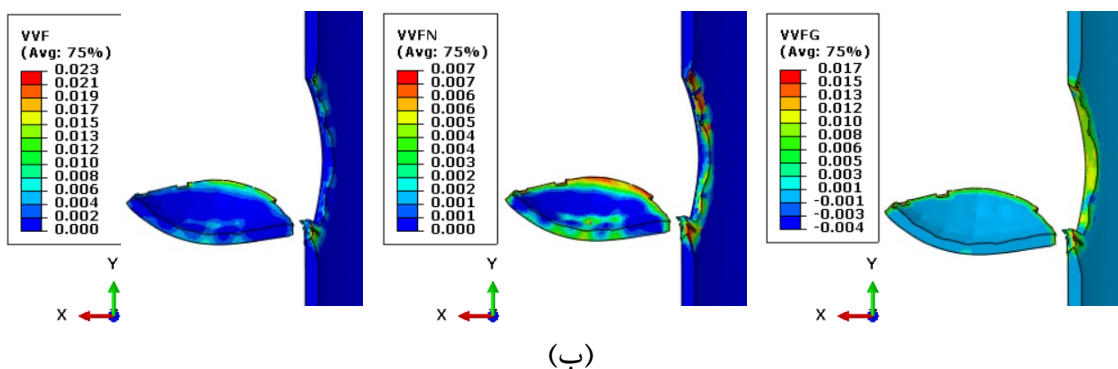
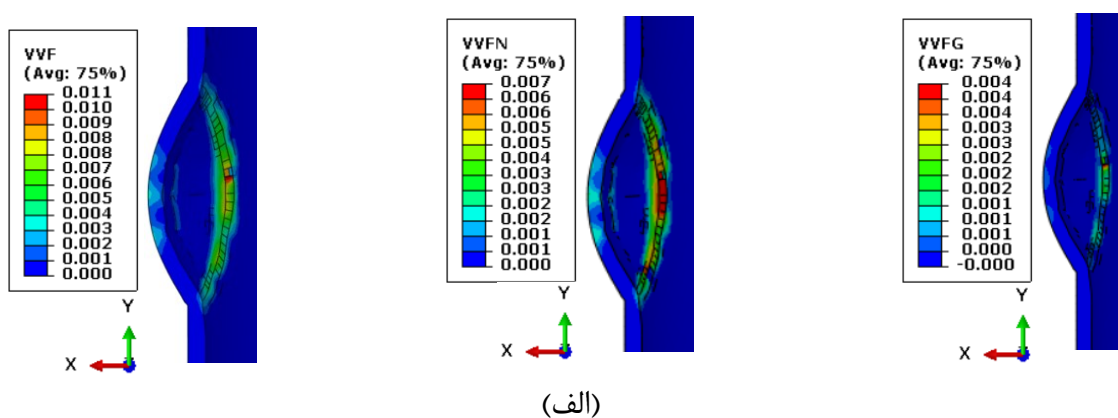
شکل ۴-۴۰- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S01 (الف) لحظه قبل از شکست (ب) پایان شکست



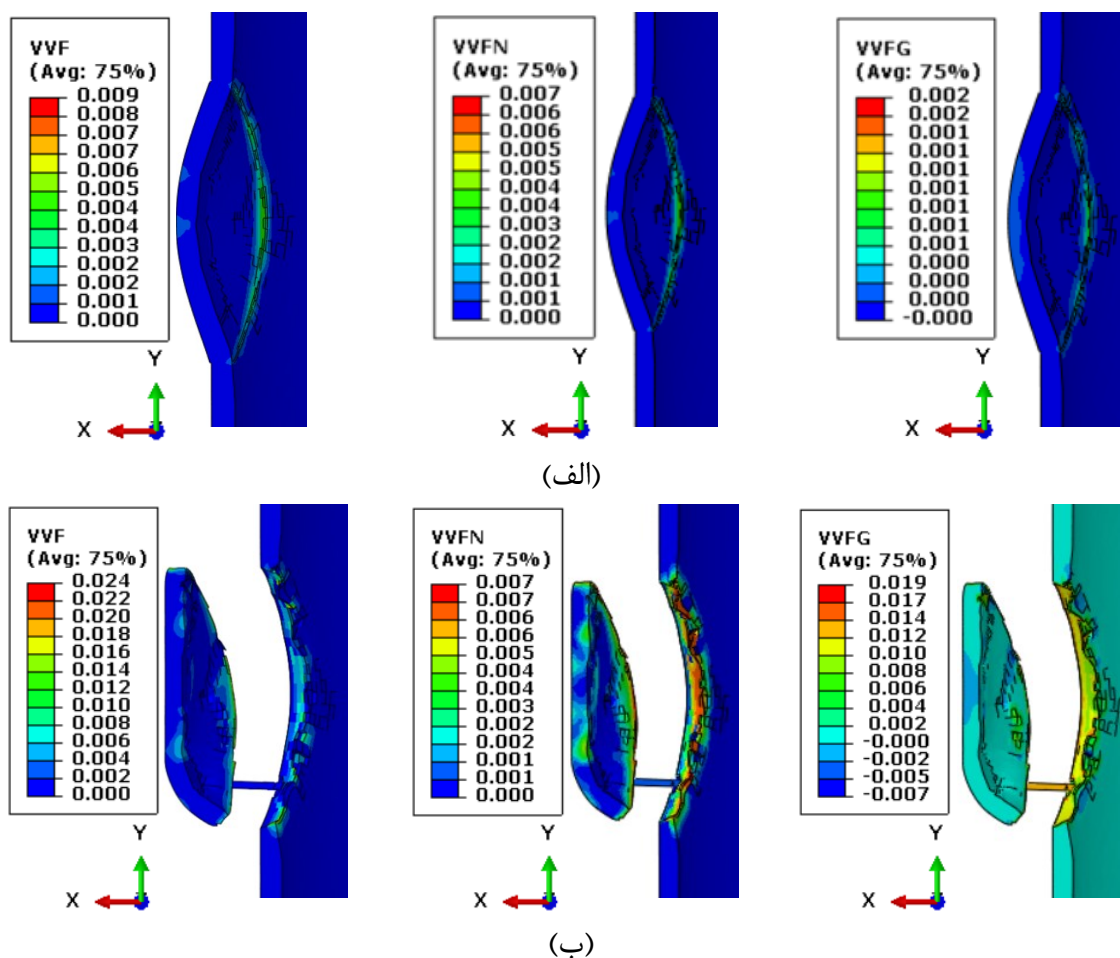
(الف)



