

سلام الغزالي



دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی مکانیک

رشته‌ی مهندسی مکانیک
گرایش ساخت و تولید

عنوان

مطالعه توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو

نگارش

حسین باقی‌زاده

استاد راهنما

دکتر سید هادی قادری

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی مکانیک

گروه: طراحی جامدات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین باقی‌زاده

تحت عنوان:

مطالعه توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو
در تاریخ ۱۳۹۳/۶/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با
درجه عالی و با نمره ۱۹/۳۰ مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : سید هادی قادری
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : مجتبی قطعی		نام و نام خانوادگی : مهدی گردویی
			نام و نام خانوادگی : سید وحید حسینی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به

روح پاک پدرم

و

قلب مهربان مادرم

سپاس‌گزاری

اینجانب بر خود واجب می‌دانم که از زحمات فراوان و راهنمایی‌های ارزنده‌ی استاد عزیز و بزرگوارم، جناب آقای دکتر سید هادی قادری صمیمانه تشکر و قدردانی کنم. ایشان در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه و همچنین در طول دوران تحصیل اینجانب در مقطع کارشناسی ارشد، دلسوزانه یاری‌رسان من بودند. بی‌تردید به سرانجام رساندن این پژوهش، بدون حمایت علمی و معنوی ایشان ممکن نبود. امیدوارم که در آینده نیز افتخار شاگردی، همکاری و دوستی با این استاد گرانقدر را داشته باشم.

از همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس جواد علی‌نژاد، مدیر محترم واحد تحقیق و توسعه شرکت فنر لول ایران، تشکر و قدردانی می‌کنم.

از استاد ارزشمندم، جناب آقای دکتر مهدی گردویی، که در طول مدت تحصیل در این مقطع، از حضورشان بهره علمی و معنوی بردم، تشکر و قدردانی می‌نمایم و شاگردی ایشان را افتخاری برای خود می‌دانم.

از اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک، جناب آقای دکتر مجتبی قطعی، دکتر حمید رضا ایپک‌چی، دکتر مهدی بامداد، دکتر محسن نظری و دکتر مهدی قناد، که در آموزش دروس به بنده متحمل زحمت شدند، تشکر و سپاس‌گذاری می‌کنم.

و همچنین از خانواده عزیزم که در تمامی مراحل زندگی، دلسوزانه و عاشقانه، حامی و پشتیبان من بودند بینهایت سپاس‌گذارم.

تعهد نامه

اینجانب حسین باقی‌زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه توزیع تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

فنرها یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین قطعات هر ماشین هستند که با توجه به نوع کاربریشان، ممکن است تحت شرایط بارگذاری شدید استاتیکی یا دینامیکی قرار گیرند. بنابراین توجه و دقت در طراحی و بهبود فرایند ساخت آن‌ها از اهمیت شایانی برخوردار است. تنش پسماند ایجاد شده در فرایند تولید فنر، نقش مهمی در عملکرد آن ایفا می‌کند. آگاهی از این تنش پسماند و چگونگی اثر مراحل فرایند تولید روی آن، یک گام ضروری به سوی رسیدن به یک بهینه‌سازی مناسب در طراحی و فرایند تولید می‌باشد. سه مرحله‌ی اصلی فرایند تولید فنر عبارتند از شکل‌دهی (فرنریجی)، ساچمه‌زنی و پیش‌تنظیم. ابتدا مفتول مستقیم به شکل فنر درآمد؛ سپس طی عملیات ساچمه‌زنی، فنر تولید شده تحت برخورد ساچمه‌های فولادی با سرعت بالا قرار می‌گیرد و پس از آن، فنر یک بار تا ارتفاع صلب فشرده و سپس رها می‌شود. در این پژوهش، شبیه‌سازی سه مرحله‌ی فرایند تولید فنر ماریپیچ فشاری، به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس، به صورت سه‌بعدی و با هدف به دست آوردن و مطالعه‌ی تنش پسماند ایجاد شده، صورت گرفت. فنر مورد مطالعه، فنر ماریپیچ سیستم تعلیق عقب خودروی پراید است که در کارخانه‌ی فنرلول ایران تولید می‌شود. این فنر به صورت سرد شکل‌دهی می‌شود. شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی و ساچمه‌زنی در حل‌گر صریح و فرایند پیش‌تنظیم با حل‌گر استاندارد آباکوس انجام شد. در شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، برای نزدیک بودن به واقعیت، یک برنامه متلب برای ایجاد توزیع ساچمه‌ها به صورت تصادفی نوشته شد. ساچمه‌ها در دو نوع صلب و الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شد. برای ساچمه‌های الاستیک-پلاستیک، برخورد زاویه‌دار و برخورد عمودی با در نظر گرفتن تماس بین خود ساچمه‌ها نیز مطالعه شد. در شبیه‌سازی پیش‌تنظیم، ابتدا تنش پسماند ایجاد شده بر اثر ساچمه‌زنی، به یک حلقه‌ی فنر انتقال داده شد و سپس شبیه‌سازی صورت گرفت. ابعاد فنر به دست آمده از شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نمونه‌ی واقعی دارد. توزیع کرنش، تنش در حین شکل‌دهی و تنش پسماند پس از آن مورد مطالعه قرار گرفت. در لحظه‌ی شکل‌دهی، بیشترین تنش در قطر داخلی و خارجی مشاهده شد. اما تنش پسماند پس از فرایند، در مرکز مقطع به بیشترین مقدار خود می‌رسید. نیروی لازم برای شکل‌دهی فنر، اثر ضریب اصطکاک و سرعت تغذیه‌ی مفتول به دست آمد. با افزایش ضریب اصطکاک، بیشینه‌ی کرنش پلاستیک و تنش معادل نیز افزایش یافت؛ اما به طور کلی تاثیر این پارامتر چندان قابل توجه نبود. در شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، با افزایش تعداد برخوردها تا حد مشخصی، تنش پسماند افزایش یافته و سپس تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین در سرعت‌های برخورد بالاتر، مقدار بیشینه‌ی تنش و نیز

پهنای پروفیل تنش افزایش یافت. مقایسه‌ای با نتایج تجربی موجود صورت گرفت که بیشترین تطابق مربوط به ساچمه‌های پلاستیک و حالتی که برخورد بین ساچمه‌ها در نظر گرفته شده بود مشاهده شد. کاهش طول به دست آمده از شبیه‌سازی پیش‌تنظیم، با مقدار واقعی اختلاف ناچیزی داشت. توزیع تنش در لحظه‌ی فشرده شدن فنر تا ارتفاع صلب و تنش پسماند پس از فرایند مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در هر مرحله برای صحه‌گذاری بر مطالعه‌ی عددی انجام شده، مقایسه‌ای با نتایج موجود از سایر پژوهشگران صورت گرفت.

واژگان کلیدی: تنش پسماند، فنر مارپیچ، فنرپیچی، ساچمه‌زنی، پیش‌تنظیم، روش المان محدود.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. باقی زاده، حسین؛ قادری، سید هادی؛ علی نژاد، جواد؛ ۱۳۹۳. مطالعه عددی توزیع تنش پسماند ایجاد شده در شکل دهی سرد فنر مارپیچ سیستم تعلیق خودرو، بیست و دومین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، اهواز.
۲. باقی زاده، حسین؛ قادری، سید هادی؛ علی نژاد، جواد؛ ۱۳۹۳. مطالعه تنش پسماند ایجاد شده در فنر مارپیچ سیستم تعلیق خودرو بر اثر فرایند ساچمه زنی، سومین کنفرانس بین المللی مواد مهندسی و متالورژی، تهران.
۳. قادری، سید هادی؛ باقی زاده، حسین؛ ۱۳۹۲. تحلیل عددی شکل دهی سرد فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو، همایش ملی مهندسی مکانیک، ملایر.

فهرست عنوان‌ها

ب.....	تقدیم به.....
ه.....	سپاس‌گزاری.....
و.....	چکیده.....
ی.....	فهرست عنوان‌ها.....
ل.....	فهرست شکل‌ها.....
س.....	فهرست جدول‌ها.....
ع.....	فهرست نشانه‌ها.....
۱.....	فصل ۱ مقدمه.....
۲.....	۱-۱ مقدمه.....
۲.....	۲-۱ تنش پسماند.....
۴.....	۳-۱ فنر لول.....
۵.....	۱-۳-۱ ماده فنر.....
۵.....	۲-۳-۱ عوامل موثر در انتخاب ماده فنر.....
۵.....	۳-۳-۱ خواص قابل انتظار از مواد مخصوص فنر [۸].....
۶.....	۴-۳-۱ مواد مرسوم قابل استفاده در فنرها [۸].....
۷.....	۵-۳-۱ عناصر شیمیایی موجود در فولادها و تاثیر آنها بر روی خواص فنر [۸].....
۹.....	۴-۱ روشهای فنر پیچی.....
۹.....	۱-۴-۱ توسط دریل دستی و میله‌های مخصوص.....
۱۰.....	۲-۴-۱ به کمک ماشین‌تراش معمولی.....
۱۱.....	۳-۴-۱ به کمک قرقره‌های مخصوص.....
۱۱.....	۴-۴-۱ به کمک ماشین‌های مخصوص (CNC و NC).....
۱۳.....	۵-۱ فرایند تولید فنر در شرکت فنر لول ایران.....
۱۳.....	۱-۵-۱ فنر پیچی.....
۱۳.....	۲-۵-۱ عملیات حرارتی.....
۱۴.....	۳-۵-۱ ساچمه‌زنی.....
۲۰.....	۴-۵-۱ پیش‌تنظیم (اصلاح طول).....

۶-۱	مروری بر پژوهش‌های پیشین	۲۱
۷-۱	اهداف پایان‌نامه	۲۳
۸-۱	ساختار این پایان‌نامه	۲۴

فصل ۲ تحلیل عددی..... ۲۵

۱-۲	مقدمه	۲۶
۲-۲	معرفی نرم‌افزار آباکوس	۲۶
۳-۲	معرفی نمونه‌ی صنعتی	۲۸
۴-۲	شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی فنی	۳۰
۵-۲	شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی	۳۴
۶-۲	شبیه‌سازی فرایند پیش‌تنظیم (اصلاح طول)	۴۰

فصل ۳ نتایج و بحث..... ۴۵

۱-۳	مقدمه	۴۶
۲-۳	شبیه‌سازی شکل‌دهی فنی	۴۶
۱-۲-۳	توزیع تنش و کرنش	۴۶
۲-۲-۳	نیروی شکل‌دهی	۵۳
۳-۲-۳	اثر ضریب اصطکاک	۵۳
۴-۲-۳	اثر سرعت تغذیه مفتول	۵۵
۵-۲-۳	اثر جابه‌جایی راهنمای متحرک	۵۵
۳-۳	شبیه‌سازی ساچمه‌زنی	۵۶
۱-۳-۳	ساچمه صلب	۵۶
۲-۳-۳	ساچمه تغییر شکل پذیر	۶۳
۳-۳-۳	مقایسه با نتایج تجربی	۶۸
۴-۳	شبیه‌سازی پیش‌تنظیم	۷۰

فصل ۴ جمع‌بندی و پیشنهادها..... ۷۴

۱-۴	نتیجه‌گیری	۷۵
۲-۴	پیشنهادها	۷۶

منبع‌ها..... ۷۸

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) انواع فنرهای مکانیکی [۷]..... ۴
- شکل (۲-۱) تولید فنر به کمک ماشین تراش [۹]..... ۱۱
- شکل (۳-۱) دستگاه فنر پیچی CNC [۱۱، ۱۲]..... ۱۲
- شکل (۴-۱) فرایند ساچمه‌زنی روی الف) فنر در دو حالت مختلف [۱۶، ۱۷]، ب) چرخ‌دنده و پره [۱۸، ۱۹]..... ۱۵
- شکل (۵-۱) ایجاد تنش پسماند فشاری در اثر ساچمه‌زنی [۲۰]..... ۱۶
- شکل (۶-۱) مراحل تست آلمن [۲۴]..... ۱۷
- شکل (۷-۱) منحنی اشباع آلمن [۲۵]..... ۱۸
- شکل (۸-۱) انواع ساچمه از نظر هندسی [۲۷]..... ۱۹
- شکل (۹-۱) نمایی از دستگاه پیش‌تنظیم..... ۲۰
- شکل (۱-۲) فنر مورد مطالعه..... ۲۸
- شکل (۲-۲) نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده فنر [۳۵]..... ۲۹
- شکل (۳-۲) دستگاه شکل‌دهی فنر..... ۳۰
- شکل (۴-۲) مدل المان محدود شکل‌دهی فنر..... ۳۱
- شکل (۵-۲) تعداد المانهای مفتول فنر در ۶ اندازه مش متفاوت، (۱) ۹۳۴۰، (۲) ۱۵۰۴۰، (۳) ۴۴۸۶۰، (۴) ۱۰۱۵۰۰، (۵) ۲۳۶۵۲۰، (۶) ۷۱۵۲۰۰..... ۳۲
- شکل (۶-۲) آنالیز مش، نیروی تغذیه مفتول بر حسب تعداد المان..... ۳۲
- شکل (۷-۲) مقایسه انرژی داخلی و جنبشی..... ۳۴
- شکل (۸-۲) قطاع در نظر گرفته شده از فنر برای شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، الف) هندسه و ابعاد، ب) ناحیه برخورد..... ۳۵
- شکل (۹-۲) مدل مش‌بندی شده‌ی قطاع فنر برای ساچمه‌زنی..... ۳۷
- شکل (۱۰-۲) موقعیت تصادفی ساچمه‌ها (یک‌دهم اندازه واقعی) در صفحه x-y..... ۳۸

- شکل (۲-۱۱) مدل المان محدود فرایند ساچمه‌زنی ۳۹
- شکل (۲-۱۲) جهت‌گیری ماده در شبیه‌سازی پیش‌تنظیم ۴۱
- شکل (۲-۱۳) نحوه مش‌بندی مقطع فنر برای پیش‌تنظیم ۴۳
- شکل (۲-۱۴) مدل المان محدود پیش‌تنظیم ۴۴
- شکل (۳-۱) فنر به‌دست آمده از شبیه‌سازی ۴۷
- شکل (۳-۲) توزیع تنش ون میزز ۴۸
- شکل (۳-۳) توزیع کرنش پلاستیک معادل ۴۸
- شکل (۳-۴) کرنش پلاستیک معادل در مقطع فنر ۴۹
- شکل (۳-۵) تنش در مقطع (A در شکل (۳-۲)) فنر در حین شکل‌دهی الف) تنش معادل ون میزز، ب) تنش محوری عمودی ۵۰
- شکل (۳-۶) تنش در طول مقطع در لحظه‌ی شکل‌دهی ۵۰
- شکل (۳-۷) تنش در مقطع (B در شکل (۳-۲)) فنر پس از شکل‌دهی الف) تنش معادل ون میزز، ب) تنش محوری عمودی ۵۱
- شکل (۳-۸) تنش پسماند در طول مقطع پس از شکل‌دهی ۵۲
- شکل (۳-۹) توزیع تنش حین خمش و پس از باربرداری الف) ماده بدون کرنش‌سختی [۴۳]، ب) ماده دارای کرنش‌سختی [۴۴] ۵۲
- شکل (۳-۱۰) نیروی شکل‌دهی در طول فرایند ۵۳
- شکل (۳-۱۱) اثر ضریب اصطکاک بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) تنش معادل ۵۴
- شکل (۳-۱۲) اثر ضریب اصطکاک بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) تنش معادل [۳۵] ۵۴
- شکل (۳-۱۳) اثر سرعت تغذیه مفتول بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) نرخ کرنش ۵۵
- شکل (۳-۱۴) اثر جابه‌جایی راهنمای متحرک روی گام فنر ۵۶
- شکل (۳-۱۵) تغییر شکل سطح پس از تعداد برخوردهای مختلف ۵۷
- شکل (۳-۱۶) توزیع تنش پسماند پس از برخورد تصادفی ۱۵۰ ساچمه با سرعت اولیه $V = 75 \text{ m/s}$ ۵۸

- شکل (۳-۱۷) مولفه‌های تنش پسماند ایجاد شده ۵۸
- شکل (۳-۱۸) تغییرات تنش پسماند با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های صلب ۵۹
- شکل (۳-۱۹) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های صلب ۶۰
- شکل (۳-۲۰) تغییرات تنش پسماند با افزایش سرعت برخورد ساچمه‌های صلب ۶۱
- شکل (۳-۲۱) اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند الف) مگوید و همکاران [۳۰]، ب) هنگ و همکاران [۳۳] ۶۲
- شکل (۳-۲۲) اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند در آلیاژ آلومینیوم [۴۲] ۶۲
- شکل (۳-۲۳) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش سرعت برخورد ساچمه‌های صلب ۶۳
- شکل (۳-۲۴) تغییرات تنش پسماند با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های تغییر شکل پذیر ۶۴
- شکل (۳-۲۵) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های تغییر شکل پذیر ۶۵
- شکل (۳-۲۶) مقایسه تنش پسماند در سه حالت تحلیل با ساچمه تغییر شکل پذیر ۶۶
- شکل (۳-۲۷) تغییر شکل سطح پس از برخورد ۷۵ ساچمه در حالتی که تماس بین ساچمه‌ها وجود دارد. ۶۷
- شکل (۳-۲۸) مقایسه کرنش پلاستیک معادل در سه حالت تحلیل با ساچمه تغییر شکل پذیر ۶۸
- شکل (۳-۲۹) مقایسه تنش پسماند به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی ۶۹
- شکل (۳-۳۰) کاهش طول پس از پیش‌تنظیم ۷۰
- شکل (۳-۳۱) تنش محوری در پیش‌تنظیم ۷۱
- شکل (۳-۳۲) تنش پسماند محوری در مقطع فتر پس از پیش‌تنظیم ۷۲
- شکل (۳-۳۳) تنش در پیش‌تنظیم (بدون پیش‌تنش) ۷۳

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۲) خواص ماده‌ی استفاده شده برای ساچمه (AISI4340) [۳۸] ۴۰

فهرست نشانه‌ها

d	قطر مفتول فنر	ω_0	اولین فرکانس طبیعی سیستم
OD_C	قطر خارجی فنر پس از شکل‌دهی	n	تعداد ساچمه
OD_P	قطر خارجی فنر پس از پیش‌تنظیم	τ	تنش برشی میانگین
OD_{SC}	قطر خارجی فنر حاصل از شبیه‌سازی	S_L	تنش طولی
d_S	قطر ساچمه	S_T	تنش مماسی
P_C	گام فنر پس از شکل‌دهی	m	جرم فنر
P_P	گام فنر پس از پیش‌تنظیم	ρ	چگالی
P_{SC}	گام فنر حاصل از شبیه‌سازی	t	زمان شکل‌دهی فنر
P_{SP}	گام فنر حاصل از شبیه‌سازی پیش‌تنظیم	V_f	سرعت تغذیه مفتول
E	مدول یانگ	V	سرعت ساچمه
G	مدول برشی	C_d	سرعت موج طولی
S_{13}, S_{23}	مولفه‌های تنش برشی	r	شعاع مفتول فنر
C	ماتریس میرایی	h	ضخامت قطاع فنر در ساچمه‌زنی
M	ماتریس جرم	μ_S	ضریب اصطکاک در ساچمه‌زنی
ζ	نسبت میرایی	μ_C	ضریب اصطکاک در شکل‌دهی فنر
Δt	نمو زمانی پایدار	L_e	طول المان
		L	طول مفتول فنر
		a	طول قطاع فنر در ساچمه‌زنی
		b	طول ناحیه برخورد در ساچمه‌زنی
		α	فاکتور میرایی متناسب با جرم

فصل ۱ مقدمه

۱-۱ مقدمه

فنرها یکی از مهم‌ترین، پرکاربردترین و حساس‌ترین قطعات هر ماشین هستند. در بین اجزای سیستم تعلیق خودرو، می‌توان مهم‌ترین جزء را فنر آن دانست [۱]. فنرها با توجه به نوع کاربریشان، ممکن است تحت شرایط بارگذاری شدید استاتیکی یا دینامیکی قرار گیرند. به همین دلیل توجه و دقت در طراحی و بهبود فرایند ساخت آن‌ها از اهمیت شایانی برخوردار است. تنش پسماند^۱ ایجاد شده در فرایند تولید فنر نقش مهمی در عملکرد آن ایفا می‌کند. آگاهی از چگونگی اثر مراحل فرایند تولید روی تنش پسماند، یک گام ضروری به سوی رسیدن به یک بهینه‌سازی مناسب در طراحی و فرایند تولید می‌باشد.

۱-۲ تنش پسماند

تنش‌های پسماند تنش‌هایی هستند که بر اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌مانند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست نیز وجود دارند. چون تنش‌های پسماند توسط تغییر شکل پلاستیک غیریکنواخت تولید می‌شوند، بررسی تنش‌های پسماندی که در هر فرایند فلزکاری ایجاد می‌شود، اهمیت دارد. تنش پسماند عموماً نماینده میدان‌های تنشی تک‌محوری یا چندمحوری در یک سیستم بسته، بدون وجود هیچ‌گونه نیرو یا گشتاور خارجی است. طبیعت تنش پسماند به گونه‌ای است که در مقابل هر تنش کششی، تنش فشاری نیز باید وجود داشته باشد، به گونه‌ای که جسم در حالت تعادل باقی بماند.

علت اینکه شناسایی چنین تنش‌هایی برای ما مهم است این است که وقتی جسم تحت بار خارجی قرار می‌گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. پس اگر در منطقه‌ای تنش پسماند کششی داشته باشیم و بارگذاری نیز تنش کششی باشد سطح تنش در آن منطقه بالاتر از آنچه که تنها با لحاظ کردن تنش کششی خارجی به دست می‌آید خواهد بود. لذا در صورتی که تنش کششی پسماند

^۱ Residual stress

داخلی را در نظر نگیریم و قطعه را تنها بر اساس تنش اعمالی خارجی طراحی کنیم ممکن است در اثر تنش‌های خارجی تنش در قطعه از حد تسلیم آن بالاتر رفته و باعث شکست آن گردد. همچنین، در مواردی که قطعه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، همانند یک فنر مارپیچ، توزیع تنش‌های پسماند می‌تواند بر عمر قطعه موثر باشد [۲].