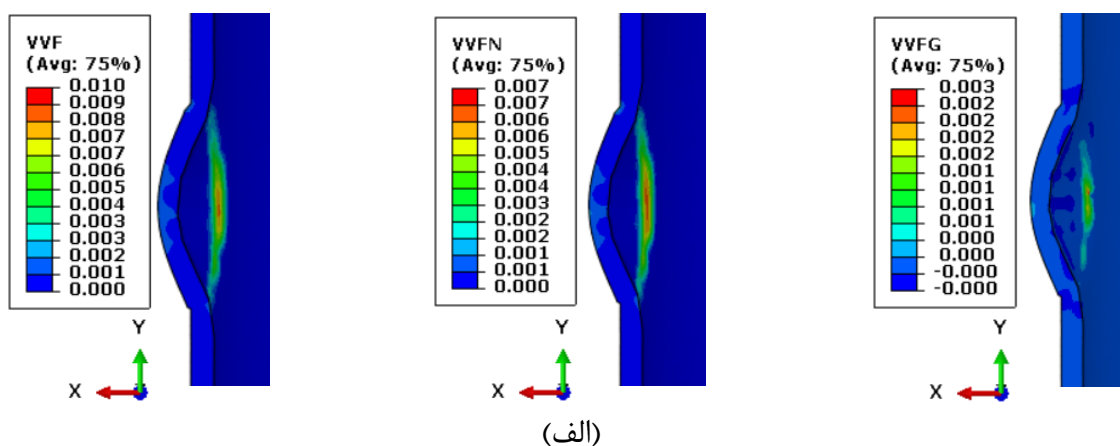
شکل ۴-۴۱- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S02
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست

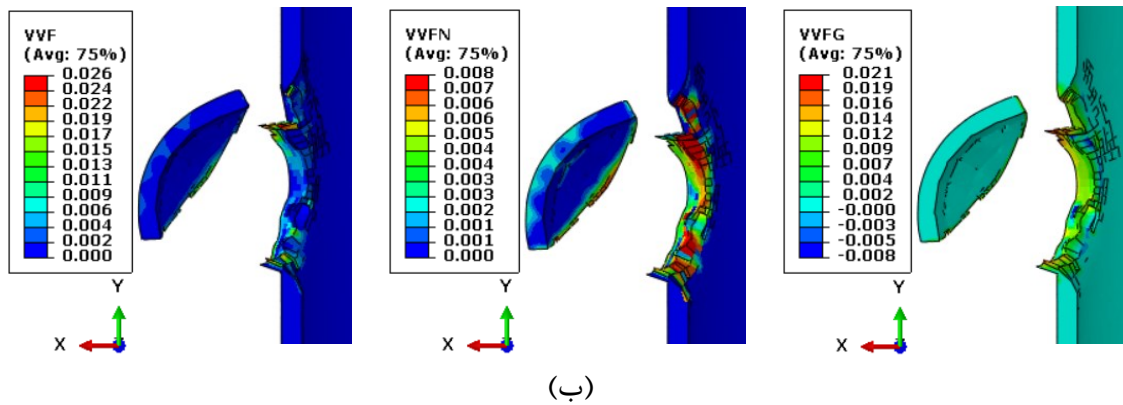


شکل ۴-۴۲- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S03
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست

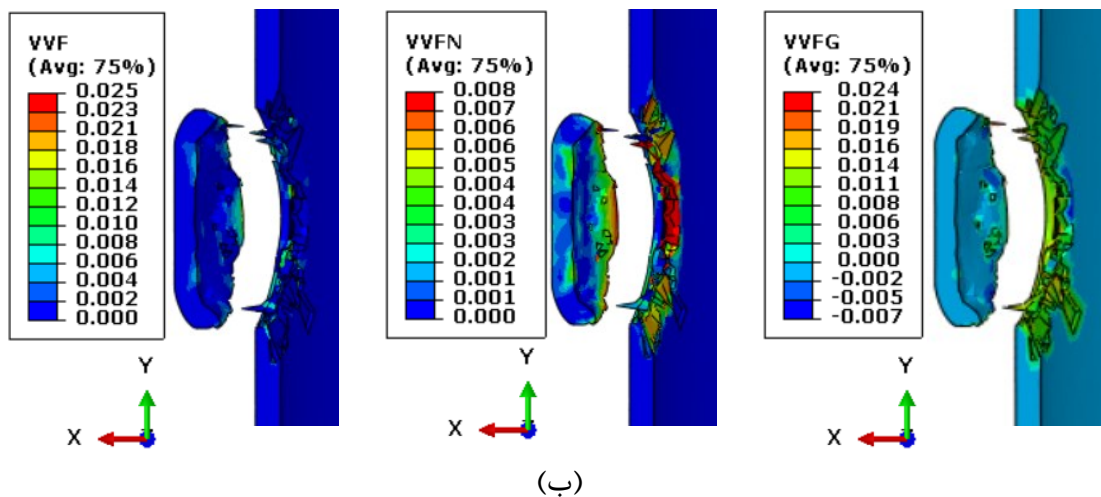
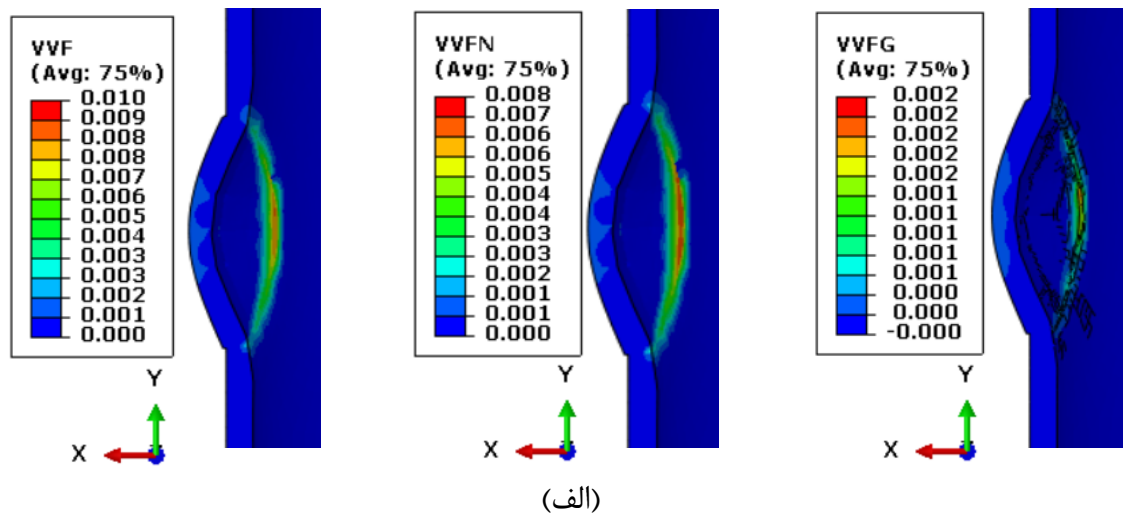


شکل ۴-۴۳- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S04
(الف) لحظه قبل از شکست (ب) پایان شکست

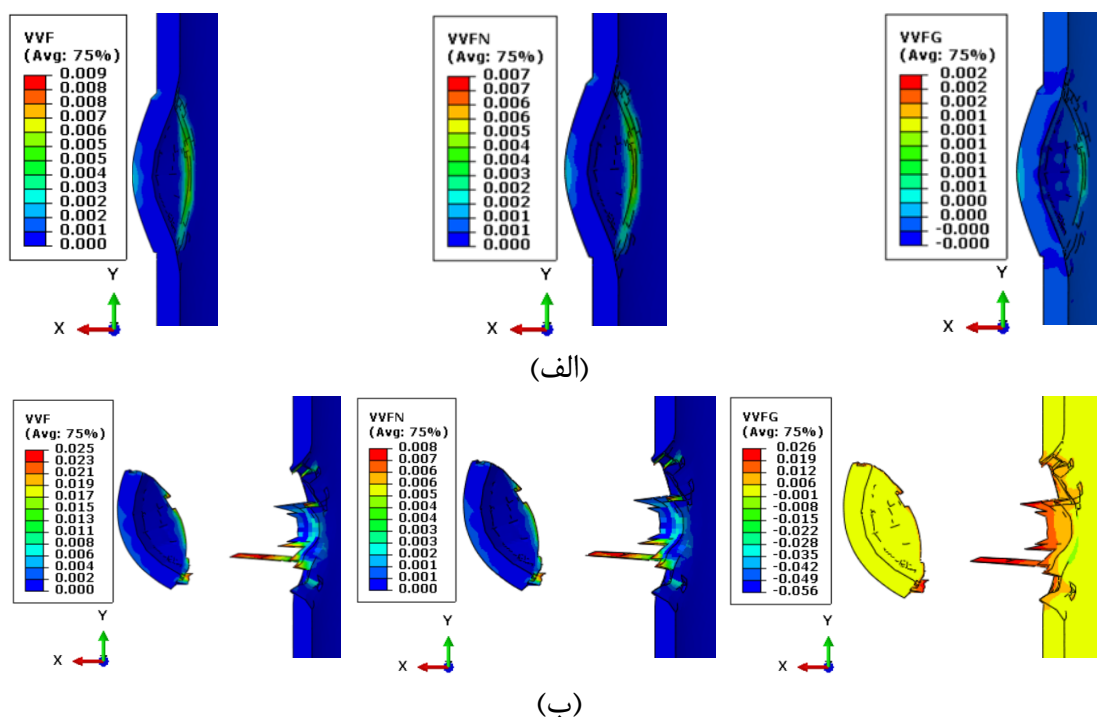




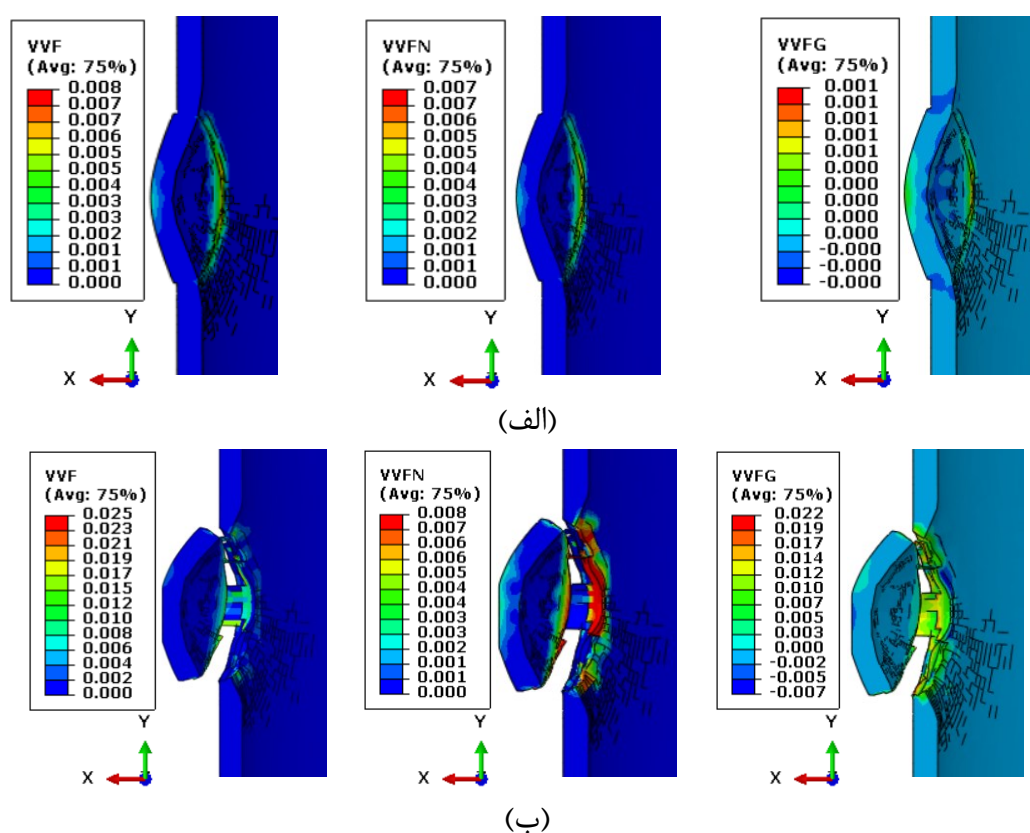
شکل ۴-۴۴- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S05
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست



شکل ۴-۴۵- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S06
الف) لحظه قبل از شکست ب) پایان شکست



شکل ۴-۴۶- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S07
(الف) لحظه قبل از شکست (ب) پایان شکست



شکل ۴-۴۷- توزیع کسر حجمی حفره‌ها بر اساس معیار شکست GTN برای آزمون شبیه‌سازی S08
(الف) لحظه قبل از شکست (ب) پایان شکست

فصل ۵ نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این بخش از پایان‌نامه به نتیجه‌گیری نهایی در رابطه با نتایج ارائه شده در فصل چهار پرداخته و نقاط قوت و ضعف پژوهش صورت گرفته بیان خواهد شد. در پایان، با هدف ارتقا و رفع عیوب کارهای آینده در این خصوص از زمینه‌ی کاری، پیشنهادهایی ارائه خواهد شد.

۵-۲- نتیجه‌گیری

در پژوهش انجام‌شده به بررسی عددی و تجربی فرایند سوراخ‌کاری لوله آلومینیومی با ابزار الاستومری پرداخته شد. در بخش عددی، شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری با استفاده از الگوی پلاستیسیته مواد متخلخل موجود در نرم‌افزار آباکوس که بیانگر الگوی GTN است انجام شد و اثر ضخامت لوله، سختی ابزار الاستومری و استفاده یا عدم استفاده از سنبه مقابل و تأثیر آنها بر منحنی نیرو-جابجایی فرایند مورد تحلیل قرار گرفت. در بخش تجربی، ابتدا لوله آلومینیومی و ابزار الاستومری (با دو نوع سختی ۵۰ shore-A و ۸۵ shore-A) تهیه و خواص مکانیکی آنها بر اساس استانداردهای موجود تعیین شد.