تنش‌های پسماند به وسیله‌ی چهار عامل مکانیکی، گرمایی، پوشش‌دهی و ماشین‌کاری به وجود می‌آیند [۳، ۴]. تنش‌های پسماند، تنش‌های الاستیک هستند. حداکثر مقداری که یک تنش پسماند می‌تواند به آن برسد تنش تسلیم (فعلی) ماده است. فلزات شامل تنش‌های پسماند با گرم کردن تا دمایی که در آن دما استحکام تسلیم ماده برابر یا کمتر از مقدار تنش پسماند است، تنش‌زدایی می‌شوند. بنابراین ماده می‌تواند تغییر شکل دهد و تنش را رها کند [۲].

محاسبه دقیق تنش‌های پسماند در فرایندهای پیچیده، توسط روش‌های تحلیلی مشکل است و بنابراین معمولاً این تنش‌ها توسط انواع روش‌های تجربی تعیین می‌شوند. روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به صورت مخرب، نیمه مخرب و یا غیر مخرب هستند. روش اصلی غیرمخرب برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند پرتونگاری با اشعه X^1 است. در این روش، از اشعه X برای تعیین فاصله بین اتمی دسته‌ای مشخص از صفحه‌های شبکه، در ماده‌ی کرنش کرده، استفاده می‌شود. تنش‌های پسماند می‌توانند از مقایسه فاصله اندازه‌گیری شده در ماده دارای تنش پسماند، با فاصله موجود در نمونه فاقد تنش محاسبه شوند [۲]. سایر روش‌های غیر مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند عبارتند از: روش آلتراسونیک^۲، پراش

^۱ X-ray diffraction^۲ Ultrasonic

نوترونی^۱ و روش سیگنال بارک هاوزن^۲. همچنین روش‌های سوراخ‌کاری^۳، روش حلقه-هسته^۴ و سوراخ‌کاری عمیق^۵ نیمه مخرب و روش کانتور^۶ و برش‌زنی^۷ مخرب می‌باشند [۵، ۶].

۳-۱ فنر لول

فنر یک عضو مکانیکی است که انرژی حاصل از اعمال بار خارجی را در خود جذب کرده و سپس رها می‌سازد. این عضو مکانیکی در صنعت کاربردهای بسیار متنوع و مهمی داشته و مهمترین انواع فنرها عبارتند از فشاری، کششی، خمشی و پیچشی (شکل (۱-۱)).



شکل (۱-۱) انواع فنرهای مکانیکی [۷]

^۱ Neutron diffraction

^۲ Barkhausen noise method

^۳ Hole drilling technique

^۴ Ring-core method

^۵ Deep hole drilling method

^۶ Contour method

^۷ Sectioning technique

۱-۳-۱ ماده فئر

ماده فئر باید قابلیت ذخیره انرژی به وسیله تغییر شکل الاستیک را در خودش داشته باشد. یعنی انرژی حاصل از نیروهای خارجی را جذب کرده و در زمان دلخواه به طور کامل آن را برگرداند.

۱-۳-۲ عوامل موثر در انتخاب ماده فئر

هر ماده فئر باید با توجه به شرایط عملکردی و باری که به آن اعمال می‌شود، انتخاب گردد. مهمترین عوامل موثر در انتخاب یک ماده فئر عبارتند از [۸]:

۱- تنش کاری

◀ تنش‌های استاتیکی

◀ تنش‌های دینامیکی

○ تنش‌های خمشی

○ تنش‌های محوری (فشاری و کششی)

○ تنش‌های برشی

○ تنش‌های پیچشی

۲- محیط کاری

◀ درجه حرارت (از دماهای زیر صفر تا دماهای بالا)

◀ خوردگی (خوردگی حاصل از انواع اسیدها، قلیاها، رطوبت و غیره)

۱-۳-۳ خواص قابل انتظار از مواد مخصوص فئر [۸]

خواص یک ماده فئر ممکن است قبل و بعد از تولید، کمی با یکدیگر تفاوت داشته باشند. در عین حال،

چهار خصوصیت لازم برای ساختن فئر عبارت است از:

◀ شکل‌پذیری خوب به همراه خواص الاستیک کم

◀ عاری بودن از نقایص و عیوب

◀ هزینه پایین

◀ قابل دسترس بودن

ولی بعد از ساخت فنر، خواص مورد انتظار عبارتند از:

◀ استحکام مکانیکی بالا، به ویژه حد الاستیک بالا

◀ مقاومت بالا در مقابل خستگی

◀ مدول الاستیک (E) و برشی (G) مناسب

◀ مقاومت بالا در مقابل خوردگی

◀ مقاومت بالا در مقابل خزش

◀ تاثیرپذیری کم از درجه حرارت

◀ خواص الکتریکی خوب (در صورت نیاز)

◀ خواص مغناطیسی خوب (در صورت نیاز)

البته به ندرت اتفاق می افتد که لازم باشد همه خواص فوق در یک فنر وجود داشته باشد.

۱-۳-۴ مواد مرسوم قابل استفاده در فنرها [۸]

مواد مرسوم قابل استفاده در فنرها را می توان به هفت گروه اصلی تقسیم بندی کرد:

۱- فولادهای کربنی

فولادهای کربنی به آن دسته از فولادها اطلاق می گردد که کربن، اصلی ترین عنصر آلیاژی آن باشد و عناصری نظیر منگنز، سیلیسیوم و آلومینیوم به میزان کم در آن حضور داشته باشند.

۲- فولادهای آلیاژی

به فولادهایی گفته می شود که درصد عناصر آلیاژی در ترکیب آنها قابل توجه بوده و نقش اصلی در تعیین خواص مکانیکی را همین عناصر آلیاژی ایفا می کنند.

۳- فولادهای زنگ نزن

فولادهایی هستند که در مقابل خوردگی و زنگ زدگی مقاوم هستند.

۴- آلیاژهای پایه مس

آلیاژهایی هستند که درصد عناصری مثل مس، روی و قلع در آنها بسیار زیاد بوده و در مقابل خوردگی مقاوم هستند.

۵- آلیاژهای پایه نیکل

پایه اصلی این آلیاژها را نیکل تشکیل داده و دارای انعطاف پذیری خوب، چقرمگی شکست بالا و مقاوم در مقابل تغییر دما می باشند.

۶- آلیاژهای مدول ثابت

آلیاژهایی هستند که مدول الاستیسیته آنها در درجه حرارت های مختلف ثابت بوده و اغلب در ابزار دقیق به کار برده می شوند.

۷- مواد متفرقه

موادی مثل چوب، شیشه، پلاستیک، تیتانیوم و غیره.

۳-۱-۵ عناصر شیمیایی موجود در فولادها و تاثیر آنها بر روی خواص فنر [۸]

عمده ترین عناصر شیمیایی که در فولادهای فنر وجود دارند، عبارتند از: آهن، کربن، منگنز، سیلیکون، فسفر، گوگرد، کروم، کبالت، نیکل، تنگستن و وانادیوم. در ادامه تاثیر هر کدام بر روی خواص مکانیکی آورده شده است.

آهن

آهن عنصر غالب در شیمی فولاد است، اما در آنالیز ذکر نمی گردد. در واقع بعد از مقدار درصد همه عناصر آلیاژی، مقدار درصد باقیمانده تا ۱۰۰ درصد، مربوط به آهن است.

کربن

استحکام کششی، حد الاستیک و سختی را افزایش می‌دهد. نرمی (چکش‌خواری)، چقرمگی و مقاومت در مقابل شوک و ضربه را کاهش می‌دهد. عملیات حرارتی مقادیر کربن کمتر از ۰/۲ درصد، هیچگونه تاثیری بر روی خواص مکانیکی ندارد. فولادهای فنر به ندرت حاوی بیشتر از ۱/۰۵ درصد کربن هستند، زیرا مقادیر بالاتر باعث شکست ناشی از تردی زیاد می‌شود.

منگنز

وجود آن برای فولاد به اندازه کربن ضروری است، زیرا باعث می‌شود که فولاد سریع و عمیق سخت شود. بدون آن یا با کم بودن میزان آن، فقط سطح فولاد سخت می‌شود. اغلب فولادهای فنر حاوی حدود ۰/۶ تا ۱/۲ درصد منگنز هستند.

سیلیکون

انجام کار گرم را بر روی فولاد آسان می‌کند. اغلب فولادهای فنر حاوی حدود ۰/۱ تا ۰/۳ درصد سیلیکون می‌باشند. ولی افزودن ۱/۸ تا ۲/۲ درصد سیلیکون به فولادهای پرکربن، استحکام کششی را افزایش می‌دهد، بدون آنکه نرمی یا چقرمگی از دست برود.

فسفر و گوگرد

فسفر و گوگرد ناخالصی بوده و هر دو از نامناسب‌ترین عناصر موجود در فولادهای فنر می‌باشند. آنها استحکام کششی، نرمی و مقاومت در مقابل شوک و ضربه را کاهش داده و تردی را افزایش می‌دهند. حداکثر مقدار مجاز هر کدام در فولادهای فنر برابر ۰/۰۵۵ درصد می‌باشند و مقادیر کمتر ترجیح داده می‌شود.

کروم

اضافه کردن مقدار کمی (حدود ۰/۸ تا ۱/۱ درصد) کروم به فولاد، استحکام کششی، سختی و چقرمگی را افزایش می‌دهد. مقاومت فولاد در مقابل حملات اسیدی و قلیایی را افزایش داده و فولاد را قادر می‌سازد تا در دماهای بالا مقاومت داشته باشد. عمق سختی را نیز در فولاد افزایش می‌دهد.

کبالت

یکی از عناصر آلیاژی است که در اکثر فولادهای مخصوص، تندبر، مته‌ها و ابزار برش یافت می‌شود. تاثیر اصلی آن سختی قرمز (سختی در دمای بالا) است که به ویژه ابزارهای برشی در سرعت‌های عملکردی بالا به آن نیاز دارند.

نیکل

سرعت و دمای لازم برای سخت کردن را کاهش می‌دهد. تاثیر کمی بر روی سختی دارد ولی چقرمگی و مقاومت به سایش فولاد را افزایش می‌دهد.

تنگستن

اگر ۴ درصد به فولادهای کربنی افزوده شود، فولادهای بسیار سختی را بوجود می‌آورد. اگر ۱۲ تا ۲۰ درصد تنگستن به همراه کروم به فولاد افزوده شود، فولادهای ابزار با سختی قرمز حاصل می‌گردد. فولادهای ابزار ۱-۴-۱۸ که حاوی ۱۸ درصد تنگستن، ۴ درصد کروم و ۱ درصد وانادیوم هستند را می‌توان برای فنرهایی که در درجه حرارت‌های بالا کاربرد دارند، به کار گرفت.

وانادیوم

افزودن مقدار کمی وانادیوم در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ درصد، استحکام کششی، حد الاستیک، چقرمگی و همچنین مقاومت به شوک و ضربه را افزایش می‌دهد. اگر با کروم به کار گرفته شود، عمر خستگی و حد تحمل فولاد را نیز بالا می‌برد.

۴-۱ روش‌های فنر پیچی^۱

۱-۴-۱ توسط دریل دستی و میله‌های مخصوص

این روش با استفاده از یک دریل دستی و یک میل گرد روتراش شده که برجستگی‌هایی در نقاطی از آن با شکل، اندازه و موقعیت تعریف شده صورت گرفته، استفاده می‌شود. در ابتدا قسمتی از مفتول به اندازه مناسب جدا شده و سپس یک سر مفتول در شیار میله قرار می‌گیرد سپس با یک

^۱ Coiling

دست اهرم دریل دستی به گردش در آمده تا میله حول محور (همراه با سه‌نظام) دوران نموده تا مفتول به تعداد دورهای مورد نظر پیچانده شود. همزمان با دست دیگر ادامه مفتول کنترل و هدایت می‌شود. در صورت لزوم با توجه به فرم‌های مشخص شده در طراحی فنر توسط نیروی دست و یا به کمک اهرم‌هایی مفتول به دور برجستگی‌ها پیچیده شده و یا خم می‌گردد تا حالت مورد نظر ایجاد شود.

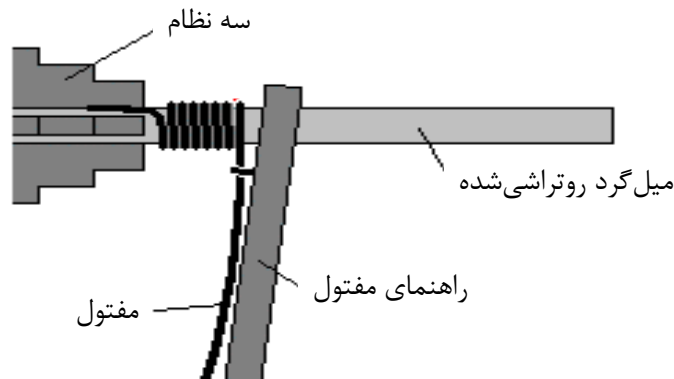
در این روش ساخت فنر، فنرهای تولید شده دارای دقت و حساسیت کمی بوده و چون از نیروی دست کمک گرفته می‌شود لذا این روش برای ساخت برای فنرهایی با قطر کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ضمن این فنرهای تولید شده در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرند که انعطاف‌پذیری و حالت فنری مهم می‌باشد و نیرویی که تحمل می‌کنند مدنظر نمی‌باشد، مانند فنرهای اشیپیل [۹، ۱۰].

۱-۴-۲ به کمک ماشین تراش معمولی

در این روش میل‌گردی روتراشی شده با قطر مشخص و طولی متناسب با طول فنر به سه نظام دستگاه تراش بسته شده و سر دیگر آن توسط مرغک مهار می‌شود. به جای ابزارگیر دستگاه از یک فیکسچر با دو فک که روی هریک از آنها شیار با شعاع نزدیک به قطر مفتول تعبیه شده استفاده می‌شود. این امر به گونه‌ای انجام می‌شود که مفتول با نیرویی که از سوی حرکت چرخشی میل‌گرد ایجاد شده از بین این دو فک عبور کرده و به دور میل‌گرد پیچیده می‌شود و فنر مورد نظر تولید می‌شود. گام فنر با توجه به دور دستگاه و حرکت افقی ساپورت تنظیم می‌شود (شکل (۱-۲)).

در این روش فنر تولید شده از دقت و حساسیت چندانی برخوردار نمی‌باشد ولی دقت آن نسبت به روش قبل بهبود یافته است. از مزایای این روش سادگی و عدم نیاز به تجهیزات خاص و پیچیده را می‌توان عنوان کرد. تقریباً با این روش تولید فنر با قطر و اندازه‌های متنوعی امکان‌پذیر می‌باشد. اما در هر صورت دقت کافی برای کارهای دقیق را ندارد و معمولاً در مواردی مورد استفاده قرار می‌گیرد

که صرفاً ایجاد یک نیرو (کشش یا فشار و...) بدون دقت کافی و با تolerانس‌های بالا مورد نیاز است [۹، ۱۰].



شکل (۲-۱) تولید فنر به کمک ماشین تراش [۹]

۳-۴-۱ به کمک قرقره‌های مخصوص

در این روش از چندین قرقره که روی یک مکانیزم (تشکیل شده از یک صفحه با چندین شیار به صورت منحنی یا خطی که با توجه به نوع و مدل فنر مورد نیاز است) مونتاژ شده‌اند، استفاده می‌شود. این قرقره‌ها توسط چرخ‌دنده‌هایی با یکدیگر درگیر شده و به کمک الکتروموتور به حرکت در می‌آید. قرقره‌ها توسط اهرم دستی، جک‌های بادی و برای مفتول با قطر بالا توسط جک‌های هیدرولیکی راه‌اندازی می‌شوند

و در زمان‌های لازم اعمال نیرو برای ایجاد فرم‌دهی مفتول صورت می‌گیرد و در نهایت فنر مورد نظر تولید می‌گردد. کاربرد این روش اغلب برای فنرهای با قطر بالا (فنرهای سنگین‌کار) می‌باشد که معمولاً به دو روش گرم و سرد انجام می‌شود [۹، ۱۰].

۴-۴-۱ به کمک ماشین‌های مخصوص (CNC و NC)

در این روش که امروزه در کارخانه‌های سازنده فنر مورد استفاده قرار می‌گیرد، مفتول فنر در پشت دستگاه روی قرقره‌ای پیچیده شده و از کانال تغذیه توسط تعدادی غلتک به سمت جلو رانده

می‌شود. برای جلوگیری از خم شدن و انحراف فنر از مسیر تعیین شده ابزارهایی در نظر گرفته شده است. در انتهای این مسیر، غلتک‌هایی برای فرم دهی مفتول تعبیه شده است که فرایند پیچش فنر و فرم‌دهی را انجام می‌دهند (شکل (۳-۱)). این روش برای ساخت تمامی فنرها با قطرهای مختلف و شکل‌های گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۳-۱) دستگاه فنر پیچی CNC [۱۲، ۱۱]

فنرهای مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو هم در دمای محیط و هم در دمای بالا شکل‌دهی می‌شوند. در شکل‌دهی داغ، مفتول فولادی تا بالای دمای آستنیتی گرم شده و به درون ماندل^۱ تغذیه می‌شود که فنر به سرعت شکل داده می‌شود. سپس فنر کوئنچ^۲ و سپس زیر دمای آستنیتی تمپر^۳ می‌شود. اولین عیب شکل‌دهی داغ فنر خطر دکرپوره شدن و اکسید شدن سطح مفتول می‌باشد. اکسید شدن، به دلیل اینکه مکان ایجاد ترک روی سطح می‌شود برای عملکرد خستگی فنر زیان‌بار است. در شکل‌دهی سرد فنر، مفتول در دمای محیط از یک قرقره به درون ماندل تغذیه می‌شود. فنرهای شکل داده شده بریده می‌شوند و در کوره تنش‌زدایی می‌شوند. در فنرهای پیچیده شده‌ی سرد، اکسید شدن سطح وجود ندارد، بنابراین کیفیت سطح بهتری نسبت به حالت داغ دارند [۱۳، ۱۴]. به طور معمول فنر با قطر مفتول کمتر از ۱۰ mm را با روش سرد و با قطر بالاتر از ۱۶ mm را به روش گرم می‌پیچند، برای قطر

^۱ Mandrel

^۲ Quench

^۳ Temper

مفتول بین ۱۰ mm تا ۱۶ بستگی به شرایط و امکانات سازنده دارد [۱۵]. اندیس فنر^۱ (نسبت قطر متوسط فنر به قطر مفتول) نیز در تعیین سرد یا گرم بودن شکل دهی فنر موثر است.

۱-۵ فرایند تولید فنر در شرکت فنر لول ایران

مراحل تولید فنرها به طور کلی می‌تواند به ترتیب، شامل مراحل زیر باشد [۱۰]:

بررسی با نرم افزار IST- فنرپیچی - عملیات حرارتی - ساچمه‌زنی^۲ - سنگ‌زنی - پلیسه‌گیری - پخ‌زنی - اصلاح طول یا پیش‌تنظیم^۳ - سورت نیرو - عملیات سخت‌کاری و برگشت - عملیات حرارتی مجدد - پوشش - بسته‌بندی. که بسته به نوع فنر تولیدی ممکن است یک یا چند مرحله از مراحل بالا را در پروسه تولید نداشته باشد. در ادامه مراحل مهم تولید فنر بررسی می‌شود.

۱-۵-۱ فنر پیچی

اولین و مهم‌ترین مرحله تولید فنر می‌باشد. در این مرحله مفتول وارد ماشین CNC فنرپیچی شده و با توجه به تنظیمات دستگاه، انواع فنرهای لول با ویژگی‌های مختلف مثل گام ثابت، گام متغیر، مخروطی و... می‌تواند تولید شود.

۱-۵-۲ عملیات حرارتی

عملیات حرارتی با هدف آزادسازی تنش‌هایی که حین پیچیدن فنر در آن ایجاد می‌گردد، انجام می‌شود. بعد از پیچیدن فنرها، اولین عملیات تکمیلی پروسه‌ی تولید فنر، تنش‌زدایی^۴ می‌باشد که باعث آزادسازی تنش‌های آن می‌گردد.

^۱ Spring index

^۲ Shot peening

^۳ Preset (Scragging)

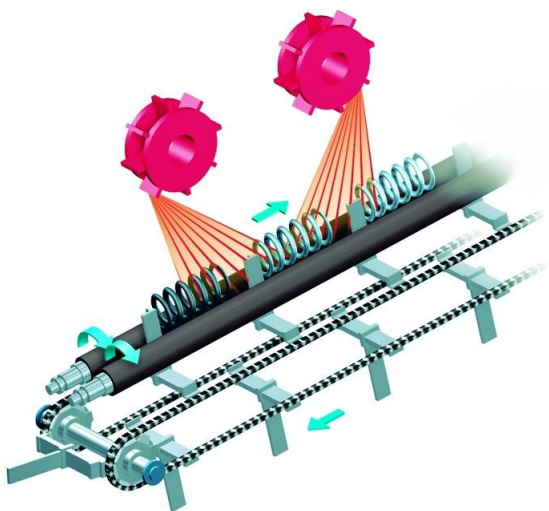
^۴ Stress relieving

از آنجا که در مراحل فرایند فنرپیچی روی فنر کار سرد انجام می‌شود، فنر کارسخت می‌شود. با ایجاد کار سختی، استحکام و سختی قطعه بیش از حد بالا می‌رود، انجام فرایندهای بعدی بر روی قطعه بسیار مشکل می‌شود و نیز تنش قابل تحمل در شرایط کاری قطعه کاهش می‌یابد. لذا جهت کاهش تنش پسماند در فنر، ناشی از عملیات فنرپیچی، پس از اتمام فرایند فنرپیچی، فنر تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرد که این عملیات اغلب نوعی عملیات حرارتی دما پایین محسوب می‌شود. دمای عملیات تنش‌زدایی برای فنرهای فولاد کربنی حدود 260°C و برای فنرهای از جنس فولاد ضد زنگ حدود 380°C می‌باشد. زمان عملیات تنش‌زدایی بسته به اندازه قطر مفتول از حدود ۱۵ دقیقه تا حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد. با انجام عملیات حرارتی تنش‌زدایی، تنش قابل تحمل در شرایط کاری فنر افزایش می‌یابد.

البته بسته به نوع فنر و نیاز مشتری ممکن است یک یا چند عملیات حرارتی دیگر نیز بر روی فنرها انجام پذیرد که در جای خود قابل بررسی است.

۱-۵-۳ ساچمه‌زنی

ساچمه‌زنی یک فرایند کار سرد است که در آن سطح قطعه توسط گلوله‌های ریز (معمولاً کرومی شکل) تحت ضربات شدید قرار می‌گیرد (شکل (۱-۴)). هر گلوله مانند یک چکش ضربه‌زنی کوچک عمل کرده و در سطح قطعه فرو رفتگی و برجستگی ایجاد می‌کند. برای تشکیل این گودی باید لایه سطحی فلز به نقطه تسلیم خود برسد تا تغییر فرم پلاستیک ایجاد شود. در لایه زیرین سطح، ذرات فشرده‌شده سعی می‌کنند تا سطح را به حالت اولیه خود برگردانند که در نتیجه یک ناحیه نیم‌کروی از فلز کارسرد شده که تحت تنش فشاری شدیدی قرار دارد، ایجاد می‌گردد (شکل (۱-۵)). با ادامه ساچمه‌زنی و هم‌پوشانی فرو رفتگی‌های ناشی از برخورد ساچمه‌ها به سطح، یک لایه یکنواخت سطحی با تنش پسماند فشاری تشکیل می‌شود.

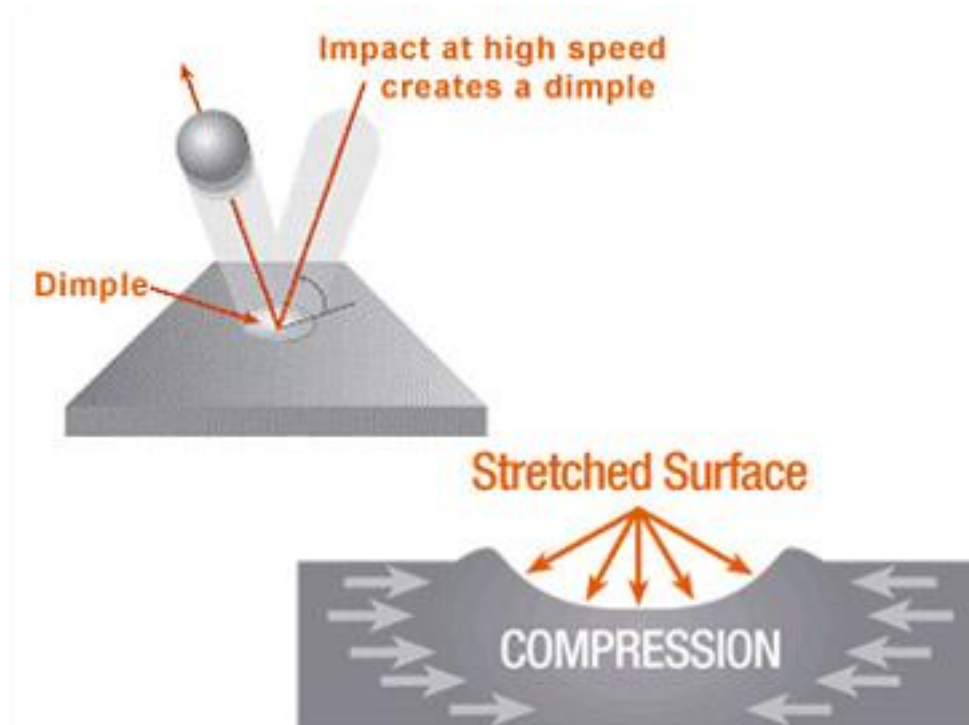


(الف)



(ب)

شکل (۴-۱) فرایند ساچمه‌زنی روی الف) فنر در دو حالت مختلف [۱۶، ۱۷]، ب) چرخ‌دنده و پره [۱۸، ۱۹]



شکل (۵-۱) ایجاد تنش پسماند فشاری در اثر ساچمه‌زنی [۲۰]

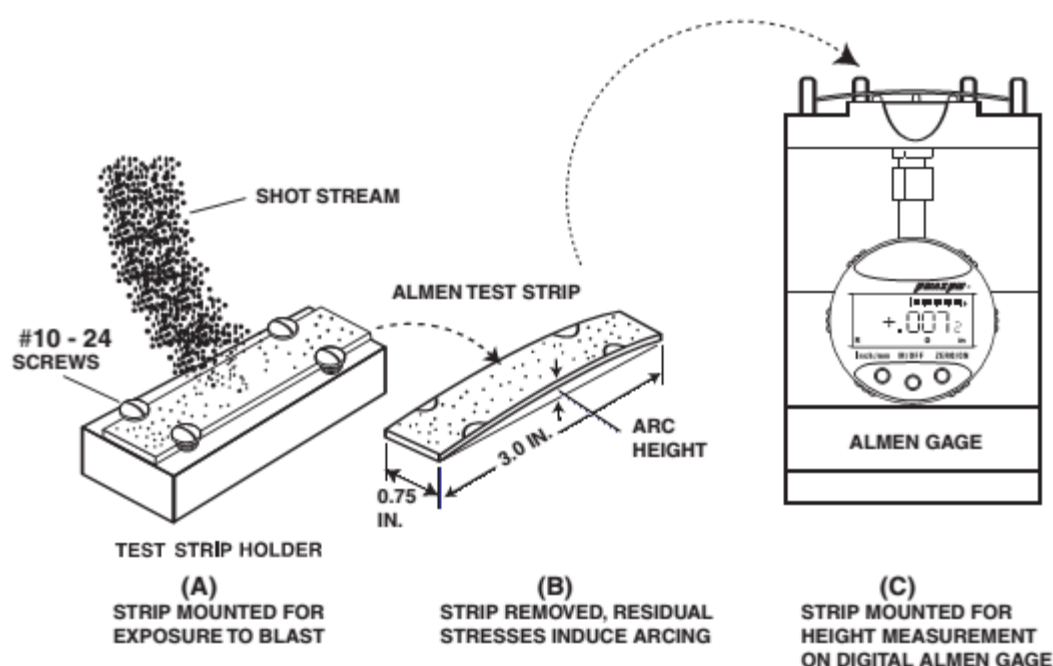
پوشش برخورد^۱ به صورت نسبت مساحت سطحی که تحت برخورد قرار گرفته است به مساحت کل سطح هدف ساچمه‌زنی تعریف می‌شود [۲۱]. پوشش 100% به این معنی است که در تمام سطح حداقل یک فرورفتگی ناشی از برخورد ایجاد شده باشد. در عمل، بیشینه‌ی پوشش قابل تشخیص، حدود 98% است. از آنجایی که تمایز پوشش 98% با پوشش 100% دشوار است، بنابراین پوشش 98% به عنوان پوشش کامل در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، پوشش 200% به صورت برخورد با دو برابر زمان لازم برای رسیدن به پوشش کامل (98%)، طبق SAE J443 تعریف می‌شود [۲۲]. شدت ساچمه‌زنی^۲، میزان انرژی است که در قطعه‌ی تحت برخورد (به صورت تنش پسماند فشاری) باقی می‌ماند. برای اندازه‌گیری شدت ساچمه‌زنی از آزمایش آلمن^۳ که توسط آلمن و بلک [۲۳] معرفی شده است، استفاده می‌شود. در

^۱ Coverage

^۲ Shot peening intensity

^۳ Almen test

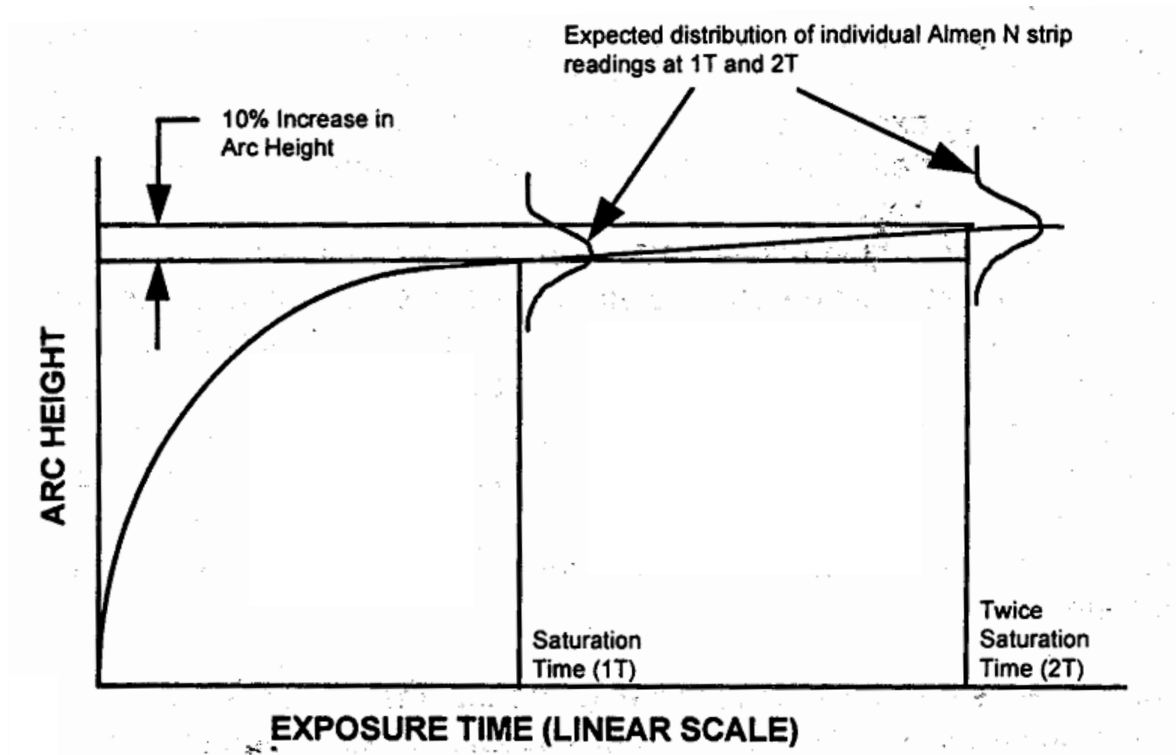
این آزمایش، حداقل چهار نوار استاندارد آلمن^۱ که در یک قید نگهدارنده قرار گرفته، تحت عملیات ساچمه‌زنی قرار می‌گیرد. بعد از جدا کردن نمونه از قید، به دلیل ایجاد تنش فشاری، نمونه که در ابتدا تخت بوده، دارای انحنا شده و به صورت یک کمان می‌شود. سپس ارتفاع کمان توسط سنجهی آلمن^۲ اندازه‌گیری می‌شود (شکل (۶-۱)) و ارتفاع کمان به عنوان معیاری برای شدت ساچمه‌زنی گزارش می‌شود. نمودار ارتفاع کمان بر حسب زمان ساچمه‌زنی که به آن منحنی اشباع آلمن نیز می‌گویند در شکل (۷-۱) آمده است. همانطور که از شکل مشخص است، با گذشت زمان، ارتفاع کمان به مقدار ثابتی میل می‌کند و پس از آن، ادامه‌ی فرایند تغییری در تنش پسماند ایجاد شده روی نمونه (و تغییر شکل آن) نخواهد داشت و به اشباع می‌رسد. در صورتی که تغییر اختلاف ارتفاع کمان، بین زمان T و $2T$ ، کمتر از ۱۰٪ باشد؛ زمان T ، زمان اشباع و معادل با پوشش کامل در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۶-۱) مراحل تست آلمن [۲۴]

^۱ Almen strip

^۲ Almen gauge



شکل (۷-۱) منحنی اشباع آلمن [۲۵]

ساقچه‌ها به طور معمول بایکی از دو روش ریخته‌گری یا برش مفتول^۱ ساخته می‌شوند. در مورد جنس استفاده شده برای تولید ساقچه‌ها می‌توان به فولاد کربنی، فولاد ضد زنگ و برخی فولادهای پر استحکام و همچنین در برخی کاربردها به شیشه و سرامیک اشاره کرد [۲۶]. شکل هندسی ساقچه‌های تولید شده، معمولاً استوانه‌ای، نیمه کره‌ای و کره‌ای هستند (شکل (۸-۱)).

ساقچه‌زنی سبب بهبود عمر خستگی قطعات از جمله فنرها می‌شود و این امر به دو دلیل اتفاق می‌افتد. ابتدا ایجاد تنش فشاری در سطح می‌باشد. خستگی در اثر تنش کششی اتفاق می‌افتد و در صورتی که از قبل تنش فشاری در سطح وجود داشته باشد پس از اعمال بار، تنش کششی ایجاد شده کمتر از مقدار واقعی خواهد بود. دلیل دوم نیز انجام کارسرد و افزایش استحکام لایه‌های سطحی قطعه می‌باشد که منجر به بالارفتن خواص مکانیکی در محلی که بیشترین تنش را تحمل می‌کند می‌شود. تاثیر عامل

^۱ Cut wire

اول بیشتر از مورد دوم می‌باشد. این فرایند برای فنرهایی با قطر مفتول بزرگ‌تر از ۰/۷۵ mm مناسب می‌باشد [۱۵].

بعد از ساچمه‌زنی، فنرهای فشاری تحت عملیات حرارتی دمای پایین بین $200-300^{\circ}\text{C}$ به مدت ۳۰ دقیقه قرار می‌گیرند تا رفتار خستگی را بهبود بخشیده و مقدار نشست پایداری که در حین عملیات پیش‌تنیدگی اتفاق می‌افتد را کاهش دهد. از آنجایی که این فرایندها هر نوع پوشش‌دهی سطحی مفتول را از بین می‌برد، فنرها خیلی سریع در اتمسفرهای با رطوبت کم دچار خوردگی می‌شوند. بنابراین لازم است که پس از ساچمه‌زنی، سطح فنرها بلافاصله پوشش محافظ داده شود.



Cylindrical



G1 (rounded edges)



G2 (almost spherical grain)



G3 (spherical grain)

شکل (۸-۱) انواع ساچمه از نظر هندسی [۲۷]

۴-۵-۱ پیش تنظیم (اصلاح طول)

فرایند پیش تنظیم شامل فشردن فنر تا رسیدن ماده فنر به تسلیم می باشد. این فشردن باید تا زیر کمترین ارتفاع کاری باشد و معمولاً تا رسیدن به ارتفاع صلب^۱ یا نزدیک آن می باشد [۱۵, ۲۸]. پیش تنظیم به صورت سرد^۲ یا گرم^۳ انجام می شود. پس از انجام پیش تنظیم مقداری از تغییر شکل ماندگار خواهد بود و طول فنر کمتر از مقدار اولیه خواهد بود، بنابراین از قبل، فنرها را با طولی بیشتر از طول طراحی شده می پیچند [۱۵]. این فرایند باعث ایجاد توزیع تنش پسماند مفیدی در فنر شده و حد الاستیک را افزایش می دهد و شرایط فنر را تحت بار کاری بهتر می کند. دستگاه انجام این فرایند در شکل (۹-۱) مشاهده می شود.



شکل (۹-۱) نمایی از دستگاه پیش تنظیم

^۱ Solid height

^۲ Cold setting

^۳ Hot setting

۱-۶ مروری بر پژوهش‌های پیشین

آرتاراز و سانچز [۲۹] در سال ۱۹۹۱ وضعیت تنش پسماند ایجاد شده توسط ساچمه‌زنی را در فنر مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت تجربی و با استفاده از اشعه X انجام گرفت. بررسی آنها نشان داد که تنش پسماند فشاری در قسمت داخلی فنر کمتر از بخش‌های دیگر می‌باشد.

مگوید و همکارانش [۳۰] در سال ۱۹۹۹ تحلیل المان محدود سه‌بعدی را برای مطالعه تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی انجام دادند. آنها فرایند را در دو حالت برخورد یگانه و دوگانه مدل کردند و اثر سرعت برخورد، اندازه و شکل ساچمه‌ها و همچنین اثر فاصله‌ی جدایش بین دو ساچمه را در برخورد همزمان، روی تنش پسماند بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که شکل و سرعت ساچمه، میزان پوشش برخورد و فاصله‌ی جدایش بین ساچمه‌ها در برخورد همزمان، تاثیر زیادی روی تنش پسماند و عمق لایه‌ی فشرده شده دارد و به میزان کمتری متاثر از نرخ کرنش سختی قطعه است.

تودینف [۳۱] در سال ۲۰۰۰ تنش پسماند را در سطح فنر سیستم تعلیق در مراحل مختلف تولید فنر مانند کوئنج، تمپر و ساچمه‌زنی مورد مطالعه قرار دادند. او تنش پسماند را توسط اشعه X اندازه‌گیری کرد. هدف از این تحقیق بررسی عوامل ایجاد تنش پسماند غیر مفید در هر یک از فرایندهای مذکور بوده است.

ماتجیسک و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۴ تنش پسماند در فنر مارپیچ فشاری سیستم تعلیق خودرو را که به صورت سرد شکل‌دهی شده است با روش پراش نوترونی اندازه‌گیری کردند. آنها به این نتیجه رسیدند سهم اصلی تنش پسماند در راستای مماسی می‌باشد. آنها همچنین تغییرات تنش پسماند پس از انجام پیش‌تنظیم و عملیات حرارتی را اندازه‌گیری کردند.

آگاروال و همکاران [۳۲] در سال ۲۰۰۶ بر روی تنش فشاری پسماند ایجاد شده در فولاد فنر بر اثر فرایند ساچمه‌زنی مطالعه و اثر آن را بر عمر خستگی بررسی کردند و نیز شرایط بهینه‌ی ساچمه‌زنی را بر اساس عمر خستگی به دست آوردند. همچنین از پژوهش آنها، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عمر خستگی حاصل شد.

هنگ و همکارانش [۳۳] در سال ۲۰۰۸ الگوی تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی در حالت برخورد منفرد را به روش عددی به دست آوردند. آنها اثر پارامترهایی مانند قطر ساچمه، سرعت و زاویه برخورد، تنش تسلیم اولیه و سخت‌شوندگی قطعه تحت برخورد را بر روی مقدار و نحوه‌ی توزیع تنش پسماند بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اثر قطر ساچمه، روی بزرگی تنش پسماند کم است؛ اما عمق ناحیه‌ی تنش پسماند، با افزایش قطر ساچمه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت برخورد، تنش پسماند برای ماده‌ی کاملاً پلاستیک بدون تغییر باقی می‌ماند؛ اما برای ماده‌ی دارای کرنش‌سختی، به‌صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

زیمرن و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۰، با هدف بررسی پوشش سطح، برخورد تصادفی و منظم را مقایسه کرده و توزیع تنش پسماند ایجادشده را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که پروفیل تنش پسماند متوسط محاسبه شده، به ترتیب برخورد حساس بوده و مدل تصادفی در مقایسه با مدل منظم، نیازمند تعداد بیشتری برخورد برای رسیدن به پوشاندگی معین است. همچنین درحالی‌که هر دو برخورد منظم و تصادفی منجر به پیش‌بینی‌های خوبی راجع به تنش‌های پسماند می‌شوند، مدل تصادفی، توپوگرافی سطحی واقعی تری حاصل می‌کند.

کوبلف [۱۳] در سال ۲۰۱۰ به معرفی تئوری ریاضی تنش پسماند در فنر مارپیچ پرداخته است. با استفاده از این تئوری می‌توان تنش در هر مرحله از فرایند تولید فنر را به دست آورد که او این بررسی را برای دو مرحله اساسی تولید فنر یعنی فنرپیچی و پیش‌تنظیم انجام داده است. کوبلف با استفاده از تئوری خمش و پیچش ترکیبی، دو فرایند مذکور را به صورت تحلیلی بررسی کرد و تنش محوری، برشی و معادل را در حین و بعد از فرایندهای فنرپیچی و پیش‌تنظیم سرد در مقطع فنر محاسبه کرد. برتی و مونت [۳۵] در سال ۲۰۱۰ فرایند فنرپیچی سرد را به صورت عددی و به روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار Simufact.Forming شبیه‌سازی کردند. هدف از این مطالعه بررسی اثر ضریب اصطکاک و برخی تنظیمات دستگاه فنرپیچی بر روی تنش، کرنش، خرابی و شکست فنر بوده است. آنها همچنین در پژوهشی دیگر [۳۶] در سال ۲۰۱۱ فرایند فنرپیچی را به صورت تجربی و عددی برای فنر

مارپیچ ساده و همچنین فنر با قطر و گام متغیر بررسی کردند. آنها در این مطالعه علاوه بر بررسی پارامترهای ذکر شده در پژوهش قبلی خود به تحقیق در مورد اثر لایه اکسیدی بر شرایط روانکاری پرداختند.

کیم و همکاران [۳۷] در سال ۲۰۱۱ مدل المان محدود دوبعدی را برای محاسبه‌ی تنش پسماند ساچمه‌زنی با برخورد یگانه ارائه کردند. آنها عوامل فیزیکی فرایند از قبیل میرایی، اصطکاک و نرخ کرنش و نیز عوامل هندسی شامل قطر ساچمه و سرعت برخورد را بررسی کردند. سپس بر اساس مطابقت با منحنی اشباع آلمن، سرعت برخورد مورد نیاز را برای شبیه‌سازی به دست آوردند. در نهایت مدل خود را با نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی و نتایج تجربی به دست آمده از پرتونگاری اشعه X مقایسه کردند. ماده‌ی مورد استفاده‌ی آنها AISI4340 بود.

کیم و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۱۳ مدل المان محدود سه‌بعدی برای ساچمه‌زنی با برخورد زاویه‌دار را پیشنهاد کردند. آنها رابطه‌ی بین تنش پسماند ایجاد شده در اثر ساچمه‌زنی و عواملی مانند میرایی، اصطکاک و وابستگی ماده به سرعت را بررسی کردند. ساچمه‌ها در سه حالت صلب، الاستیک و پلاستیک در نظر گرفته شد. تغییر شکل پلاستیک ساچمه‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت. برای صحت‌گذاری بر شبیه‌سازی، نتایج خود را با نتایج به دست آمده از پرتونگاری اشعه X مقایسه کردند. بیشترین تطابق با نتایج تجربی، مربوط به ساچمه‌های پلاستیک و زاویه برخورد 60° بود.