برای اجرای آزمایش‌های تجربی، قالب مناسب فرایند طراحی و ساخته شد. در نهایت پس از اجرای آزمون‌های تجربی نتایج به دست‌آمده از این پژوهش به شرح زیر ارائه شده است:

- خواص مکانیکی لوله‌ی آلومینیومی به کمک آزمون کشش تک‌محوری و بر اساس استاندارد ASTM A370 تعیین شد.
- منحنی تنش-کرنش مهندسی ابزار الاستومری (پلی‌اورتان) بر اساس استاندارد ASTM D575 91 به دست‌آمده و رفتار آن به عنوان یک ماده ابرکشسان تراکم ناپذیر با کمک معادله ساختاری مونی-ریولین مدل شد. ضرایب C_{10} و C_{01} ثوابت معادله مونی-ریولین برای این ماده به ترتیب $1/0.4$ و $0/1.93$ مگاپاسکال برای سختی shore-A ۸۵ به دست آمد. برای پلی‌اورتان با سختی shore-A ۵۰ نیز این ضرایب از مراجع معتبر استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفت.
- برای انتخاب و تعیین پارامترهای مدل شکست GTN تعدادی از آنها از مراجع معتبر استخراج و برای دیگر پارامترها از آزمون کشش تک‌محوری و روش کالیبراسیون معکوس بهره گرفته شد. با بررسی‌های مختلف، مقادیر سه پارامتر f_C ، مقدار بحرانی کسر حجمی حفره‌ها، f_F ، کسر حجمی حفره‌ها در پایان شکست و f_N ، کسر حجمی مربوط به جوانه‌زنی حفره‌های جدید به ترتیب برابر $0/0.1$ ، $0/0.27$ و $0/0.076$ تعیین شدند. این پارامترها در بخش عددی فرایند سوراخ‌کاری لوله جهت پیش‌بینی شکست لوله بر اساس معیار شکست GTN مورد استفاده قرار گرفتند. در بخش عددی با توجه به پارامترهای در نظر گرفته شده هشت مورد آزمون شبیه‌سازی انجام گرفت. پس از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده جهت اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آزمون‌های تجربی معادل با چهارده نمونه با شرایط جدول ۲-۳ انجام شد.
- با مقایسه نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی نتایج زیر حاصل شد:
- با توجه به انجام موفقیت‌آمیز آزمون‌های تجربی اطمینان حاصل شد که استفاده از ابزار الاستومری به‌جای سنبه در سوراخ‌کاری لوله امکان‌پذیر بوده و موجب کاهش هزینه‌های تولید می‌شود.

- استفاده از پلی‌اورتان با سختی پایین موجب کاهش نیروی فرایند شده و هنگامی که تعداد تولید کم بوده یا ظرفیت پرس پایین باشد مناسب است. اما از آنجا که نمونه‌های پلی‌اورتان استفاده شده با سختی پایین حین انجام آزمون دچار گسیختگی و تخریب شدند استفاده از آن در تعداد بالا منطقی و به صرفه نیست.
- استفاده از ابزار الاستومری با سختی پایین تنها برای سوراخ‌کاری لوله با ضخامت کمتر مناسب است.
- با مشاهده و بررسی سطح شکست نمونه‌های با ضخامت $1/8 \text{ mm}$ این نتیجه به دست می‌آید که در سوراخ‌کاری لوله با استفاده از ابزار الاستومری در ضخامت‌های بالاتر کیفیت برش مطلوبی حاصل نمی‌شود.
- با استفاده از سنبه مقابل نسبت به حالتی که از سنبه مقابل استفاده نمی‌شود نیروی کمتری در عملیات سوراخ‌کاری لوله مورد آزمون لازم است.
- با توجه به رابطه ۳-۱۱ نمو افزایش حفره‌ها در مدل GTN به دو قسمت نمو افزایش حفره‌های ناشی از رشد حفره‌ها و نمو افزایش ناشی از جوانه‌زنی حفره‌ها تقسیم می‌شود. تحقق این امر در شکل‌های ۴-۴۰ تا ۴-۴۷ مشخص است.
- مطابقت نسبی بین منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی در آزمون کشش تجربی و شبیه‌سازی، صحت کاربرد مدل شکست GTN در مد اول شکست متناظر با شکست مسطح در مواد نرم را نشان می‌دهد.

۵-۳- ارائه‌ی پیشنهادها

به منظور انجام مطالعه و پژوهش بیشتر در ادامه پایان‌نامه حاضر موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- ۱- بررسی سوراخ‌کاری غیر دایره‌ای بر روی سطح لوله.
- ۲- امکان‌سنجی برش‌کاری هم‌زمان چند سوراخ در یک مرحله.
- ۳- استفاده از لودسل (نیروسنج) جهت تعیین مقادیر دقیق نیروی تجربی فرایند.
- ۴- بررسی اثر استفاده از انواع روانکار بر کیفیت برش و نیروی فرایند.
- ۵- تأثیر سرعت رم پرس بر روی کیفیت ناحیه شکست.
- ۶- انجام عملیات سوراخ‌کاری به روش انجام‌شده در پایان‌نامه حاضر برای مواد مختلف.
- ۷- بهینه‌سازی پارامترهای مختلف سوراخ‌کاری.
- ۸- استفاده از سنبه مقابل از جنس ابزار الاستومری با سختی کمتر یا مساوی با ابزار الاستومری داخل لوله.

منبع‌ها

- [1] H. Al-Qureshi, S. Garber, and P. Mellor, "Piercing of metal sheet with rubber pads," *The International Journal of Production Research*, vol. 6, pp. 207-225, 1967.
- [2] B. Babic, "Computer-aided modeling of the rubber-pad forming process," *Materials and technology*, vol. 46, pp. 503-510, 2012.
- [3] M. Koc and O. Cora, "Introduction and state of the art of hydroforming," *Hydroforming for advanced manufacturing*, pp. 1-29, 2008.
- [4] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, "Manufacturing engineering and technology, Prentice Hall, Vol. 5, 2006.
- [5] L.H. Lang, et al., "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 151, pp. 165-177, 2004.
- [6] M. Shiomi, Y. Ueda, and K. Osakada, "Piercing of Steel Sheet by using Hydrostatic Pressure," *CIRP annals*, vol. 55, pp. 255-258, 2006.
- [7] A. Hassannejadasl, D. E. Green, W. J. Altenhof, C. Maris, and M. Mason, "Numerical modeling of multi-stage tube hydropiercing," *Materials & Design*, vol. 46, pp. 235-246, 2012.
- [8] N. Asnafi, G. Lassl, B. Olsson, and T. Nilsson, "Theoretical and experimental analysis of hydropiercing," *SAE Technical Paper*, pp. 129-134, 2003.
- [9] M. Ramezani, Z. M. Ripin, "Rubber-pad forming processes: Technology and applications," Elsevier, 2012. (Book)
- [10] H. Watari, H. Ona, and Y. Yoshida, "Flexible punching method using an elastic tool instead of a metal punch," *Journal of materials processing technology*, vol. 137, pp. 151-155, 2003.
- [11] K. Lange and K. Pöhlandt, *Handbook of metal forming*: McGraw-Hill, 1985.
- [12] R. Hambli and M. Reszka, "Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment ," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 44, pp. 1349-1361, 2002.
- [13] Metal Handbook, Volume 14,"Forming and Forging", Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee, 9th Ed, (1993)
- [14] N. Hatanaka, K. Yamaguch, and N. Takakura, "Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, pp. 64-70, 2003.
- [15] S. Maiti, A. Ambekar, U. Singh, P. Date, and K. Narasimhan, "Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, pp. 249-256, 2000.
- [16] R. Hambli, A. Potiron, and A. Kobi, "Application of design of experiment technique for metal blanking processes optimization," *Mécanique & Industries*, vol. 4, pp. 175-180, 2003.
- [17] Z. Tekiner, M. Nalbant, and H. Gurun, "An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminum sheet metal," *Materials and Design*, vol. 27, pp. 1134-1138. 2006.
- [18] D. Brokken, W. Brekelmans, and F. Baaijens,, "Numerical modelling of the metal blanking process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 83, pp. 192-199, 1998.