۷-۱ اهداف پایان‌نامه

با توجه به پیچیدگی محاسبه تحلیلی تنش پسماند در فنر مارپیچ و همچنین مشکلات و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری تجربی آن، در این پایان‌نامه سه مرحله‌ی اصلی فرایند تولید فنر مارپیچ سیستم تعلیق خودرو، یعنی شکل‌دهی سرد، ساچمه‌زنی و پیش‌تنظیم، به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس و به صورت سه‌بعدی با هدف به دست آوردن توزیع تنش پسماند صورت گرفت.

۸-۱ ساختار این پایان نامه

در نخستین فصل، ابتدا پیرامون تنش پسماند و روش‌های اندازه‌گیری آن و سپس در مورد فنرها و روش‌های تولید آن و همچنین مراحل تولید فنر در کارخانه فنرلول صحبت شد و در انتها مروری بر پژوهش‌های پیشین صورت گرفت. در فصل دوم پس از معرفی نمونه‌ی صنعتی، که فنر عقب سیستم تعلیق پراید است، روند تحلیل عددی و مراحل و جزییات شبیه‌سازی ارائه شد. فصل سوم به بحث در مورد نتایج به دست آمده و مقایسه‌ی آن با اطلاعات تجربی موجود پرداخته شد و در فصل آخر نتیجه‌گیری و جمع‌بندی بیان شد و چند پیشنهاد به منظور بررسی کامل‌تر این تحقیق ارائه شد.

فصل ۲ تحلیل عددی

۲-۱ مقدمه

افزایش روز افزون نیازهای بشر و تلاش و برای برآورده ساختن آنها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه‌ی زمینه‌های علمی و فنی شده که حوزه مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده است. در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده، تحت بارگذاری‌های نامنظم است که بکارگیری روش‌های کلاسیک موجود (به عنوان مثال تئوری الاستیسیته در مورد توزیع تنش) منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده با شرایط مرزی و اولیه متنوع است که در عمل حل این معادلات از روش تحلیلی را غیر ممکن می‌سازد. از این روست که روش‌های عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم به سیستم‌ها ایجاد و امروزه به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روشی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می‌گیرد روش اجزای محدود است که در قالب نرم‌افزارهایی چون ANSYS، ABAQUS، NASTRAN، LS-DYNA و ... قابل استفاده است [۳۹]. در این پایان‌نامه از دو حل گر صریح و استاندارد آباکوس استفاده شده است.

۲-۲ معرفی نرم‌افزار آباکوس

آباکوس نرم‌افزاری برای تحلیل‌های المان محدود می‌باشد. آباکوس قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیر خطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های رفتاری بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح، فوم‌های فنی و نیز شکننده و همچنین مصالح ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد. این نرم‌افزار به طور گسترده‌ای در صنعت اتومبیل‌سازی، هوافضا و صنایع ساخت کالاهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین این بسته

نرم‌افزاری به خاطر قابلیت گسترده در مدل‌سازی مواد مختلف و نیز توانایی سفارشی کردن^۱ آن بوسیله برنامه‌نویسی، در محیط‌های تحقیقاتی آکادمیک بسیار محبوبیت دارد. یک بسته نرم‌افزاری آباکوس دارای چهار محصول اصلی است که در ادامه به توضیح هر یک از این محصولات پرداخته می‌شود.

۱- ABAQUS/Standard: محصول اصلی شرکت SIMULIA است که با استفاده از آن می‌توان گستره وسیعی از مسائل خطی و غیر خطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کرد. این محصول، در مسائل غیر خطی دستگاه معادلات حاکم را در هر نمو به صورت ضمنی^۲ تحلیل می‌کند. در این روش، کاربر می‌تواند میزان نمو در هر مرحله را تعیین کند یا از روش نیوتن - رافسون اصلاح شده^۳ برای این منظور استفاده نماید.

۲- ABAQUS/Explicit: محصولی با اهداف ویژه است که برای مدل‌سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد و ضربه انفجار، آزمایش ضربه، مچالگی، همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسایل غیر خطی که در آن‌ها شرایط تماس تغییر می‌کند (مانند شکل‌دهی) مناسب است. این محصول، دستگاه معادلات حاکم را بر پایه قانون انتگرال‌گیری صریح به همراه استفاده از ماتریس جرم قطری المان تحلیل می‌کند. در این روش تعیین اندازه نمو، در مسائل غیر خطی توسط کاربر ممکن نبوده و نرم‌افزار براساس شرایط پایداری میزان نمو در هر مرحله را به صورت اتوماتیک محاسبه می‌کند.

۳- ABAQUS/CFD: محصولی با اهداف کلی برای دینامیک سیالات است که با کوپل شدن با دو محصول قبلی، برای تحلیل برهم کنش بین سازه و سیال به همراه انتقال حرارت و تلاطم، بصورت پایا و گذرا بکار می‌رود. این محصول از نسخه ۶ به بعد اضافه شده است.

۴- ABAQUS/CAE: به عنوان یک رابط گرافیکی کاربر در بسته نرم‌افزاری آباکوس گنجانده شده است. این محصول به کاربر کمک می‌کند که یک مدل هندسی را با سرعت بالا و به سادگی بسازد یا از یک نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر وارد کند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مدل هندسی قطعه را

^۱ Customize

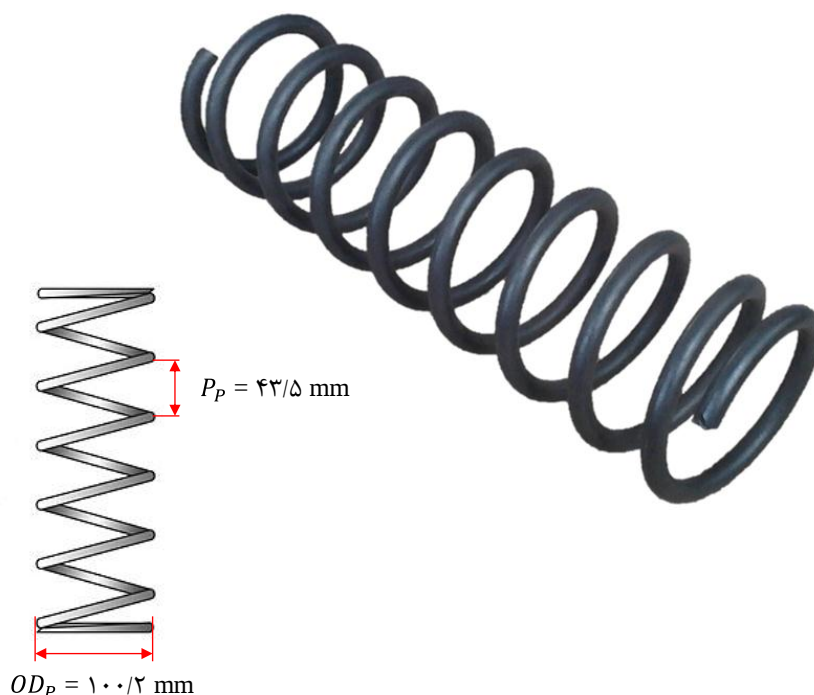
^۲ Implicit

^۳ Modified Newton-Raphson method

گسسته‌سازی کرد و خواص مواد آن را تعیین و شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص کرد. تمام عملیات در آباکوس با استفاده از منوها، جعبه ابزارها و پنجره‌های گرافیکی انجام شده و همه مراحل مدل‌سازی به صورت گرافیکی نمایش پیدا می‌کنند [۴۰، ۴۱].

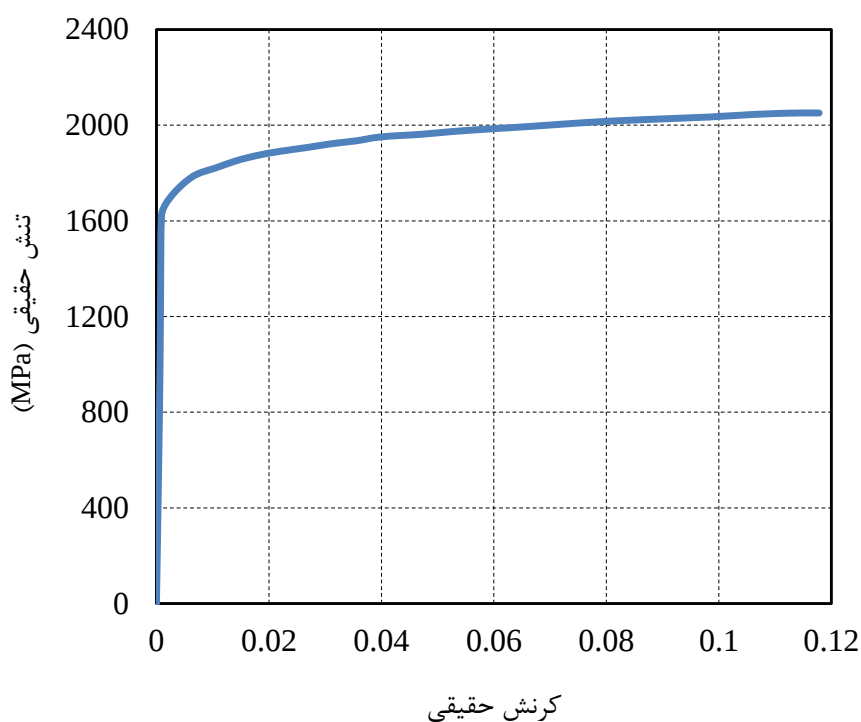
۲-۳ معرفی نمونه‌ی صنعتی

فنر مورد مطالعه در این مقاله (شکل (۱-۲))، فنر مارپیچ سیستم تعلیق عقب خودرو پراید می‌باشد که در کارخانه فنر لول ایران تولید می‌شود. قطر مفتول فنر مذکور $d = 10/4 \text{ mm}$ می‌باشد. گام فنر پس از شکل‌دهی $P_C = 44/5 \text{ mm}$ (به جز حلقه‌های اول و آخر) و قطر خارجی آن $OD_C = 99 \text{ mm}$ می‌باشد. محصول نهایی دارای گام $P_P = 43/5 \text{ mm}$ و قطر خارجی $OD_P = 100/2 \text{ mm}$ می‌باشد که این تغییر ابعادی مربوط به فرایند پیش‌تنظیم است. جنس فنر از فولاد پراستحکام مارتنزیتی، 54SiCr6 می‌باشد که نمودار تنش-کرنش حقیقی آن در شکل (۲-۲) آمده است. فنر مورد نظر به صورت سرد شکل‌دهی می‌شود. وزن این فنر $m = 1/7 \text{ kg}$ می‌باشد.

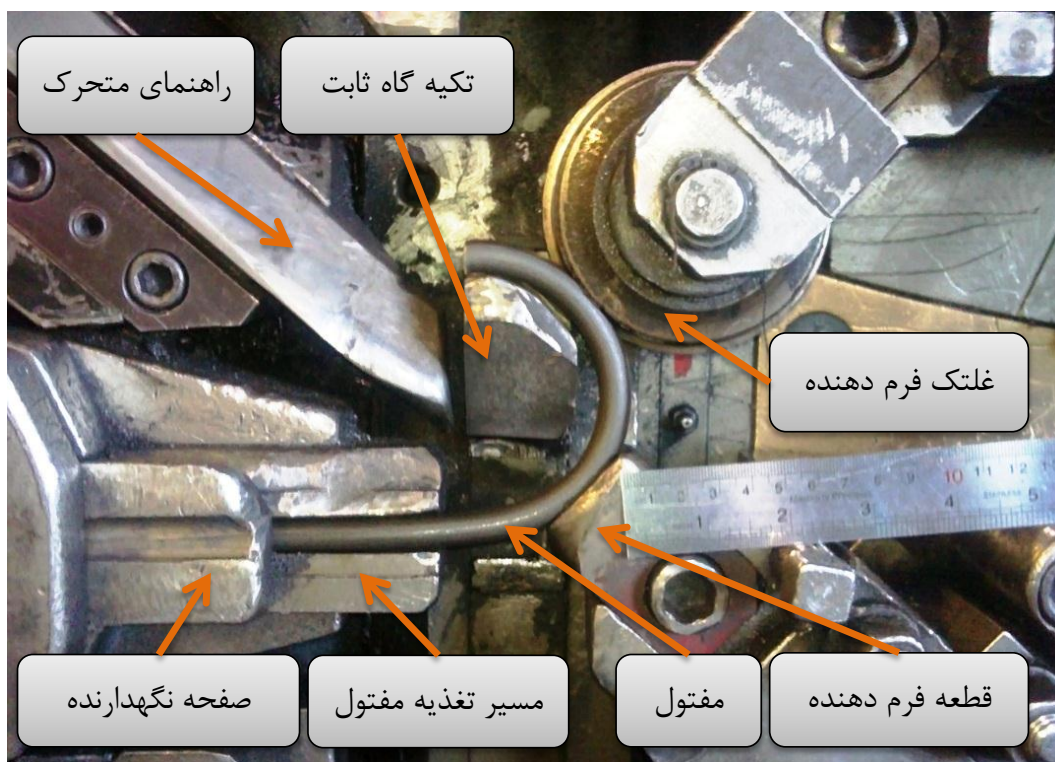


شکل (۱-۲) فنر مورد مطالعه

شکل (۲-۳) نمایی از دستگاه شکل‌دهی فنر را نشان می‌دهد. کلاف مفتول از یک قرقره باز شده و با اعمال نیروی اصطکاکی توسط چندین غلتک (در شکل نیامده است) از مسیری که در شکل مشخص شده تغذیه می‌گردد. اولین بخش شکل‌دهی توسط قطعه فرم‌دهنده انجام می‌شود و پس از آن غلتک فرم‌دهنده‌ی هرزگرد مرحله بعدی شکل‌دهی را انجام می‌دهد. راهنمای متحرک که در جهت عمود بر صفحه می‌تواند حرکت رفت و برگشتی داشته باشد گام فنر را تعیین می‌کند. کنترل قطر داخلی فنر نیز با تکیه‌گاه ثابت صورت می‌گیرد. پیچیدن هر فنر در حدود $t = 3/6 \text{ sec}$ زمان می‌برد و طول مفتول استفاده شده برای آن $L = 2/54 \text{ m}$ است؛ در نتیجه سرعت میانگین تغذیه مفتول فنر $V_f = 0.71 \text{ m/s}$ می‌باشد.



شکل (۲-۳) نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده فنر [۳۵]



شکل (۳-۲) دستگاه شکل دهی فنر

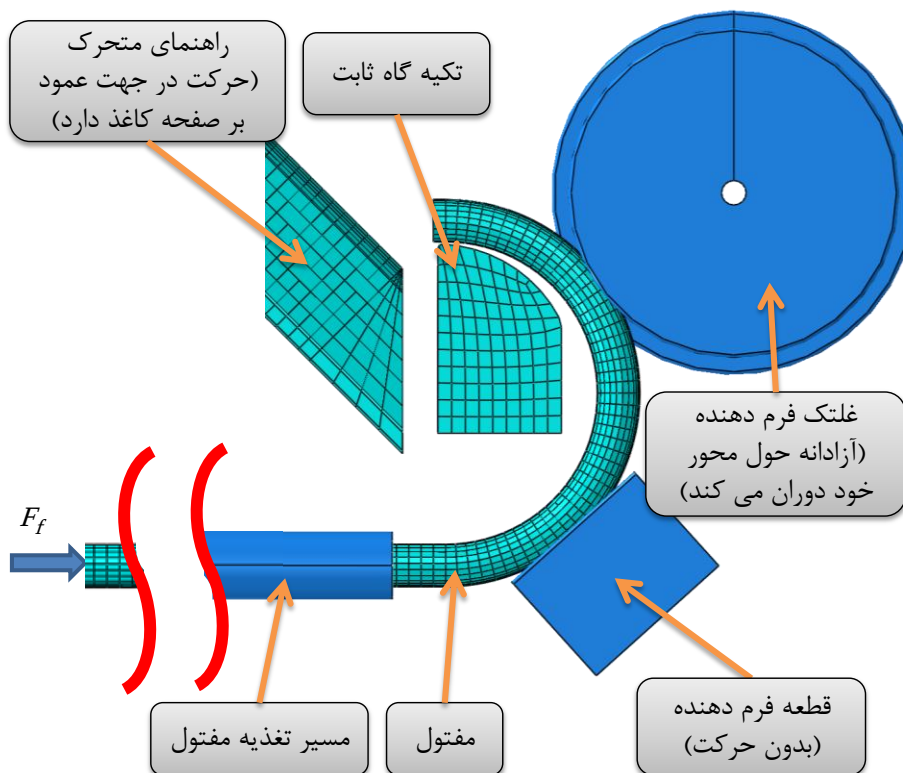
۴-۲ شبیه سازی فرایند شکل دهی فنر

شبیه سازی عددی فرایند شکل دهی سرد فنر به کمک نرم افزار المان محدود آباکوس و با استفاده از حل گر صریح^۱ آن به صورت سه بعدی انجام شده است. مدل المان محدود در شکل (۴-۲) مشاهده می شود. مفتول، تغییر شکل پذیر و بقیه اجزا به صورت صلب مدل شده اند. برای مش بندی مفتول (شکل (۵-۲)) از المان های پیوسته سه بعدی آجری شکل با انتگرال گیری کاهش یافته با هشت گره (C3D8R) و برای تکیه گاه ثابت و راهنمای متحرک نیز از المان های صلب سه بعدی با چهار گره (R3D4) استفاده شد. سایر اجزا به صورت صلب تحلیلی^۲ مدل شده و نیاز به مش بندی ندارند. به عنوان یک آنالیز مش، تحلیل ها با ۶ اندازه مختلف المان انجام شد (شکل (۵-۲)). برای به دست آوردن

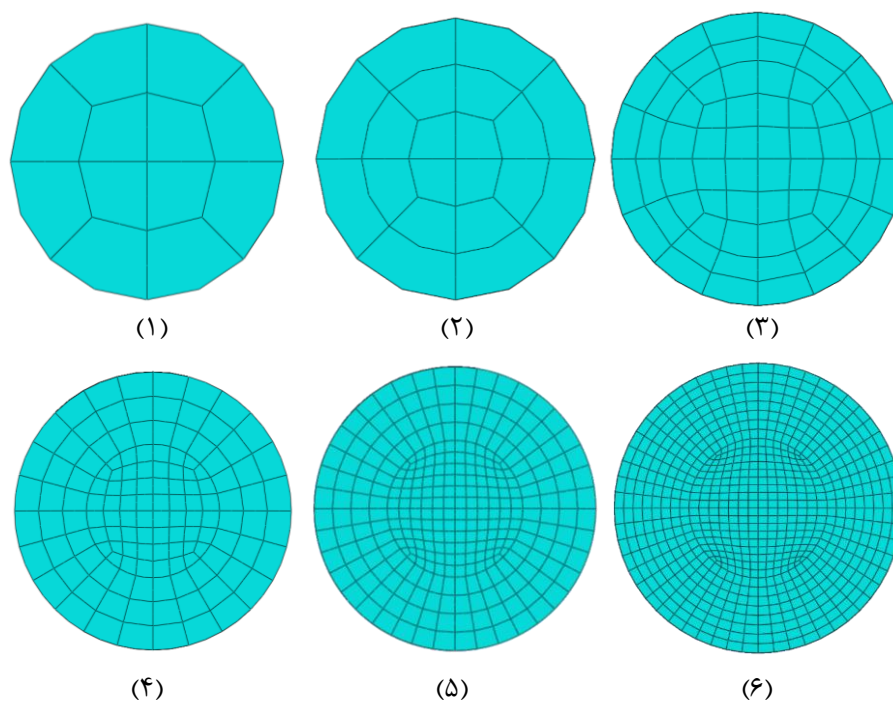
^۱ Explicit

^۲ Analytical rigid

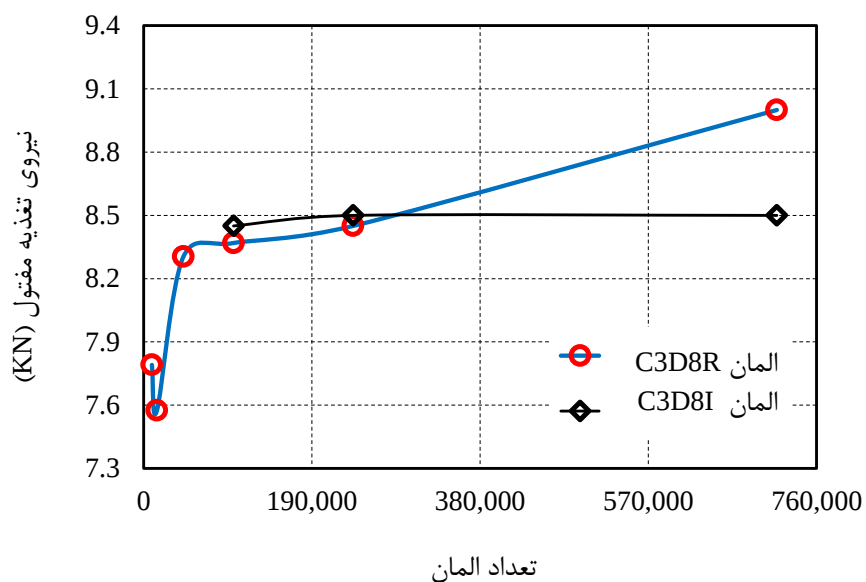
اندازه بهینه المان، نمودار نیروی تغذیه مفتول بر حسب تعداد المان رسم شد که در شکل (۶-۲) مشاهده می‌شود. تحلیل‌هایی با اندازه المان‌های ۴ تا ۶ و با المان‌های پیوسته سه‌بعدی آجری شکل (C3D8I) نیز انجام شد (شکل (۶-۲))؛ که نشان می‌دهد افزایش نیرو در تحلیل با اندازه المان ۶ به علت اثر hourglass می‌باشد. ضریب اصطکاک بین سطوح $\mu_c = 0.1$ و نوع تماس، سطح به سطح در نظر گرفته شده است. سرعت تغذیه مفتول $V_f = 0.75 \text{ m/s}$ می‌باشد.