- [19] A. Goijaerts, Y. Stegeman, L. Govaert, D. Brokken, W. Brekelmans, and F. Baaijens,, "Can a new experimental and numerical study improve metal blanking?," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. **103**, 44-50, 2000.
- [20] H. Marouani, A. B. Ismail, E. Hug, and M. Rachik, "Numerical investigations on sheet metal blanking with high speed deformation," *Materials and Design*, vol. **30**, pp. 3566-3571, 2009.
- [21] R. Hambli, " Finite element model fracture prediction during sheet-metal blanking processes," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. **68**, pp. 365-378, 2001.
- [22] S. Thipprakmas, "Application of Taguchi technique to investigation of geometry and position of V-ring indenter in fine-blanking process," *Materials and Design*, vol. **31**, pp. 2496-2500, 2010.
- [23] R. Hambli, F. Guerin," Application of a neural network for optimum clearance prediction in sheet metal blanking processes," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. **39**, pp. 1039-1052, 2003.
- [24] R. Hambli, " BLANKSOFT: a code for sheet metal blanking processes optimization," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. **141**, pp. 234-242, 2003
- [25] F. Djavanroodi, A. Pirgholi, and E. Derakhshani, "FEM and ANN Analysis in Fine-Blanking Process," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. **25**, pp. 864-872, 2010.
- [26] Ľ. DULEBOVÁ and E. SPIŠÁK, "Analysis of some aspects of fine blanking process." *tom XXX* (2013): 119.
- [27] F. Klocke, K. Sweeney, and H.-W. Raedt, "Improved Tool Design for Fine-Blanking through the Application of Numerical Modeling Techniques," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. **115**, pp. 70-75, 2001.
- [28] S. Semiatin, E. Marquard, H. Lampman, C. Karcher, and B. Musgrove, "ASM handbook, vol 14B: Metalworking: sheet forming," *ASM International, Materials Park, Ohio, USA*, pp. 656-669, 2006.
- [29] H. Al-Qureshi, "Factors affecting the strain distributions of thin-walled tubes using polyurethane rod," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. **13**, pp. 403-413, 1971.
- [30] S. Thiruvardhelvan and F. Travis, "Tube bulging with a urethane rod," *Journal of materials processing technology*, vol. **23**, pp. 195-209, 1990.
- [31] S. Thiruvardhelvan, "A theory for initial yield conditions in tube bulging with a urethane rod," *Journal of materials processing technology*, vol. **42**, pp. 61-74, 1994.
- [32] H. G. Nosrati and M. Gerdooei, "Experimental and numerical study of friction in free bulging 304 stainless steel seamed tube using elastic pad," *Modares Mechanical Engineering*, vol. **15**, pp. 30-40, 2015 (In Persian).
- [33] H. G. Nosrati, M. Gerdooei, and M. Falahati Naghibi, "Experimental and Numerical Study on Formability in Tube Bulging: A Comparison Between Hydroforming and Rubber Pad Forming," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. **32**, pp. 1353-1359, 2017.
- [34] H. G. Nosrati, S. M. H. Seyedkashi, and M. Gerdooei, "Investigation of Effective Parameters in Free Bulging of Stainless Steel 304 Tube Using Elastomer Tool," *Modares Mechanical Engineering*, vol. **16**, pp. 191-198, 2016 (In Persian).

- [35] اکبریان کوه خیلی م ص، (۱۳۹۵)، پایان‌نامه ارشد: "بهینه‌سازی متغیرهای فرایند شکل‌دهی اتصالات لوله با استفاده از ابزار الاستومری"، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [36] P. Hertz and S. Garber, "The punching of sheet metal with rubber," *The American Society of Mechanical Engineers, Paper*, pp. 17-22, 1963.
- [37] H. Al-Qureshi, "Analytical investigation of ram movement in piercing operation with rubber pads," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 12, pp. 229-248, 1972.
- [38] نساجیان مقدم، امیرحسین؛ مهدی گردویی و حمزه ممشلی، ۱۳۹۶، بررسی اثر سختی لاستیک و شعاع گوشه قالب در فرایند سوراخ‌کاری ورق با ابزار الاستومری، بیست و پنجمین همایش سالانه مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه تربیت مدرس-انجمن مهندسان مکانیک ایران،
- [39] S. Choi, W. Kim, and Y. Moon, "Analysis of deformation surrounding a hole produced by tube hydro-piercing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 218, pp. 1091-1097, 2004.
- [40] Q. Wang, N. Teng, D. M. Cai, and S. H. Zhang, "Study on Deformation Mechanism of Tube Hydropiercing," in *Advanced Materials Research*, vol. 97: Trans Tech Publ, pp. 166-169, 2010.
- [41] Z. Wu, S. Li, W. Zhang, and W. Wang, "Ductile fracture simulation of hydropiercing process based on various criteria in 3D modeling," *Materials and Design*, vol. 31, pp. 3661-3671, 2010.
- [42] L. Gang, J.-f. LIN, W. Gang, H.-b. SU, X.-p. CHEN, and H.-m. JIANG, "Influence of tube properties on quality of hydropiercing," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, pp. s456-s460, 2011.
- [43] A. Hassannejadasl and D. E. Green, "Numerical Modeling of Tube Hydropiercing Using Phenomenological and Micro-Mechanical Damage Criteria," in *Key Engineering Materials*, vol. 549, pp. 172-179, 2013.
- [44] H. Czichos, T. Saito, and L. Smith, *Springer handbook of materials measurement methods* vol. 978: Springer Berlin, 2006.
- [45] A. Standard, "D575-91, 2010, "Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [46] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*: Cengage Learning, 2011.
- [47] T. L. Anderson. "Fracture Mechanics", CRC Press. Inc, New York, 1995.
- [48] J. Lemaitre, *A course on damage mechanics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [49] G. E. Dieter and D. J. Bacon, *Mechanical metallurgy* vol. 3: McGraw-Hill New York, 1986.
- [50] تویسرکانی، حسین، "اصول علم مواد (ساختار، خواص و مهندسی مواد)"، ویرایش سوم، چاپ هجدهم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۳.
- [51] M. A. Meyers and K. K. Chawla, *Mechanical behavior of materials*. Cambridge university press, 2008.
- [52] B. Bilby, I. Howard, Z. Li, and M. Sheikh, "Some experience in the use of damage mechanics to simulate crack behaviour in specimens and structures," *International journal of pressure vessels and piping*, vol. 64, pp. 213-223, 1995.