شکل (۶-۲) مدل المان محدود شکل‌دهی فنر



شکل (۲-۵) تعداد المان‌های مفتول فنر در ۶ اندازه مش متفاوت، (۱) ۹۳۴۰، (۲) ۱۵۰۴۰، (۳) ۴۴۸۶۰، (۴) ۱۰۱۵۰۰، (۵) ۲۳۶۵۲۰، (۶) ۷۱۵۲۰۰



شکل (۲-۶) آنالیز مش، نیروی تغذیه مفتول بر حسب تعداد المان

یکی از راه‌های کاهش زمان تحلیل، استفاده از بزرگنمایی جرم^۱ است. در این روش با افزایش ساختگی چگالی جرم المان، زمان نمو پایداری حل افزایش یافته و تعداد نمو‌های زمانی کمتری مورد نیاز خواهد بود. به علت ماهیت خاص زمانی حلگر صریح، حداکثر نمو زمانی که در آن حل عددی همگرا می‌گردد، بسیار کوچک است. این بازه‌ی کوچک زمانی را نمو زمانی پایدار^۲ می‌نامند. نمو زمانی پایدار برای یک مدل المان محدود، برابر حداقل نمو زمانی پایدار برای همه‌ی المان‌ها می‌باشد که می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\Delta t = \frac{L_e}{C_d} \quad (۱-۲)$$

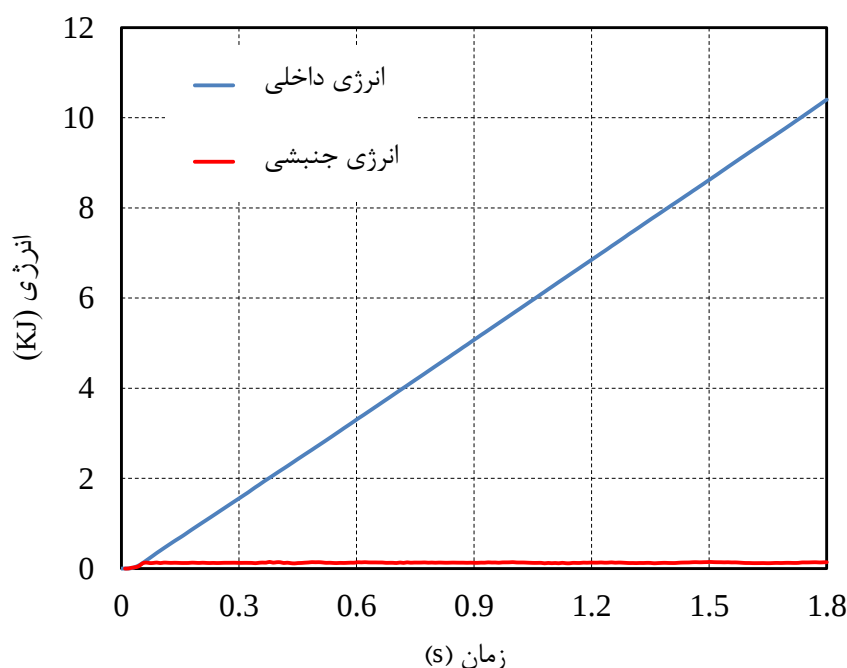
$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (۲-۲)$$

که L_e طول موثر المان، C_d سرعت موج طولی، ρ چگالی ماده و E مدول یانگ می‌باشد. با توجه به روابط ذکر شده، افزایش ساختگی چگالی ρ ، با ضریب n^2 ، سرعت موج C_d با ضریب n کاهش می‌یابد که باعث افزایش نمو زمانی پایدار Δt ، با ضریب n خواهد شد و بنابراین تعداد نمو‌های زمانی کمتری برای حل لازم است [۴۱].

در اینجا برای کاهش زمان حل از بزرگنمایی جرم با ضریب ۴۰۰ استفاده شد. در حل شبه‌استاتیکی، انرژی جنبشی تغییر شکل ماده نباید از کسر کوچکی (معمولاً ۵ تا ۱۰ درصد) از انرژی داخلی سیستم (مجموع انرژی‌های تغییر شکل پلاستیک، جنبشی، اتلاف در اثر اصطکاک و کار خارجی) درکل فرایند تجاوز کند. شکل (۷-۲) نمودار انرژی جنبشی و داخلی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است استفاده از بزرگنمایی جرم با ضریب مذکور ماهیت فرایند را عوض نکرده و بر صحت تحلیل اثر چندانی ندارد.

^۱ Mass scaling

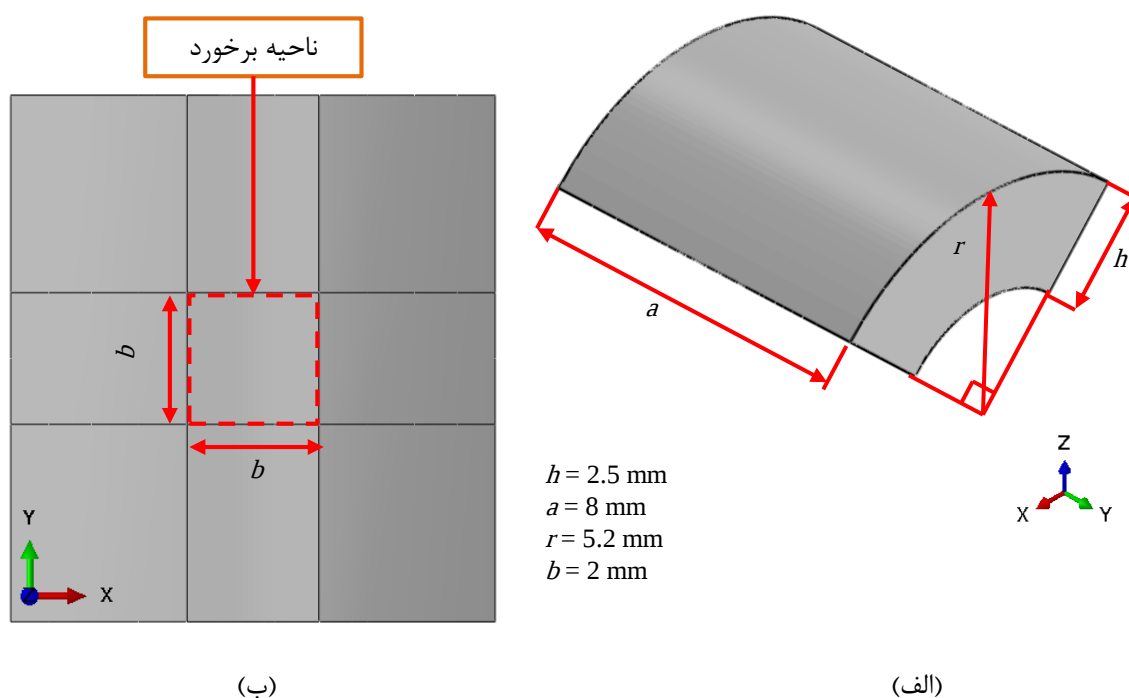
^۲ Stable time increment



شکل (۷-۲) مقایسه انرژی داخلی و جنبشی

۵-۲ شبیه‌سازی فرایند ساچمه‌زنی

ساچمه‌زنی بر روی فنر مورد مطالعه توسط ساچمه‌هایی با قطر $d_s = 0.9 \text{ mm}$ با سرعت $V = 75 \text{ m/s}$ انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی با حل گر صریح آباکوس نیز همین مقادیر در نظر گرفته شد. برای صرفه‌جویی در انجام محاسبات توسط نرم‌افزار و کاهش زمان تحلیل، یک قطاع 90° درجه‌ای از فنر (طول کمان $8/2 \text{ mm}$)، با شعاع خارجی $r = 5/2 \text{ mm}$ (شعاع مفتول فنر) و ضخامت $h = 2/5 \text{ mm}$ به طول $a = 8 \text{ mm}$ در نظر گرفته شد (شکل (۲-۸-الف)). قابل ذکر است که ضخامت‌های مختلف قطاع، از $h = 2 \text{ mm}$ تا $h = 3/5 \text{ mm}$ بررسی شد که تفاوتی در پروفیل تنش به دست آمده مشاهده نشد. ناحیه مرکزی با ابعاد $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ تحت برخورد ساچمه‌ها قرار می‌گیرد (شکل (۲-۸-ب)). ناحیه مرکزی در نظر گرفته شده در حقیقت نماینده‌ی کل فنر می‌باشد که ماده، اطراف آن را مهار نموده است.



شکل (۸-۲) قطاع در نظر گرفته شده از فنر برای شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، الف) هندسه و ابعاد، ب) ناحیه برخورد

با توجه به عملیات حرارتی که پس از فنرپیچی انجام می‌شود، اثرات کارسختی مرحله قبلی تا حد زیادی حذف می‌شود. بنابراین خواص ماده‌ی تعریف شده برای ساچمه‌زنی همان خواص ماده‌ی اولیه مفتول فنر می‌باشد. با توجه به هندسه‌ی مدل، یک دستگاه مختصات استوانه‌ای تعریف شد و جهت‌گیری ماده^۱ بر اساس این دستگاه مختصات تعریف شد. بر این اساس راستای شعاعی راستای ۱ و راستای مماسی و طولی به ترتیب به عنوان جهت‌های ۲ و ۳ در نظر گرفته شده‌اند. برای اعمال شرایط تقارن، درجه‌ی آزادی صفحه‌ی زیرین و چهار صفحه‌ی پیرامون مدل، در راستای عمود بر خودشان گرفته شده است. مدل برهم‌کنش بین ساچمه و قطاع یک رفتار مماسی طبق قانون کولمب می‌باشد. اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در ساچمه‌زنی با برخورد چندگانه پیچیده و مشکل است [۳۷]؛ بنابراین مقدار آن بر اساس

^۱ Material orientation

مرجع [۳۸] انتخاب شده است؛ که بررسی آنها نشان داد که نمودار توزیع تنش پسماند به ازای ضریب اصطکاک $\mu_s = 0.3$ همگرا می‌شود که در اینجا نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است.

برخورد ساچمه به قطعه، باعث انتشار موج تنش در ماده می‌شود. به علت اتلاف داخلی، شدت موج تنش با گذشت زمان کاهش می‌یابد [۳۸]. برای اعمال این میرایی و رسیدن به شرایط پایدار در کمینه زمان لازم برای انجام محاسبات، مطابق رابطه‌ی زیر، برای ماده، میرایی متناسب با جرم در نظر گرفته شد.

$$C = \alpha M \quad (2-2)$$

$$\alpha = 2\xi\omega_0 \quad (3)$$

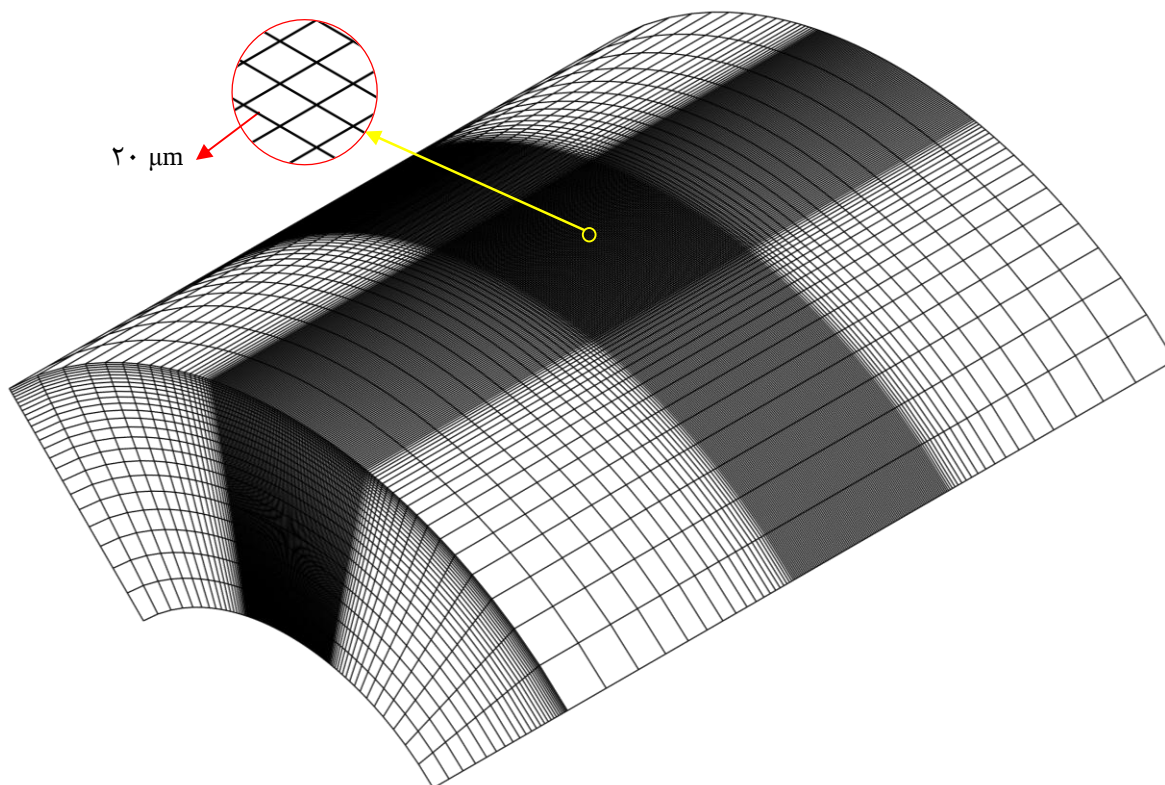
در این رابطه C ماتریس میرایی، M ماتریس جرم، α فاکتور میرایی متناسب با جرم، ξ نسبت میرایی که مقدار آن $0 < \xi < 1$ و ω_0 اولین فرکانس طبیعی سیستم است که می‌تواند از حل مسالهی مقدار ویژه به دست آید و یا در مورد این سیستم از رابطه‌ی زیر برآورد گردد.

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-5)$$

که h ارتفاع نمونه (در اینجا ضخامت قطاع)، E مدول یانگ و ρ چگالی ماده است. لازم به ذکر است که طبق بررسی انجام شده در [۳۸] و همچنین پیشنهاد [۴۲] مقدار نسبت میرایی $\xi = 0.5$ انتخاب شد.

برای مش‌بندی از المان‌های پیوسته سه‌بعدی آجری شکل با انتگرال‌گیری کاهش یافته با هشت گره (C3D8R) استفاده شد. برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر، اندازه‌ی المان‌ها نزدیک ناحیه‌ی برخورد کوچک در نظر گرفته شده‌اند. با تغییر اندازه‌ی المان، تنش اعمالی در نزدیکی سطح برخورد تغییر می‌کند. برای همگرا شدن تنش اعمالی در این ناحیه، اندازه‌ی المان طبق پیشنهاد [۳۷] کمتر از 0.25 قطر ساچمه ($d_s = 0.9 \text{ mm}$) در نظر گرفته شد. برای کاستن از حجم محاسبات، به سمت خارج ناحیه

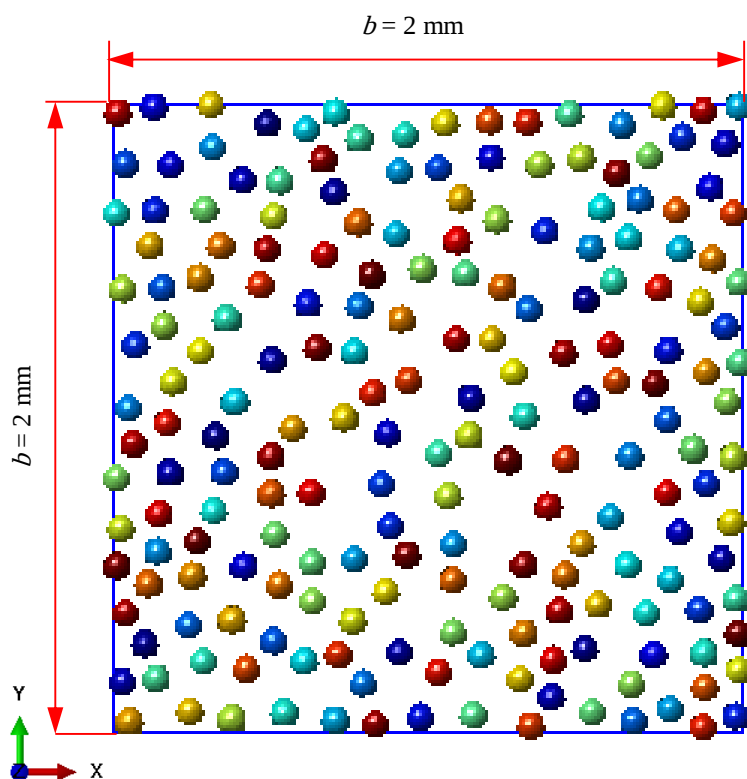
ی برخورد، اندازه‌ی المان افزایش داده شده است. تعداد المان‌های قطاع در این حالت ۴۶۶۹۹۲ می‌باشد (شکل ۲-۹).



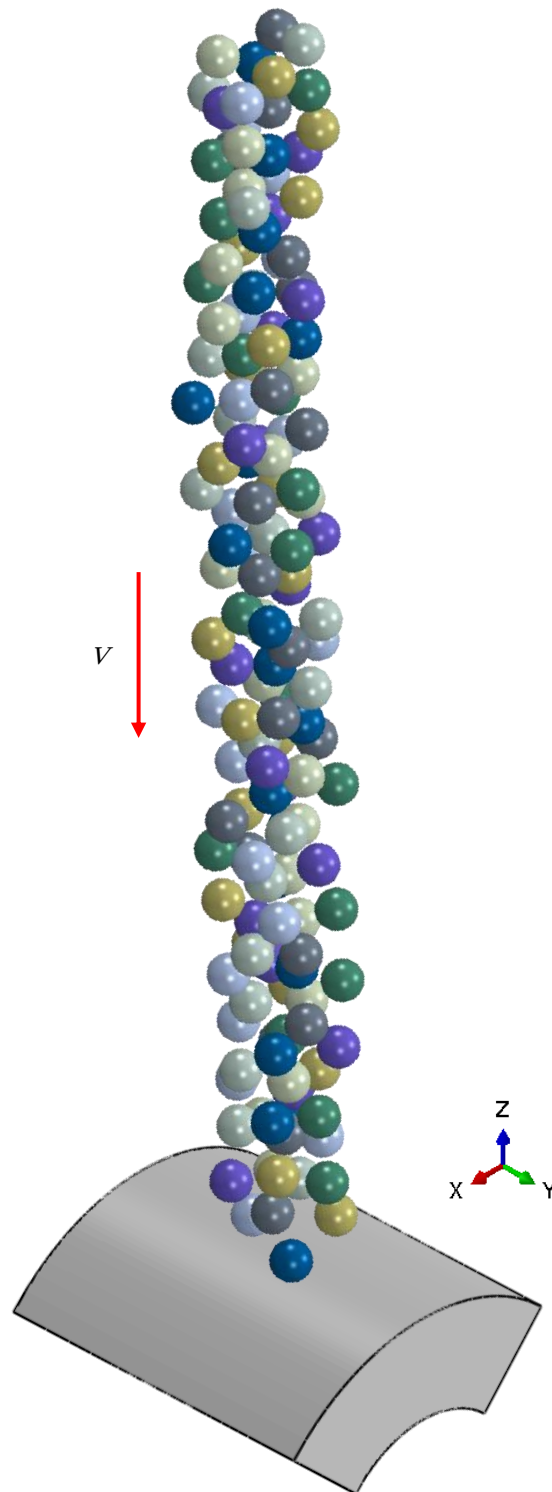
شکل (۲-۹) مدل مش‌بندی شده‌ی قطاع فنر برای ساچمه‌زنی

این فرایند ماهیت تصادفی دارد، بنابراین نیاز است که موقعیت ساچمه‌ها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که به واقعیت نزدیک باشد. برای این منظور، یک برنامه‌ی متلب برای تعیین موقعیت تصادفی گلوله‌ها در فضا نوشته شده است. در تعیین تصادفی مکان گلوله‌ها، همواره برنامه کنترل می‌کند که گلوله‌ها در هم فرو رفتگی نداشته باشند. همچنین فاصله‌ی عمودی مرکز ساچمه‌ها از هم به صورتی تعیین می‌شود که بین دو برخورد متوالی، تاخیر زمانی مشخص و یکسانی وجود داشته باشد. خروجی برنامه‌ی متلب، فایل متنی خوانش شده به وسیله‌ی حل‌گر صریح آباکوس می‌باشد. شکل (۲-۱۰) نشان دهنده‌ی موقعیت ساچمه‌ها با یک‌دهم ابعاد واقعی در صفحه $x-y$ می‌باشد. مدل المان محدود استفاده شده برای ساچمه‌زنی در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است.

در این شبیه‌سازی، تعداد $n = 150$ ساچمه صلب با سرعت اولیه‌ی V عمودی یکسان در نظر گرفته شد. همچنین تحلیل‌های دیگری هم با در نظر گرفتن ساچمه‌ها به عنوان جسمی که قابلیت تغییر شکل پلاستیک دارند انجام شده است. برای ساچمه از جنس AISI4340 استفاده شده که مشخصات مکانیکی آن در جدول (۱-۲) آمده است. در این حالت تعداد $n = 75$ ساچمه در نظر گرفته شد. تعداد المان‌های ساچمه ۱۶۰۰ و از نوع پیوسته سه‌بعدی آجری شکل با انتگرال‌گیری کاهش یافته با هشت گره (C3D8R) می‌باشد. در این حالت سه نوع تحلیل انجام گرفت. در حالت اول، مانند تحلیل‌های قبلی، برخورد ساچمه‌ها به صورت عمودی و بدون در نظر گرفتن برخورد با یکدیگر انجام شد. در حالت دوم برخوردها زاویه‌دار در نظر گرفته شد. توزیع زاویه برخوردها به صورت تصادفی بین 45° تا 45° و در صفحه‌ی $z-y$ می‌باشد. و حالت سوم برخوردها عمودی و با در نظر گرفتن برخورد بین ساچمه‌ها با ضریب اصطکاک $\mu_s = 0.3$ می‌باشد. به علت حجم بودن محاسبات، از یک رایانه با پردازشگر ۱۲ هسته‌ای استفاده شد و زمان متوسط انجام تحلیل‌ها توسط رایانه‌ی مذکور بین ۵ تا ۷ ساعت بود.