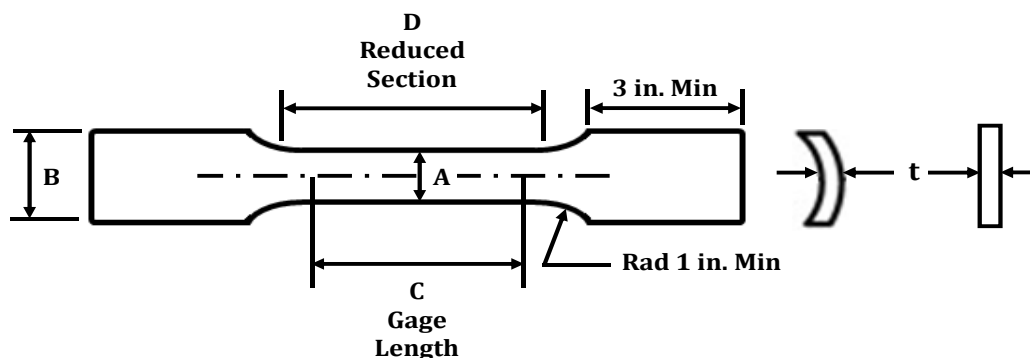
- [53] A. L. Gurson, "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media," *Journal of engineering materials and technology*, vol. 99, pp. 2-15, 1977.
- [54] V. Tvergaard, "Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions", *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 17, pp. 389–407, 1981.
- [55] V. Tvergaard, "On Localization in ductile materials containing spherical voids", *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 18, pp. 237–252, 1982.
- [56] V. Tvergaard, "Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar", *International Acta Metal Mater*, Vol. 32, pp. 157–169, 1984.
- [57] A. Needleman and V. Tvergaard, "An analysis of ductile rupture in notched bars," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 32, pp. 461-490, 1984.
- [58] V. Uthaisangsuk, U. Prah, S. Münstermann, and W. Bleck, "Experimental and numerical failure criterion for formability prediction in sheet metal forming," *Computational materials science*, vol. 43, pp. 43-50, 2008.
- [59] C. C. Chu and A. Needleman, "Void nucleation effects in biaxially stretched sheets," *Journal of engineering materials and technology*, vol. 102, pp. 249-256, 1980.
- [60] B. Corbett, "Numerical simulations of target hole diameters for hypervelocity impacts into elevated and room temperature bumpers," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 33, pp. 431-440, 2006.
- [61] L. Bauvineau, H. Burlet, C. Eripret, and A. Pineau, "Modelling ductile stable crack growth in a C-Mn steel with local approaches," *Le Journal de Physique IV*, vol. 6, pp. C6-33-C6-42, 1996.
- [62] C. Betegon, C. Rodriguez, and F. Belzunce, "Analysis and modelisation of short crack growth by ductile fracture micromechanisms," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 20, pp. 633-644, 1997.
- [63] S. Hao, W. Brocks, J. Heerens, and D. Hellmann, "Simulation of 3D ductile crack growth by the Gurson-Tvergaard-Needleman model." in *ECFII*, 1996.
- [64] D. Steglich, , and W. Brocks. "Micromechanical modelling of damage and fracture of ductile materials." *Fatigue & fracture of engineering materials and structures*, vol. 21, pp. 1175-1188, 1998
- [65] Z. L. Zhang, "A sensitivity analysis of material parameters for the Gurson constitutive model." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* vol. 19, pp. 561-570, 1996.
- [66] W. Brocks, D.-Z. Sun, and A. Honig, "Verification of micromechanical models for ductile fracture by cell model calculations." *Computational Materials Science*, vol. 7, pp. 235-241, 1996.
- [67] M. Dong, C. Prioul, and D. François. "Damage effect on the fracture toughness of nodular cast iron: part I. Damage characterization and plastic flow stress modeling." *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 6, pp. 2245-2254, 1997.
- [68] K. Decamp, L. Bauvineau, J. Besson, and A. Pineau, "Size and geometry effects on ductile rupture of notched bars in a C-Mn steel: experiments and modelling," *International Journal of Fracture*, vol. 88, pp. 1-18, 1997.
- [69] O. Søvik, "Experimental and numerical investigation of void nucleation in an AlMgSi alloy," *Le Journal de Physique IV*, vol. 6, pp. C6-155-C6-164, 1996.

- [70] A. K.Ghosal, and R. Narasimhan. "Numerical simulations of hole growth and ductile fracture initiation under mixed-mode loading." *International Journal of Fracture* , vol. 77, pp. 281-304, 1996.
- [71] M. Kuna, and D. Z. Sun. "Three-dimensional cell model analyses of void growth in ductile materials." *International Journal of Fracture*, vol. 81, pp. 235-258, 1996.
- [72] D. Z. Sun, D. Siegele, B. Voss, and W. Schmitt. "Application of local damage models to the numerical analysis of ductile rupture." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol .12, pp. 201-212, 1989.
- [73] T. Siegmund, G. Bernauer, and W. Brocks, "Two models of ductile fracture in contest: porous metal plasticity and cohesive elements," in *ECF12*, 1998.
- [74] L. Xia, , and L. Cheng. "Transition from ductile tearing to cleavage fracture: a cell-model approach." *International Journal of Fracture*, vol. 87, pp. 289-306, 1997.
- [75] W. Schmitt, D. Z. Sun, and J. G. Blauel. "Damage mechanics analysis (Gurson model) and experimental verification of the behaviour of a crack in a weld-cladded component." *Nuclear engineering and design*, vol. 174, pp. 237-246, 1997.
- [76] B. Skallerud, and Z. L. Zhang. "A 3D numerical study of ductile tearing and fatigue crack growth under nominal cyclic plasticity." *International Journal of Solids and Structures*, vol. 34, pp. 3141-3161, 1997.
- [77] T. Pardoen, , I. Doghri, and F. Delannay. "Experimental and numerical comparison of void growth models and void coalescence criteria for the prediction of ductile fracture in copper bars." *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 541-552, 1998.
- [78] M. Springmann, and M. Kuna, "Identification of material parameters of the Gurson- Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical techniques," *Computational Materials Science*, vol. 32, pp. 544- 552, 2005.
- [79] C.-K. Oh, Y.-J. Kim, J.-H. Baek, Y.-P. Kim, and W. Kim. "A phenomenological model of ductile fracture for API X65 steel." *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 49, pp. 1399-1412, 2007.
- [80] S. Yang, J. Zhou, X. Ling, and Z. Yang. "Effect of geometric factors and processing parameters on plastic damage of SUS304 stainless steel by small punch test." *Materials & Design*, vol. 41, pp. 447-452, 2012.
- [81] I. Scheider, A. Nonn, A. Völling, A. Mondry, and C. Kalwa. "A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines." *Procedia materials science*, vol. 3, pp. 1956-1964, 2014.
- [82] Yu, H., Tieu, K., Lu, C., Lou, Y., Liu, X., Godbole, A. and Kong, C. "Tensile fracture of ultrafine grained aluminum 6061 sheets by asymmetric cryorolling for microforming," *Int. J. Damage Mech*, vol. 23, pp. 1077–1095, 2014.
- [83] L. Fratini, A. Lombardo, and F.Micari. "Material characterization for the prediction of ductile fracture occurrence: An inverse approach," *Journal of Materials processing Technology*, vol. 60, pp. 311-316,1996.
- [84] N. Benseddig and A. Imad, "A ductile fracture analysis using a local damage model," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 85, pp. 219–227, 2008.
- [85] W. V. Mars, "Cracking energy density as a predictor of fatigue life under multiaxial conditions." *Rubber chemistry and technology*, vol. 75, pp. 1-17, 2002.
- [86] A. Del Prete, G. Papadia, and B. Manisi, "Computer aided modelling of rubber pad forming process," in *Key Engineering Materials*, vol. 473, pp. 637-644, 2011.