شکل (۱-۲) موقعیت تصادفی ساچمه‌ها (یک‌دهم اندازه واقعی) در صفحه $x-y$



شکل (۲-۱۱) مدل المان محدود فرایند ساچمه‌زنی

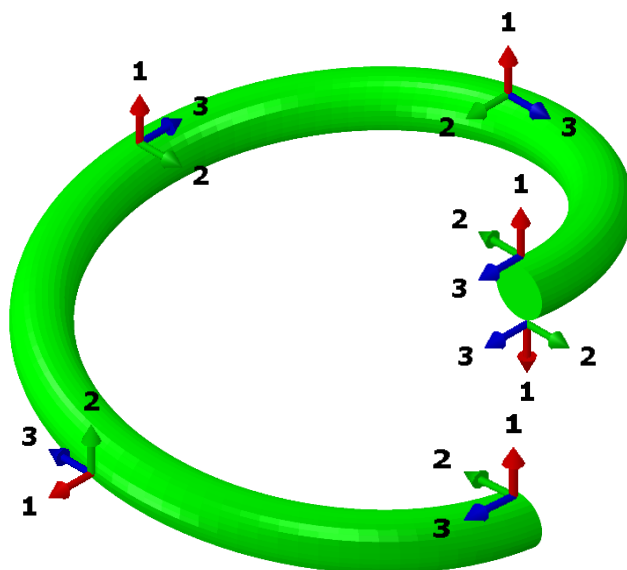
جدول (۱-۲) خواص ماده‌ی استفاده شده برای ساچمه (AISI4340) [۳۸]

تنش تسلیم	تنش نهایی	مدول الاستیسیته	ضریب پوآسون	چگالی
σ_0 (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
۱۴۷۰	۱۸۴۰	۲۱۰	۰/۳	۷۸۵۰

۲-۶ شبیه‌سازی فرایند پیش‌تنظیم (اصلاح طول)

شبیه‌سازی فرایند پیش‌تنظیم با استفاده از حل‌گر استاندارد آباکوس انجام شده و برای کاهش زمان تحلیل، فقط یک حلقه از فنر در نظر گرفته شد. از آنجایی که این فرایند، بدون تنش‌زدایی مرحله‌ی قبل یعنی ساچمه‌زنی انجام می‌شود، لازم است تنش‌های ایجاد شده بر اثر ساچمه‌زنی به فنر اعمال شود. با توجه به اینکه امکان انجام این کار در محیط گرافیکی آباکوس وجود ندارد، برای اعمال تنش مرحله قبل به فنر، نیاز به استفاده از زیربرنامه^۱ی SIGINI می‌باشد. همچنین برای انتقال صحیح مولفه‌های تنش، باید جهت‌گیری ماده، مطابق با شبیه‌سازی ساچمه‌زنی باشد. بنابراین در اینجا نیز، جهت‌گیری ماده بر اساس دستگاه مختصات استوانه‌ای تعریف می‌شود و راستاهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر راستاهای شعاعی، مماسی و طولی می‌باشند که جهت‌های مذکور در شکل (۲-۱۲) مشخص شده‌اند. با توجه به هندسه‌ی مدل نمی‌توان در محیط گرافیکی آباکوس، این جهت‌گیری ماده را اعمال نمود، بنابراین از زیربرنامه‌ی ORIENT برای این منظور استفاده شد. این زیربرنامه برای اعمال جهات مورد نظر به المان، نیاز به کسینوس‌های هادی آن المان دارد. بدین‌منظور، یک برنامه متلب نوشته شد که با استفاده از مختصات گره‌های المان‌های مدل، کسینوس‌های هادی هر المان را محاسبه کند. سپس خروجی برنامه شامل این اطلاعات به صورت یک فایل متنی به عنوان ورودی زیربرنامه‌ی مذکور استفاده می‌شود.

^۱ Subroutine



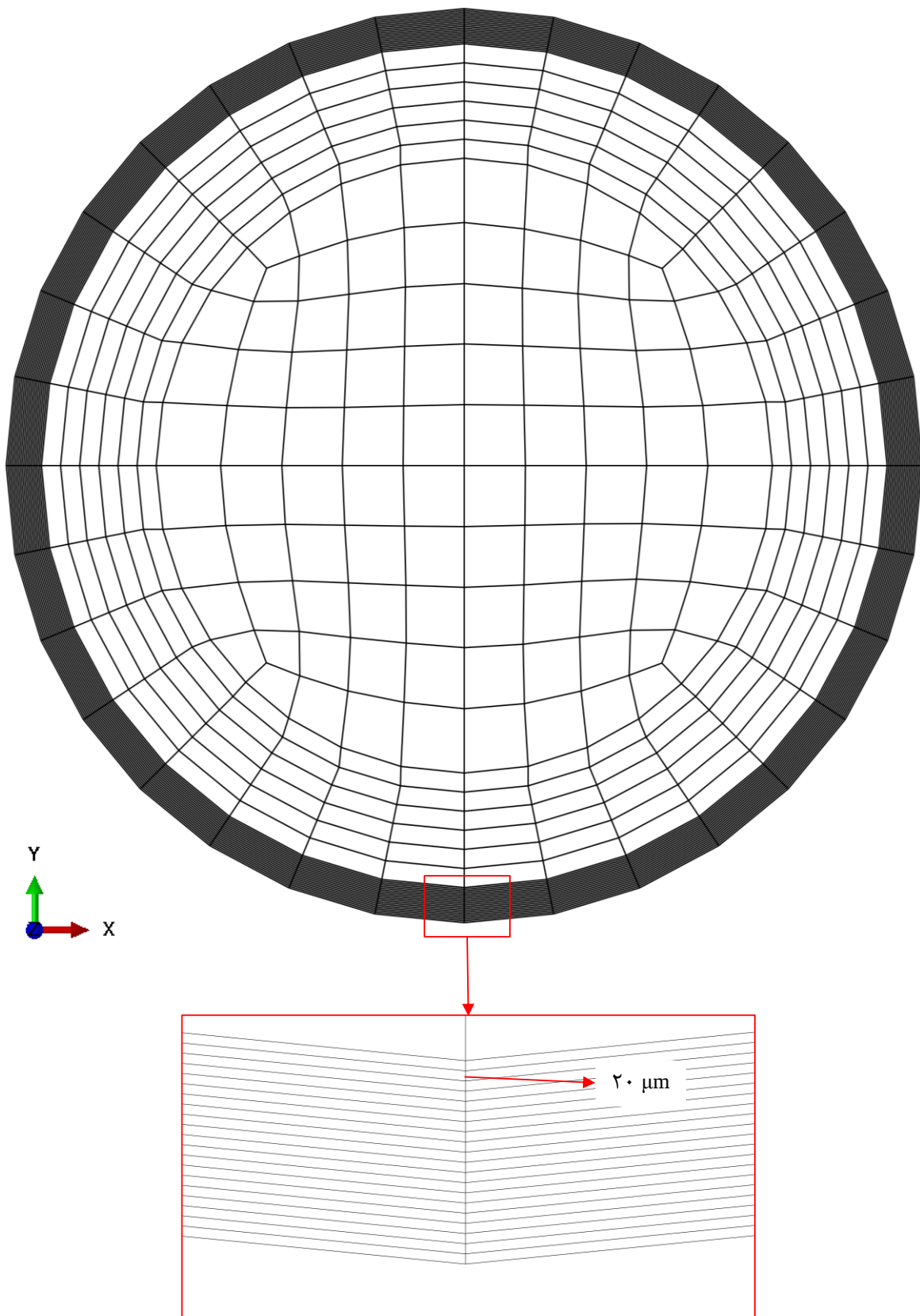
شکل (۲-۱۲) جهت‌گیری ماده در شبیه‌سازی پیش‌تنظیم

تنش‌های اصلی که در ساچمه‌زنی ایجاد می‌شوند، در راستای ۲ و ۳ (با توجه به جهت‌گیری ماده) می‌باشند؛ تنش در راستای ۱ ناچیز است و در نظر گرفته نشده است. با توجه به پروفیل تنش به دست آمده از شبیه‌سازی ساچمه‌زنی و با استفاده از زیربرنامه‌ی SIGINI، مقادیر تنش به هر المان، بر اساس فاصله‌ی شعاعی آن از مرکز مقطع فنر، اختصاص داده شد. تعداد ۲۶ داده از پروفیل تنش ساچمه‌زنی، در فواصل شعاعی مختلف در یک فایل متنی ذخیره و به عنوان ورودی زیربرنامه قرار گرفت. برای محاسبه‌ی فاصله‌ی شعاعی هر المان نیز، یک برنامه متلب نوشته شد و خروجی آن به صورت یک فایل متنی به عنوان ورودی زیربرنامه استفاده شد. از آنجایی که فاصله‌ی شعاعی مقادیر تنش و فاصله‌ی شعاعی المان‌ها، لزوماً یکسان نیستند؛ زیربرنامه، ابتدا مقدار تنش متناظر با فاصله شعاعی هر المان را از بین ۲۶ داده‌ی مذکور، از طریق میان‌یابی محاسبه می‌کند و سپس این مقدار به عنوان تنش آن المان در نظر گرفته می‌شود.

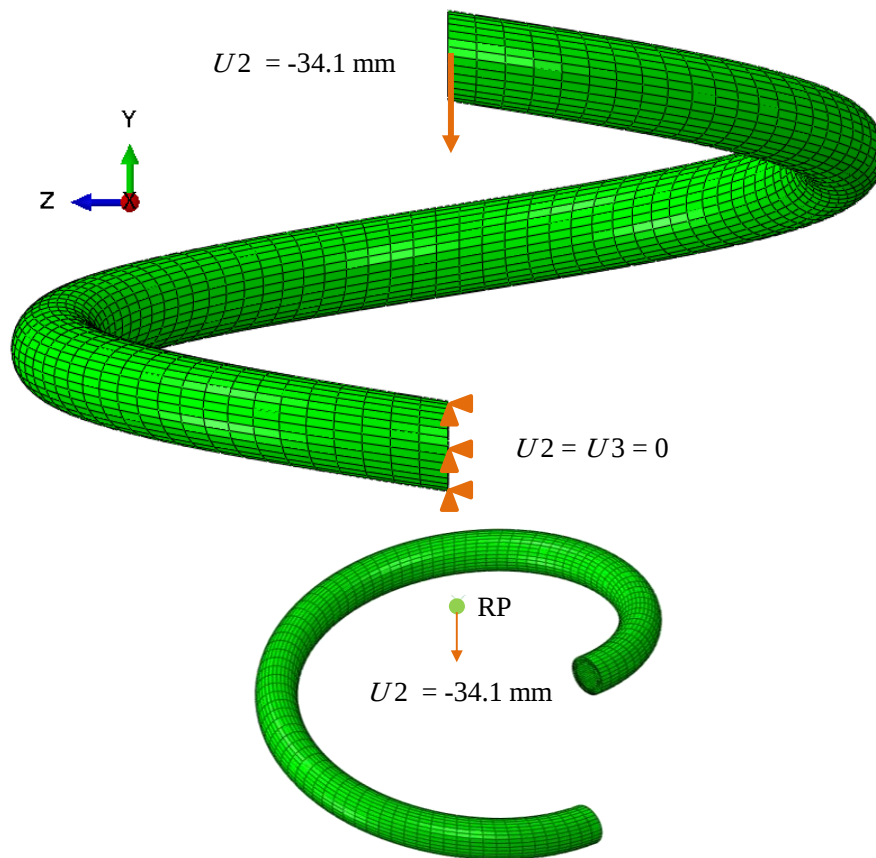
با توجه به اینکه تنش حاصل از ساچمه‌زنی در فاصله‌ی کمی از سطح تغییرات زیادی دارد، نیاز است که ابعاد المان در این نواحی به اندازه کافی کوچک باشد تا بتوان پروفیل تنش به دست آمده از ساچمه‌زنی را به درستی به این مرحله انتقال داد. بنابراین در سطح بیرونی، ۲۰ لایه المان با طول

۲۰ μm در راستای شعاعی در نظر گرفته شد. برای کاهش حجم محاسبات، ابعاد المان در نواحی مرکزی، بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است که مقطع مش‌بندی شده در شکل (۲-۱۳) مشاهده می‌شود. تعداد المان‌های مدل در این حالت، ۸۸۱۶۰ و از نوع پیوسته سه‌بعدی آجری شکل با انتگرال‌گیری کاهش یافته با هشت گره (C3D8R) می‌باشند. شکل (۲-۱۴) مدل المان محدود استفاده شده برای پیش‌تنظیم را نشان می‌دهد. درجات آزادی گره‌های انتهای پایینی حلقه‌ی فنر در راستای ۲ و ۳ گرفته شده است. گره‌های انتهای بالایی به عنوان یک جسم صلب تعریف شد و نقطه مرجع آن، همانطور که در شکل (۲-۱۴) مشخص است، در مرکز حلقه در نظر گرفته شد. به این نقطه‌ی مرجع، جابه‌جایی در راستای ۲ و رو به پایین به میزان ۳۴/۱ mm، برای رسیدن به ارتفاع صلب اعمال شده است.

بسیاری از تولیدکنندگان فنر، عملیات پیش‌تنظیم را قبل از ساچمه‌زنی انجام می‌دهند. بنابراین فرایند پیش‌تنظیم بدون هیچ گونه پیش‌تنشی خواهد بود (با این فرض که در عملیات حرارتی که پس از شکل‌دهی فنر روی آن انجام می‌شود، تمامی تنش پسماند مرحله قبل آزاد شود). شبیه‌سازی این حالت نیز انجام شده است. تنها تفاوتی که با شبیه‌سازی قبلی دارد این است که پیش‌تنشی در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل (۲-۱۳) نحوه مش بندی مقطع فنر برای پیش تنظیم



شکل (۲-۱۴) مدل المان محدود پیش تنظیم

فصل ۳ نتایج و بحث

۳-۱ مقدمه

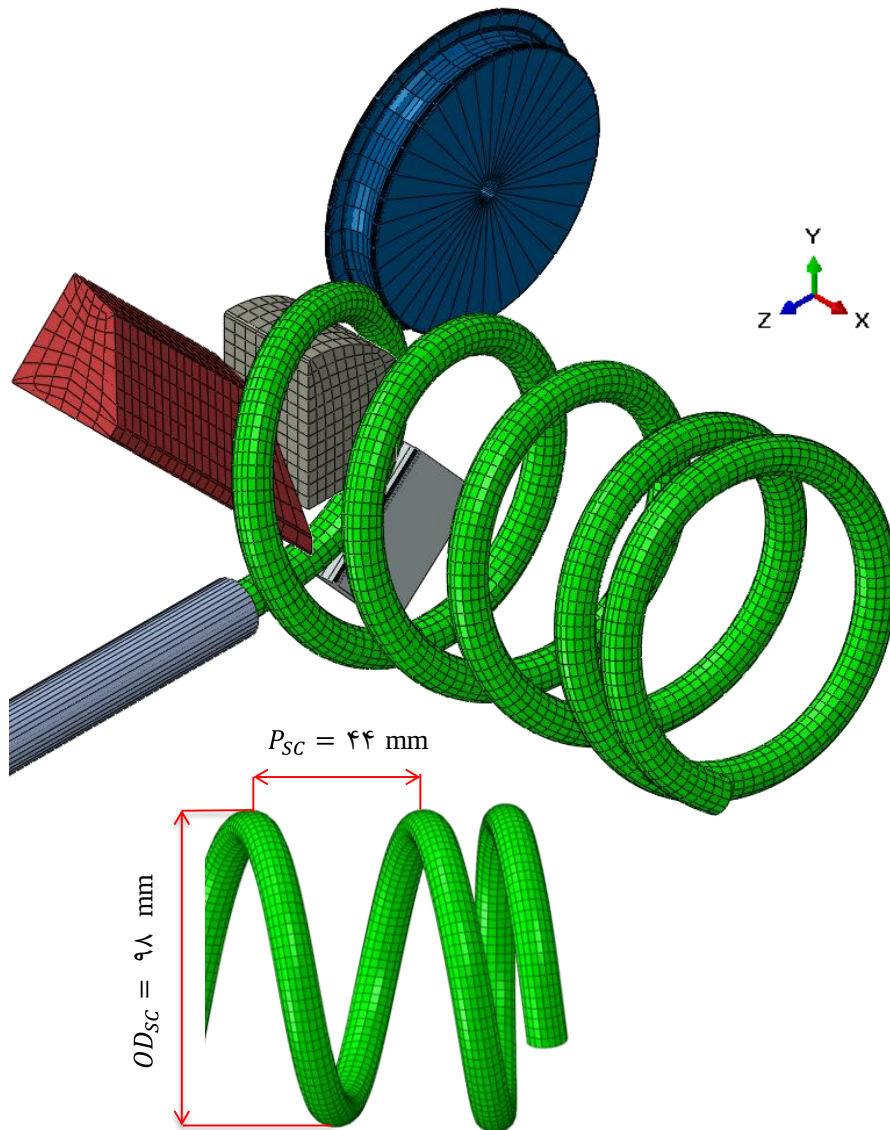
در این فصل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی هر سه فرایند، ارائه و مورد بحث قرار گرفت. همچنین نتایج حاصله، با اطلاعات تجربی موجود مقایسه و میزان و علت خطاهای شبیه‌سازی بیان شد.

۳-۲ شبیه‌سازی شکل‌دهی فنر

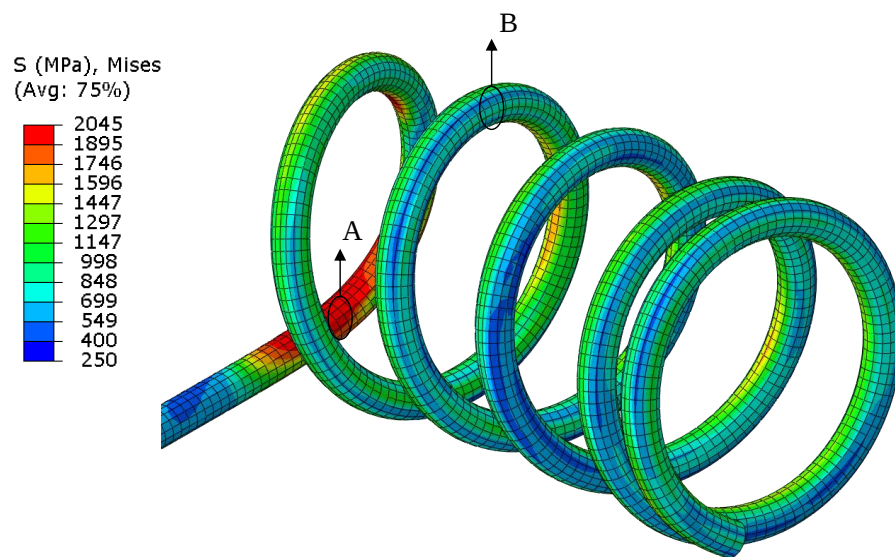
شکل (۳-۱) نتیجه‌ی شبیه‌سازی شکل‌دهی را نشان می‌دهد. فنر به دست آمده از شبیه‌سازی دارای $P_{SC} = 44 \text{ mm}$ و قطر خارجی $OD_{SC} = 98 \text{ mm}$ می‌باشد. مقایسه با مقادیر واقعی (mm) $P_C = 44/5$ و $OD_C = 99 \text{ mm}$ نشان‌دهنده‌ی خطای هندسی در حدود یک درصد در شبیه‌سازی می‌باشد که بسیار مناسب می‌باشد.

۳-۲-۱ توزیع تنش و کرنش

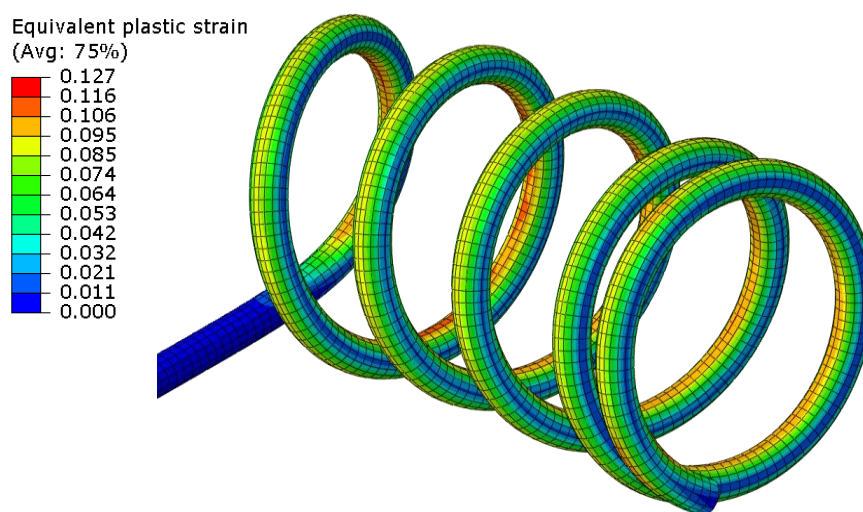
توزیع تنش بر اساس معیار ون‌میزز و کرنش پلاستیک معادل به ترتیب در شکل‌های شکل (۳-۲) و شکل (۳-۳) نشان داده شده است. بیشترین تنش ایجاد شده در مفتول هنگامی است که اولین بخش شکل‌دهی توسط قطعه‌ی فرم دهنده انجام می‌شود. بیشترین احتمال شکست فنر در حین شکل‌دهی در همین ناحیه می‌باشد که به دلایلی چون شکل‌پذیری کم ماده فنر، تنظیمات دستگاه و شرایط اصطکاکی می‌باشد [۳۵]. پس از شکل‌گیری کامل فنر، بخش قابل توجهی از تنش به صورت پسماند در آن باقی می‌ماند. کنترل این تنش بسیار مهم است. همانگونه که در شکل (۳-۴) مشخص است، بیشترین میزان تغییر شکل در شعاع خارجی و به ویژه در شعاع داخلی، جایی که تحت بیشترین کشش و فشار است، می‌باشد. تار خنثی روی محور x قرار دارد.