- [87] M. Fröling, "*Strength Design Methods for Glass Structures*. Division of Structural Mechanics," Department of Construction Sciences, Lund University, 2013.
- [88] Z. Nowak, "Constitutive modelling and parameter identification for rubber-like materials," *Engineering Transactions*, vol. 56, pp. 117–157, 2008.
- [89] ABAQUS 6.14-2, Getting Started with ABAQUS: Interactive Edition

پیوست یک

(۱) ابعاد اینچی نمونه آزمون کشش از لوله بر اساس استاندارد ASTM A370



Dimentions

Specimen No.	Dimentions. In.			
	A	B	C	D
1	$1/2 \pm 0.015$	$11/16$ approximately	2 ± 0.005	$2 1/4$ min
2	$3/4 \pm 0.031$	1 approximately	2 ± 0.005	$2 1/4$ min
			4 ± 0.005	$4 1/2$ min
3	1 ± 0.062	$1 1/2$ approximately	2 ± 0.005	$2 1/4$ min
			4 ± 0.005	$4 1/2$ min
4	$1 1/2 \pm .125$	2 approximately	2 ± 0.010	$2 1/4$ min
			4 ± 0.015	$4 1/2$ min
			8 ± 0.020	9 min
5	$1/4 \pm .002$	$3/8$ approximately	1 ± 0.003	$1 1/4$ min

NOTE 1-Cross-sectional area may be calculated by multiplying A and t .

NOTE 2-The dimension t is the thickness of the test specimen as provided for in the applicable material specifications.

NOTE 3-The reduced section shall be parallel within 0.010 in. and may have a gradual taper in width from the ends toward the center, with the ends not more than 0.010 in. wider than the center.

NOTE 4-The ends of the specimen shall be symmetrical with the center line of the reduced section within 0.10 in.

NOTE 5-Metric equivalent: 1 in. = 25.4 mm.

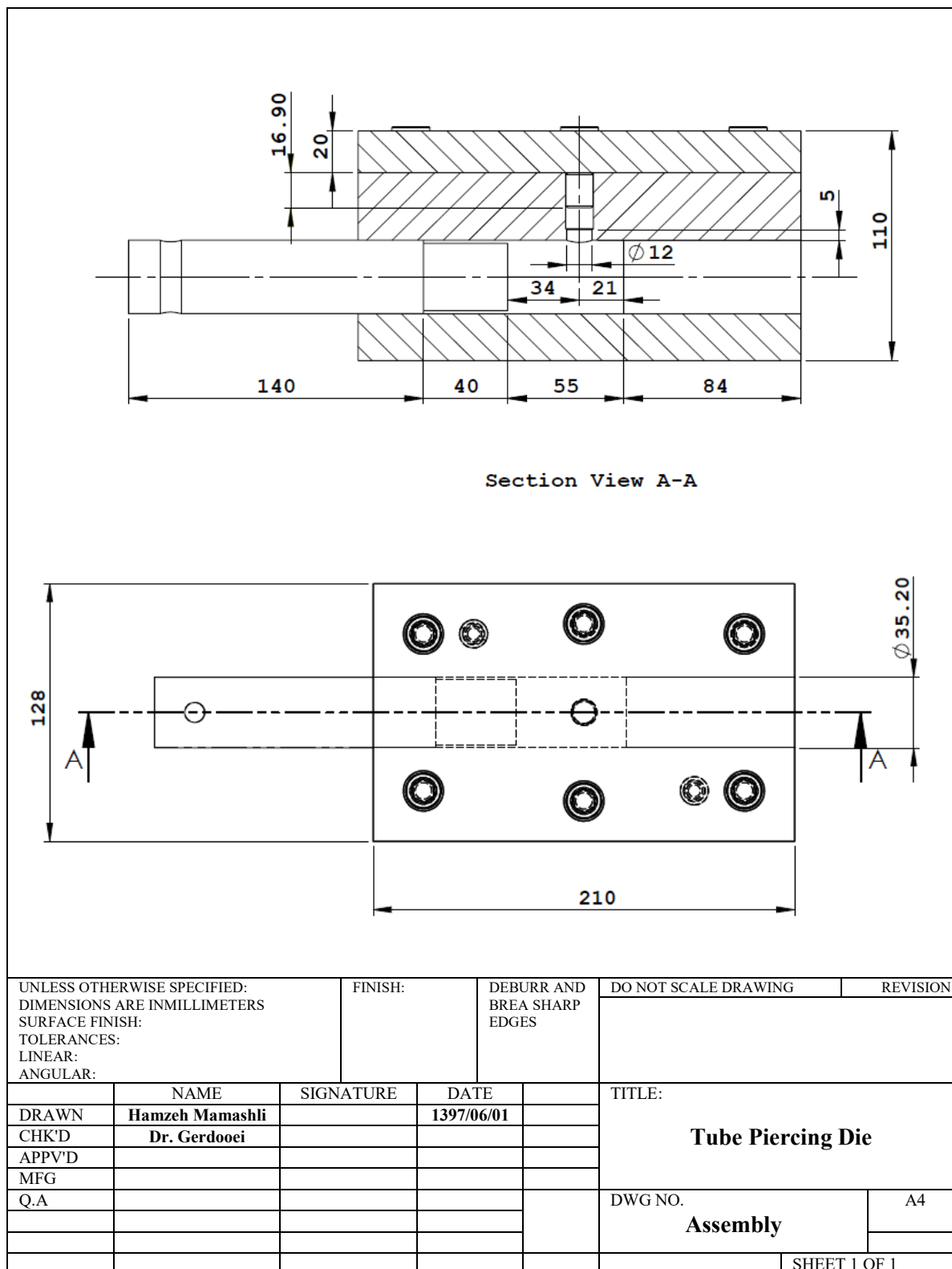
NOTE 6-Specimens with sides parallel throughout their length are permitted, except for referee testing, provided: (a) the above tolerances are used; (b) an adequate number of marks are provided for determination of elongation; and (c) when yield strength is determined, a suitable extensometer is used.

If the fracture occurs at a distance of less than $2A$ from the edge of the gripping device, the tensile properties determined may not be representative of the material. If the properties meet the minimum requirements specified, no further testing is required, but if they are less than the minimum requirements, discard the test and retest.

NOTE 7—Specimen 5 is intended for testing specimens removed from an in-service product. Specimen 5 shall not be used for conformance testing of new product. Acceptance criteria for elongation values obtained from 1 in. gauge length specimens shall be determined by agreement between the responsible parties.

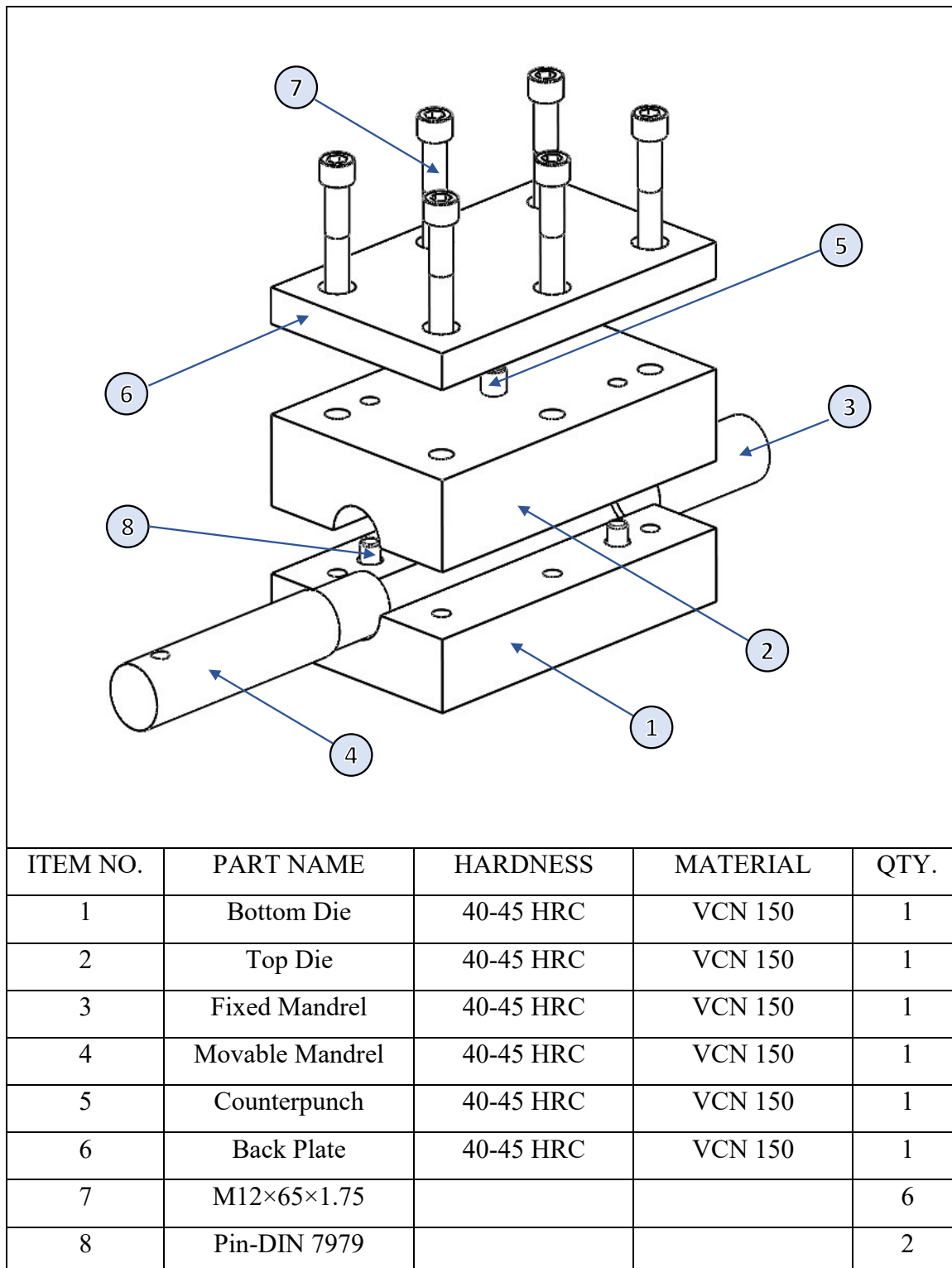
پیوست دو

(۲) نقشه مونتاژی قالب



پیوست سه

۳) نمای انفجاری قالب سوراخ‌کاری با ابزار الاستومری و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن



Abstract

Piercing of metal tubes is a process to create a hole in the tube to produce multi-way industrial joints. Using traditional methods of this process doesn't result in optimal cutting edges quality. Traditional methods of piercing such as using drills have disadvantages such as pre-drilling, impossibility of clamping at the inner surface of the tube, circular shape restriction and cutting edge protrusion. This process has recently been performed using fluid as a piercing tool. Using of fluid has also problems such as sealing and expensive tools and equipments. In order to overcome the above mentioned problems; in this study, the piercing of aluminum tube was investigated experimentally and numerically using elastomeric tooling in a new method. The elastomeric tooling is widely used in the aerospace and automotive industries due to its high flexibility, creation optimum surface quality and reduced manufacturing cost. Numerical analysis of the process was carried out in ABAQUS software assuming that the elastomeric tool is a non-compressible hyperelastic material with the Mooney-Rivlin behavioral model. To predict the ductile fracture of tube, the Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) damage model was used as a micromechanical model in ductile fracture of porous metals. In order to determine the parameters describing the GTN fracture model, firstly, the experimental tensile test of the standard specimens and the finite element simulation were performed by applying the GTN failure criterion and comparing the force-displacement diagram of the experimental tensile test. The parameters of this damage model were determined by the inverse calibration method. Finally, the obtained parameters were used to simulate the piercing process in piercing die. In the tube piercing tests, the maximum force of the process, tube geometry especially thickness, and also effect of hardness of the used elastomers were investigated. The material used was 6061 aluminum alloy tube with three types of thickness 1 mm, 1.4 mm and 1.8 mm. The hole diameter was assumed to be 12 mm in the piercing process. The results showed that if the process parameters such as material, geometry and thickness of the tube and suitable hardness of elastomeric tool are selected correctly, the use of elastomeric tools for metal tube piercing is possible and results in a good quality cutting surface. Also, the amount of piercing force in the experimental tests for different tube thicknesses and different hardnesses of the elastomeric tools is in good agreement with the results of numerical simulation.

Keywords: Metal tube piercing, Elastomeric tool, Finite element simulation, GTN damage model, Aluminum tube.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

MSc Thesis in Manufacturing and production Engineering

**Feasibility study on piercing of metallic tubes by using elastomeric tools
pressure**

By: Hamzeh Mamashli

**Supervisor:
Dr. Mahdi Gerdooei**

September 2019