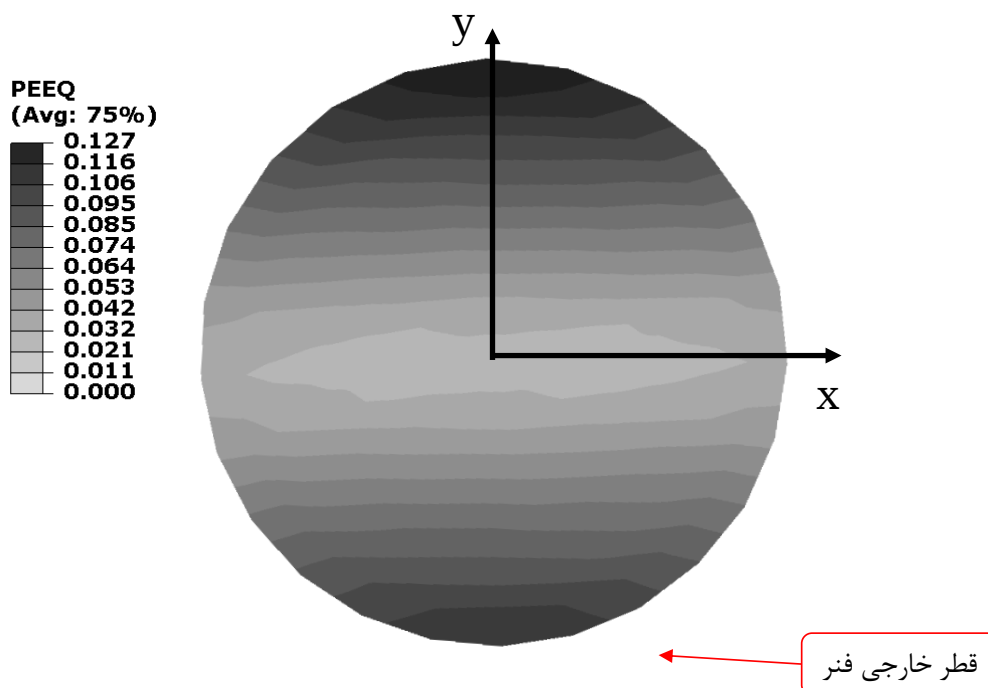
شکل (۱-۳) فنر به دست آمده از شبیه سازی



شکل (۲-۳) توزیع تنش ون میزز



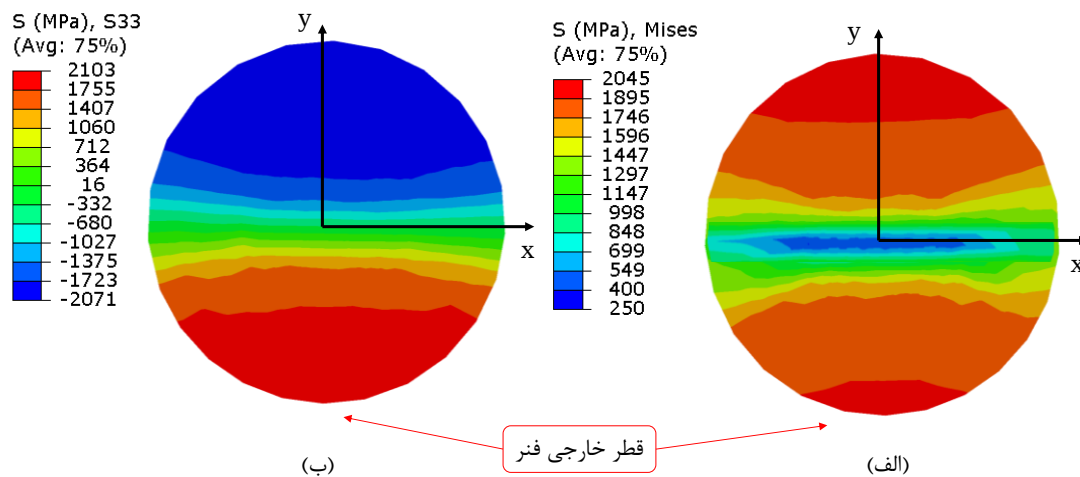
شکل (۳-۳) توزیع کرنش پلاستیک معادل



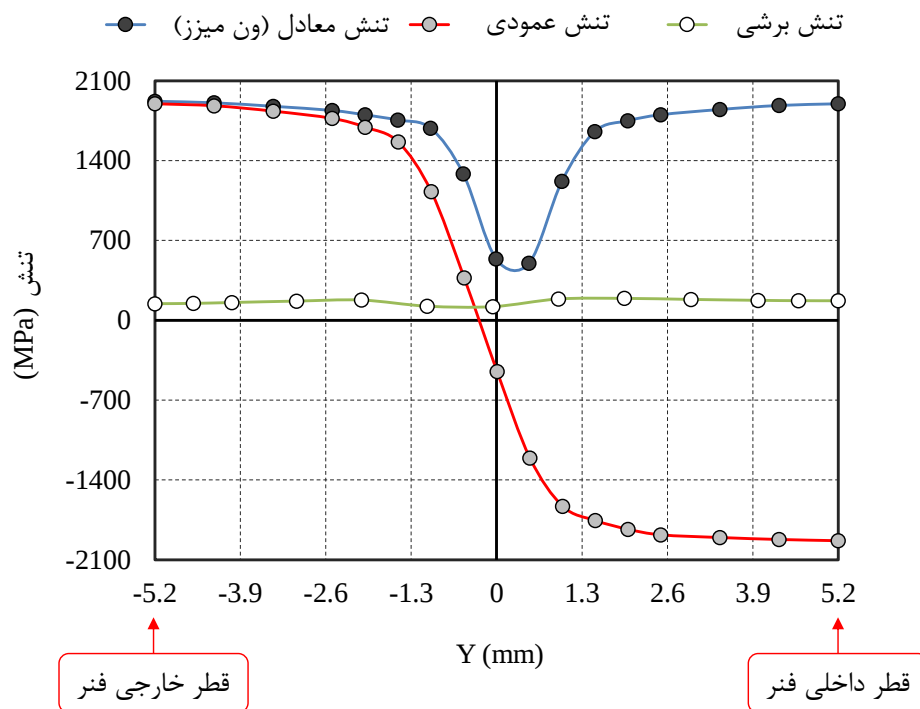
شکل (۳-۴) کرنش پلاستیک معادل در مقطع فنر

شکل (۳-۵-الف) توزیع تنش را در مقطع فنر طبق معیار ون میزز و در لحظه‌ی شکل‌دهی (مقطع A در شکل (۳-۲)) نشان می‌دهد. تنش نسبت به تار خنثی متقارن می‌باشد. تنش ون میزز، در قسمت‌های بالا و پایین مقطع یعنی در خارجی و داخلی‌ترین ناحیه فنر به مقدار ماکزیمم 2045 MPa می‌رسد ولی در محل تار خنثی بسیار کم می‌باشد. کمترین مقدار تنش محوری عمودی 2071 MPa و در داخلی‌ترین ناحیه‌ی مقطع فنر می‌باشد و این تنش افزایش پیدا می‌کند تا به مقدار 2103 MPa در بیرونی‌ترین قسمت مقطع برسد. در تار خنثی نیز تنش به صفر می‌رسد (شکل (۳-۵-ب)). شکل (۳-۶) پروفیل توزیع تنش معادل، محوری و برشی در حین شکل‌دهی را در راستای محور y در مقطع فنر نشان می‌دهد. تنش برشی رسم شده در نمودار، طبق رابطه زیر از دو مولفه‌ی تنش برشی در صفحه‌ی مقطع فنر، یعنی $S13$ و $S23$ به دست آمده است. کم بودن مقدار تنش برشی حاکی از این است که در شکل‌دهی فنر، سهم خمش، به مراتب بیشتر از پیچش می‌باشد.

$$\tau = \sqrt{S13^2 + S23^2} \quad (3-1)$$



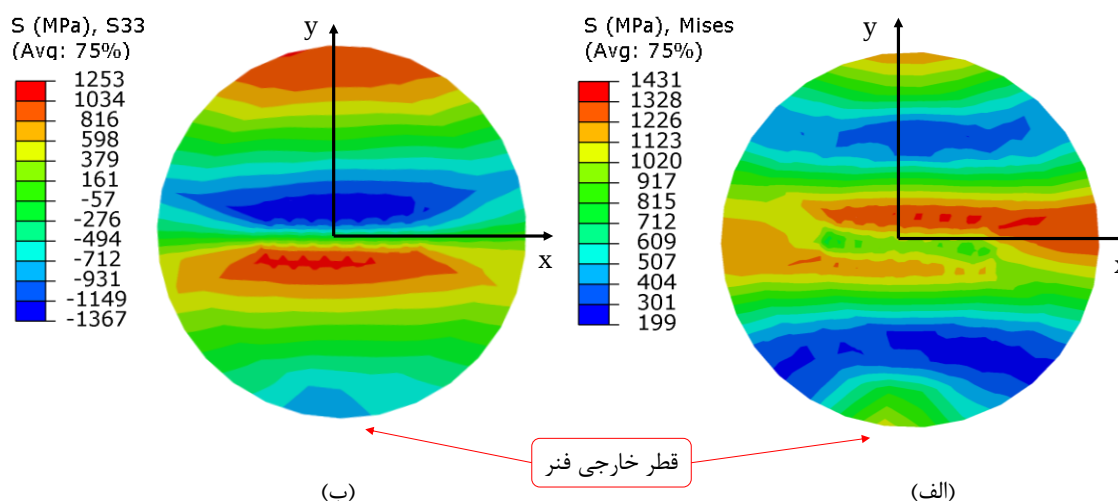
شکل (۳-۵) تنش در مقطع A در شکل (۳-۲) فنر در حین شکل‌دهی الف) تنش معادل ون میزز، ب) تنش محوری عمودی



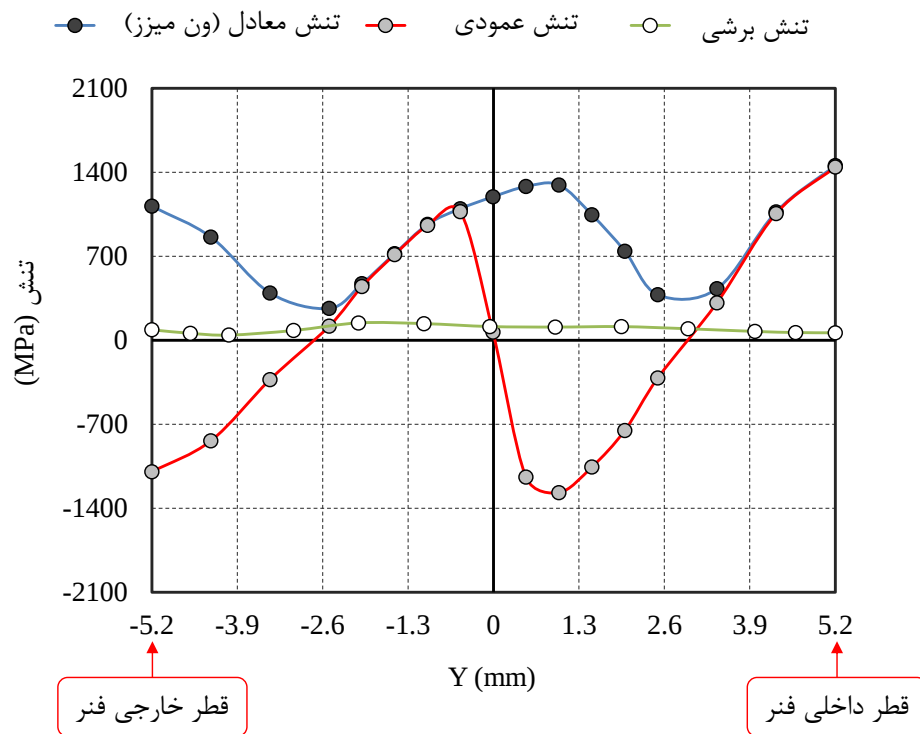
شکل (۳-۶) تنش در طول مقطع در لحظه‌ی شکل‌دهی

توزیع تنش پسماند در مقطع فنر پس از شکل‌دهی (مقطع B در شکل (۳-۲)) در شکل (۳-۷-الف) مشخص شده است. این تنش نیز تقریباً نسبت به تار خنثی متقارن می‌باشد. بیشترین مقدار تنش در

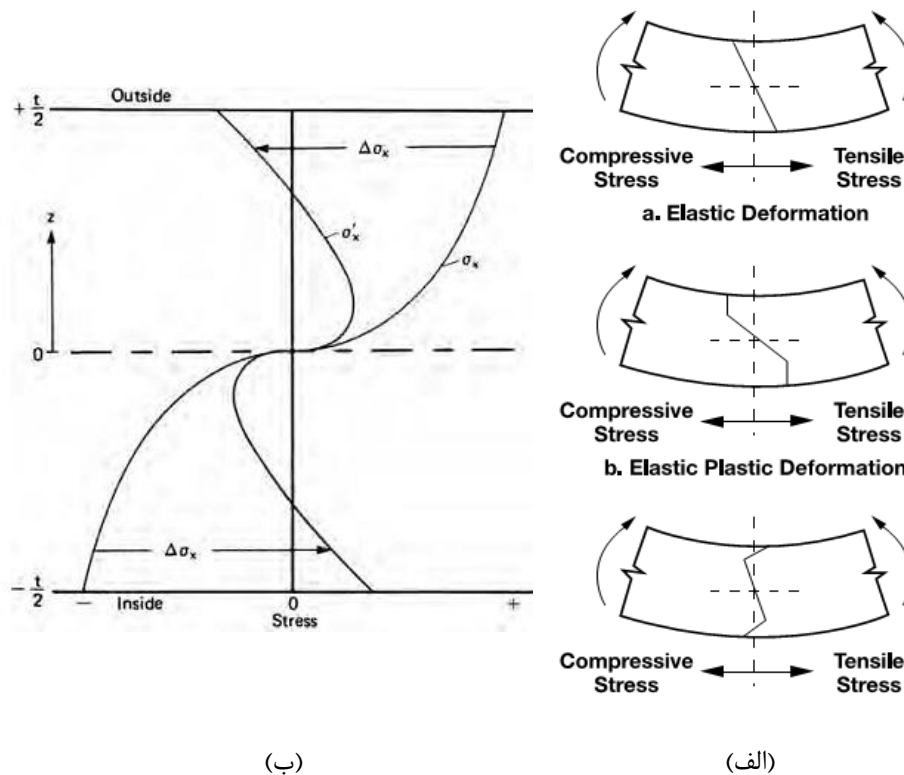
حدود 1400 MPa می‌باشد که مربوط به قسمت میانی مقطع می‌باشد. تنش در قطر داخلی و خارجی فنر نیز نسبتاً زیاد می‌باشد اما در قسمت‌هایی که بین نواحی مذکور قرار دارد، تنش به میزان قابل توجهی آزاد شده و مقدار آن کمتر از 500 MPa است. شکل (۳-۷-ب) نشان دهنده توزیع تنش پسماند محوری در مقطع فنر بلافاصله پس از شکل‌دهی می‌باشد. تنش در بالای مقطع کششی و در پایین آن فشاری می‌باشد. اما در میانه مقطع، تنش در قسمتی که به سمت بالای مقطع (که تحت تنش کششی است) نزدیک‌تر می‌باشد فشاری بوده و در ناحیه نزدیک به پایین مقطع از نوع کششی است. شکل (۳-۸) پروفیل تنش معادل، محوری و برشی پس از شکل‌دهی را در راستای محور y در مقطع فنر نشان می‌دهد. پروفیل تنش محوری شبیه به الگوی کلاسیک زیگ زاگ مورد انتظار برای یک میله می‌باشد که تحت خمش قرار گرفته، به تسلیم رسیده و سپس رها شده است (شکل (۳-۹)). ولی در اینجا، تنش سمت چپ نمودار که مربوط به بخش خارجی فنر می‌باشد اندکی از سمت مقابل کمتر می‌باشد. نتایج ذکر شده در این بخش، تطابق خوبی با نتایج تحلیلی کوبلف [۱۳] و نتایج تجربی ماتجیسک و همکاران [۱۴] دارد.



شکل (۳-۷) تنش در مقطع (B در شکل (۳-۲)) فنر پس از شکل‌دهی (الف) تنش معادل و (ب) تنش محوری عمودی



شکل (۳-۸) تنش پسماند در طول مقطع پس از شکل‌دهی

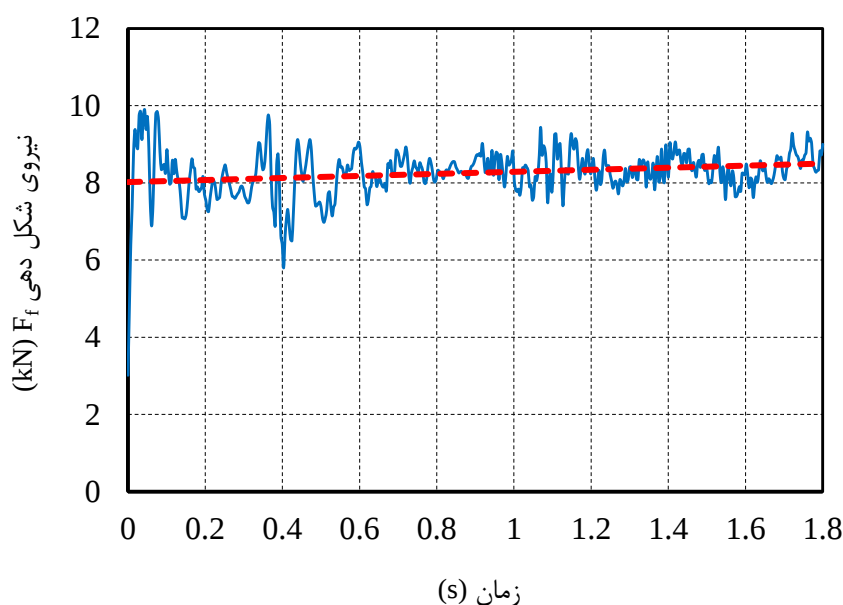


شکل (۳-۹) توزیع تنش حین خمش و پس از باربرداری (الف) ماده بدون کرنش‌سختی [۴۳]، (ب) ماده دارای کرنش‌سختی

[۴۴]

۳-۲-۲ نیروی شکل دهی

نیروی لازم برای شکل دهی و در واقع نیروی مورد نیاز برای تغذیه مفتول فنر F_f ، در حین فرایند، در شکل (۳-۱۰) مشخص شده است. خطچین مشخص شده در شکل حاصل از میان‌یابی خطی بوده و مقدار میانگین این نیرو برابر با ۸,۲ kN است.

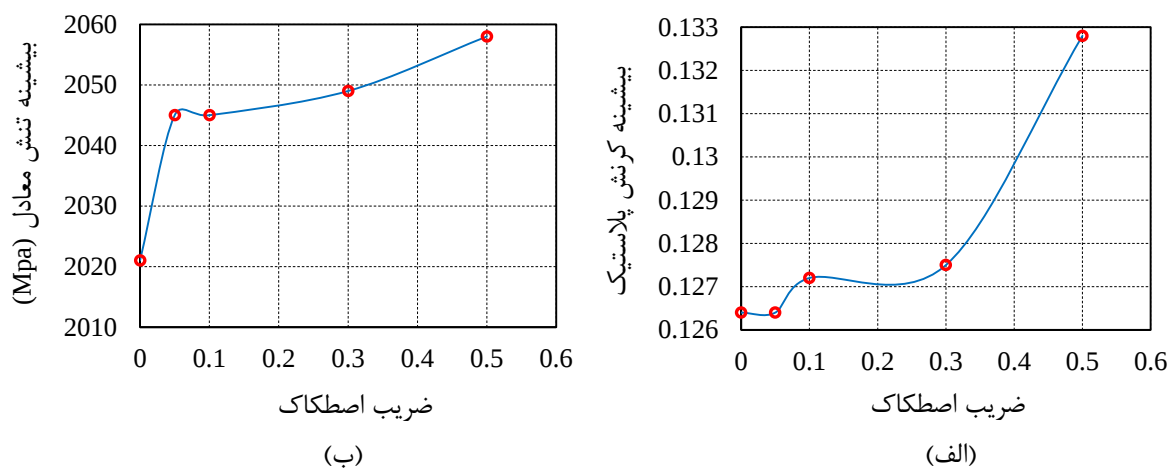


شکل (۳-۱۰) نیروی شکل دهی در طول فرایند

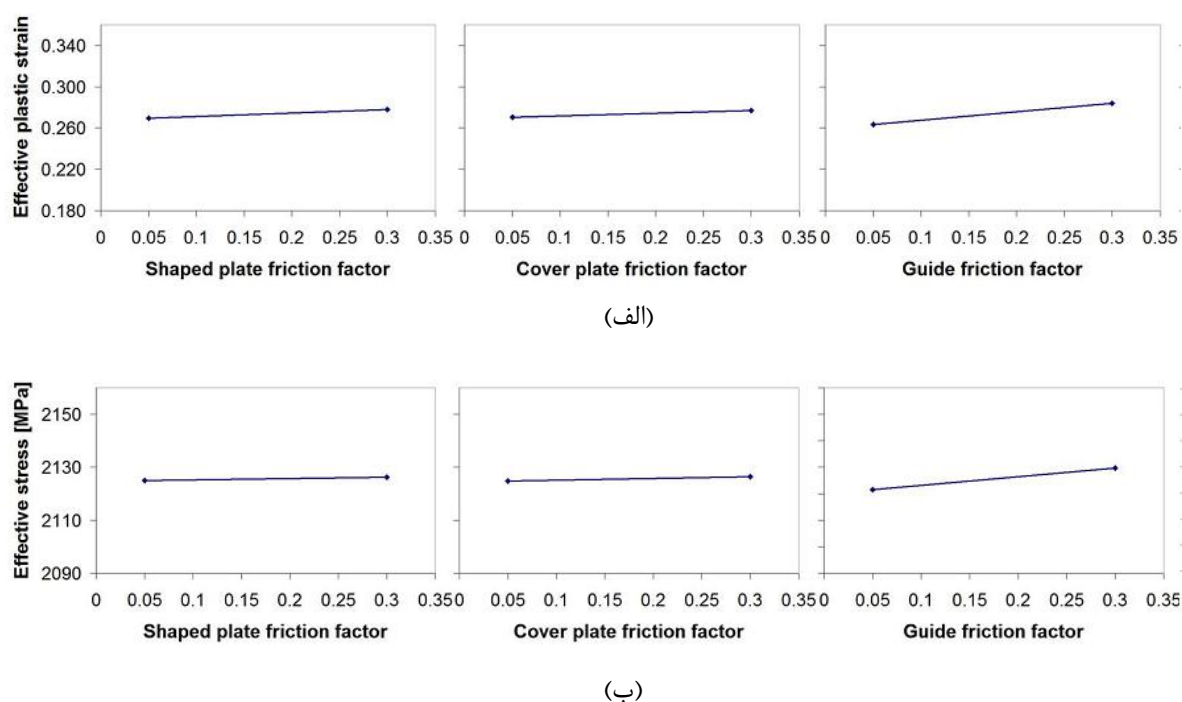
۳-۲-۳ اثر ضریب اصطکاک

تحلیل با پنج ضریب اصطکاک مختلف انجام شد. حالت اول بدون اصطکاک و حالت دوم تا پنجم، به ترتیب با ضرایب اصطکاک ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱، ۰/۰۵، می‌باشند. شکل (۳-۱۱) اثر ضریب اصطکاک را بر روی حداکثر کرنش پلاستیک معادل (در مقطع B) و بیشینه‌ی تنش معادل ایجاد شده (در مقطع A) در فنر را نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش ضریب اصطکاک، کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد. این افزایش تا ضریب اصطکاک ۰/۳ جزیی بوده ولی کرنش پلاستیک در ضریب اصطکاک ۰/۵ افزایش بیشتری دارد. بیشینه‌ی تنش معادل نیز با افزایش ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که میزان افزایش کرنش پلاستیک و همچنین بیشینه‌ی تنش معادل، با افزایش ضریب اصطکاک، نسبتاً

ناچیز می‌باشد. همانطور که از شکل (۳-۱۲) برمی‌آید، بررسی برتی و مونتی [۳۵] نیز حاکی از تاثیر کم ضریب اصطکاک روی کرنش پلاستیک و تنش معادل می‌باشد. البته این به معنای بی اهمیت بودن پارامتر ضریب اصطکاک در فرایند نیست.



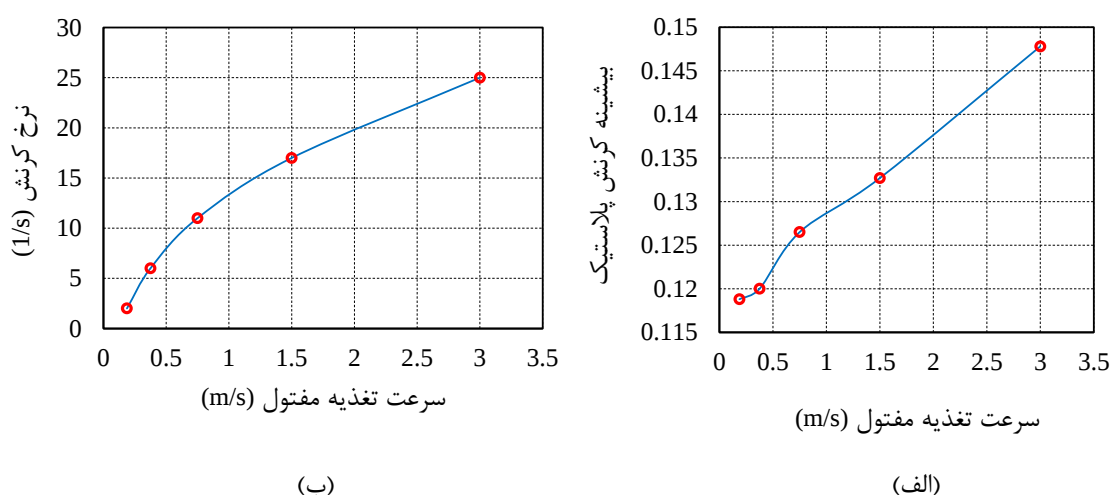
شکل (۳-۱۱) اثر ضریب اصطکاک بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) تنش معادل



شکل (۳-۱۲) اثر ضریب اصطکاک بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) تنش معادل [۳۵]

۳-۲-۴ اثر سرعت تغذیه مفتول

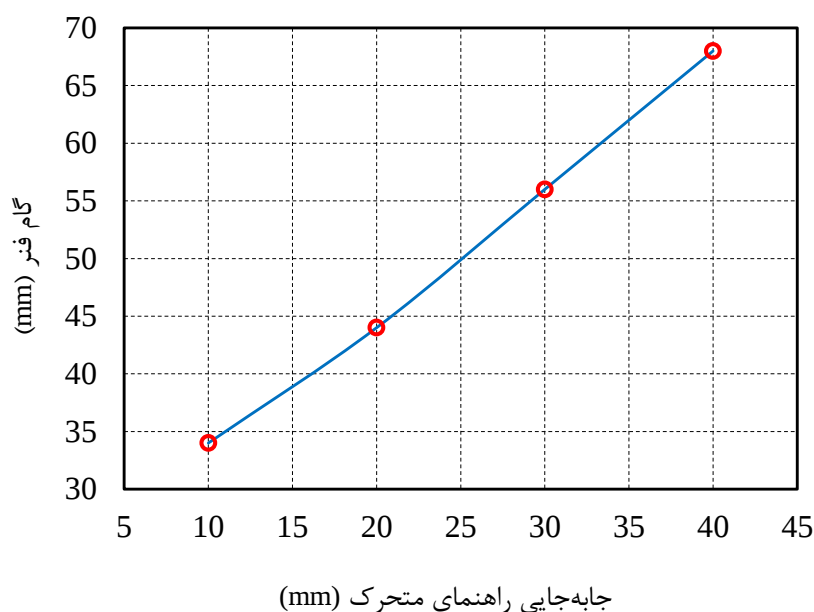
با در نظر گرفتن پنج سرعت متفاوت تغذیه مفتول، از 0.2 تا 3 m/s اثر سرعت تغذیه بر حداکثر کرنش پلاستیک و نیز نرخ کرنش فرایند به دست آمد. شکل (۳-۱۳-الف) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت تغذیه، کرنش پلاستیک ایجاد شده نیز بیشتر می‌شود. رابطه نرخ کرنش با سرعت تغذیه نیز در شکل (۳-۱۳-ب) مشاهده می‌شود. همانگونه که از شکل مشخص است با افزایش سرعت تغذیه، سرعت افزایش نرخ کرنش کم می‌شود. لازم به ذکر است که در سرعت‌های بالاتر از 3 m/s ، هندسه‌ی فنر شکل‌دهی شده، بسیار دور از فنر اصلی بود. علت بروز این خطا، اثرهای دینامیکی ناشی از استفاده از بزرگنمایی جرم است؛ چرا که در این حالت، میزان انرژی جنبشی بالاتر از حد قابل قبول می‌باشد.



شکل (۳-۱۳) اثر سرعت تغذیه مفتول بر روی الف) کرنش پلاستیک، ب) نرخ کرنش

۳-۲-۵ اثر جابه‌جایی راهنمای متحرک

همانطور که در ابتدای فصل دوم اشاره شد، راهنمای متحرک، گام فنر را تعیین می‌کند. شکل (۳-۱۴) رابطه گام فنر با میزان جابه‌جایی راهنمای متحرک را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در شبیه‌سازی فنر مورد مطالعه، جابه‌جایی راهنمای متحرک 20 mm در نظر گرفته شد.



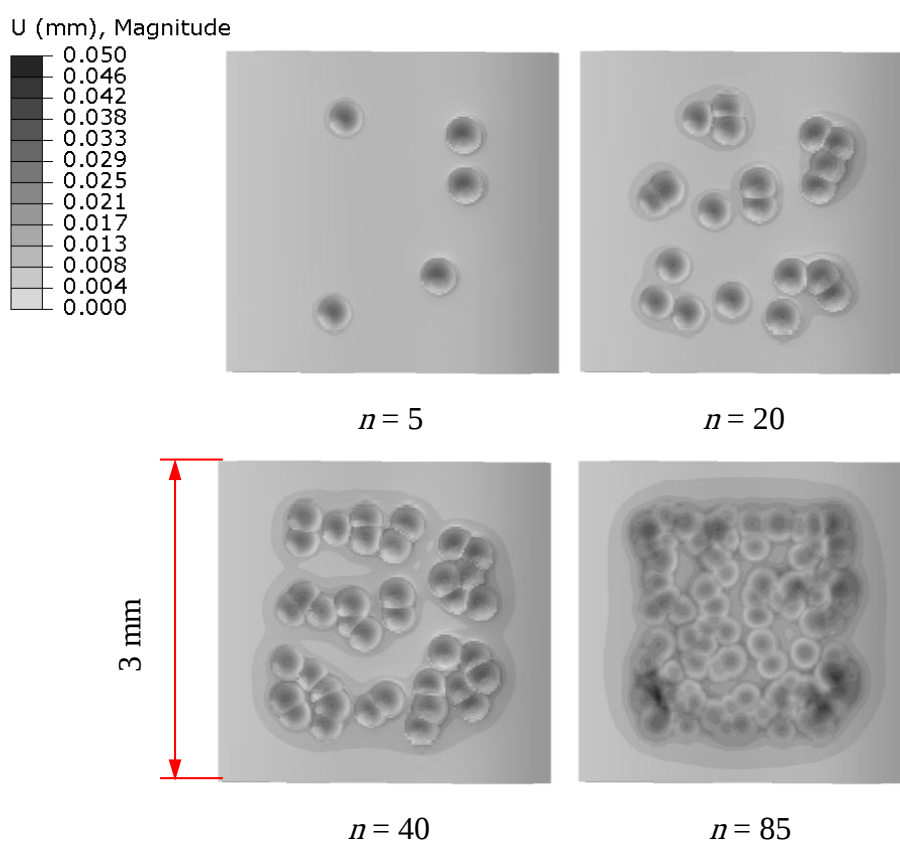
شکل (۳-۱۴) اثر جابه‌جایی راهنمای متحرک روی گام فنر

۳-۳ شبیه‌سازی ساچمه‌زنی

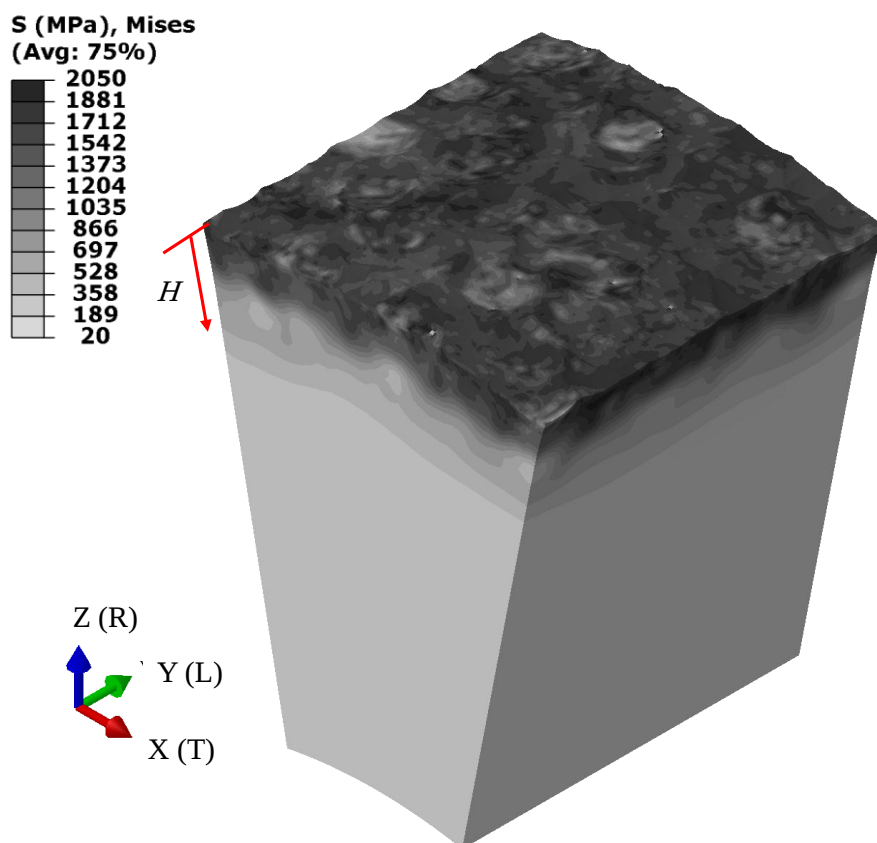
۳-۳-۱ ساچمه صلب

شکل (۳-۱۵) نشان دهنده‌ی اثر ایجاد شده بر روی سطح به ازای تعداد برخوردهای مختلف می‌باشد. بیشینه‌ی عمق فرورفتگی ایجاد شده روی سطح در اثر برخورد، حدود $30\text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با تعداد برخورد ۸۵ گلوله، سطح به طور تقریبی به پوشش برخورد 100% می‌رسد. تنش ایجاد شده در ناحیه برخورد بر اساس معیار ون میزز پس از برخورد ۱۵۰ ساچمه که دارای سرعت اولیه $V = 75\text{ m/s}$ می‌باشند، در شکل (۳-۱۶) مشاهده می‌شود. همانگونه که از شکل مشخص است، توزیع تنش در ناحیه‌ی برخورد، یکنواخت نیست. بنابراین برای به دست آوردن مقدار متوسط تنش ایجاد شده در فاصله‌های مختلف از سطح نمونه در ناحیه‌ی برخورد، باید تنش میانگین از همه‌ی المان‌هایی که در یک لایه با عمق یکسان قرار دارند، محاسبه شود. با توجه به وجود ۲۴ لایه المان در راستای ضخامت و ۱۰۱۰۰ المان در هر لایه، این کار با نوشتن یک برنامه متلب و به‌کارگیری آن انجام

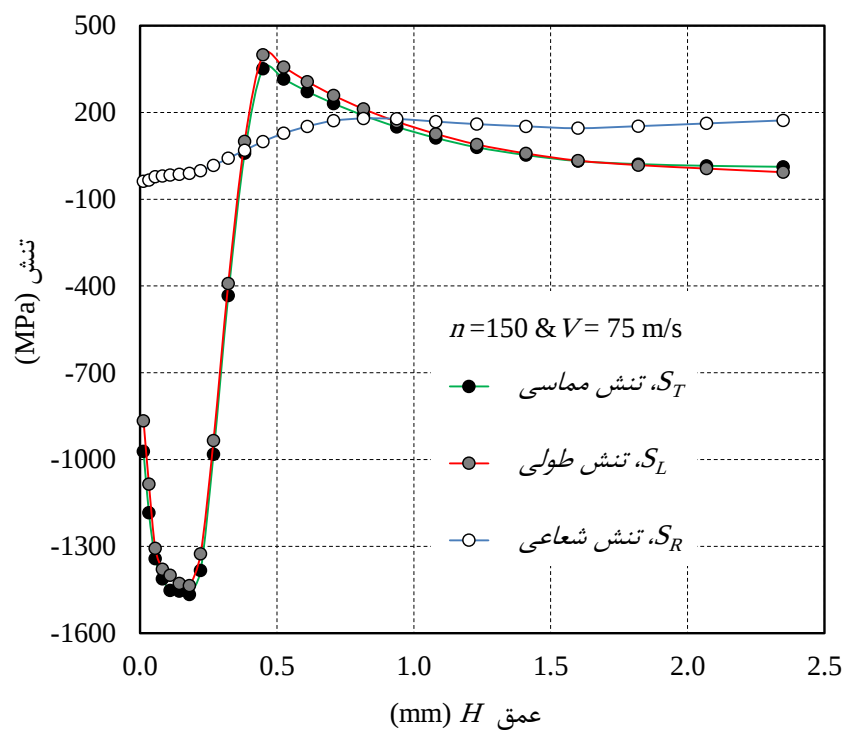
شد. با توجه به دستگاه مختصات استوانه‌ای تعریف شده، مولفه‌های تنش مورد نظر در دو راستای مماسی (S_T) و طولی (S_L) می‌باشند و برنامه متلب، میانگین هر کدام از این تنش‌ها را محاسبه می‌کند. مقایسه‌ی نمودارهای به دست آمده برای میانگین هر کدام از این مولفه‌ها نشان دهنده‌ی اختلاف ناچیز آنها می‌باشد (شکل (۳-۱۷)). همچنین مقدار مولفه تنش در راستای شعاعی (S_R) نسبت به دو مولفه‌ی دیگر کم و قابل چشم‌پوشی است.



شکل (۳-۱۵) تغییر شکل سطح پس از تعداد برخوردهای مختلف



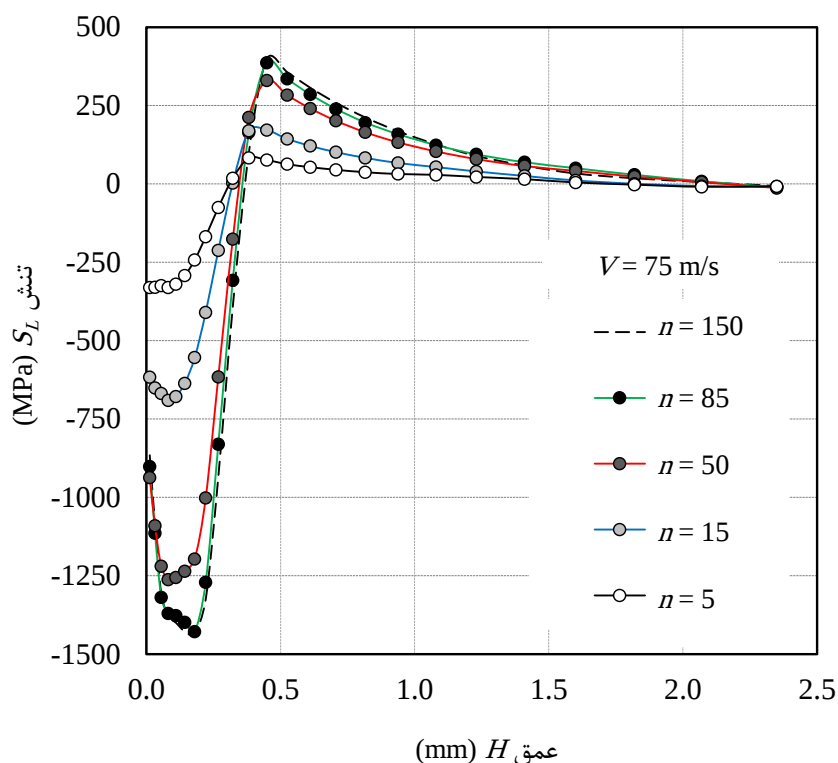
شکل (۳-۱۶) توزیع تنش پسماند پس از برخورد تصادفی ۱۵۰ ساچمه با سرعت اولیه $V = 75 \text{ m/s}$



شکل (۳-۱۷) مولفه‌های تنش پسماند ایجاد شده

۳-۱-۳-۱ اثر تعداد برخورد

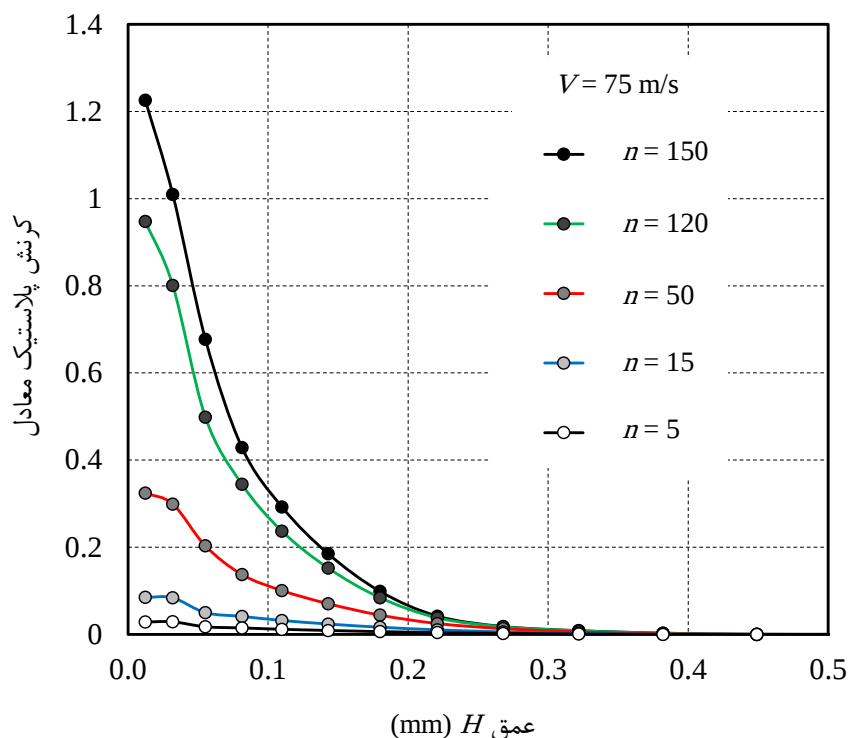
شکل (۳-۱۸)، تغییرات میانگین S_L را در راستای شعاعی نمایش می‌دهد. تنش، پس از برخورد تعداد مشخصی ساچمه و میرا شدن ارتعاشات، اندازه‌گیری شده است. با افزایش تعداد برخورد، تنش در لایه‌ی سطحی، فشاری می‌شود. آزمایش‌های انجام شده در [۴۵] نیز نشان داد که با افزایش تعداد برخوردها در نزدیکی محل اثر اولین برخورد، تنش کششی در لایه‌ی سطحی به فشاری تبدیل می‌شود. با افزایش تعداد برخوردها اگرچه لایه‌ی سطحی دچار تغییر شکل موضعی می‌شود، اما انرژی کرنشی (الاستیک) در ماده اشباع می‌شود و توزیع تنش، تغییر قابل توجهی نمی‌کند. در شکل (۳-۱۸)، مشاهده می‌شود که توزیع تنش پس از برخورد ۸۵ ساچمه، تغییر چندانی ندارد. تنش فشاری ایجاد شده، در فاصله‌ای حدود 0.2 mm از سطح به بیشترین مقدار خود می‌رسد.



شکل (۳-۱۸) تغییرات تنش پسماند با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های صلب

تغییرات کرنش پلاستیک معادل در راستای ضخامت در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است. این مقادیر، از میانگین‌گیری در هر لایه، با برنامه متلب نوشته شده که برای تنش‌ها استفاده شد، به دست آمده

است. همانطور که از شکل مشخص است، پس از ۱۵۰ برخورد، مقدار کرنش معادل به بیش از ۱/۲ می‌رسد. تغییر شکل پلاستیک محدود به لایه‌ی سطحی با ضخامت حدود ۰/۳ mm می‌باشد.

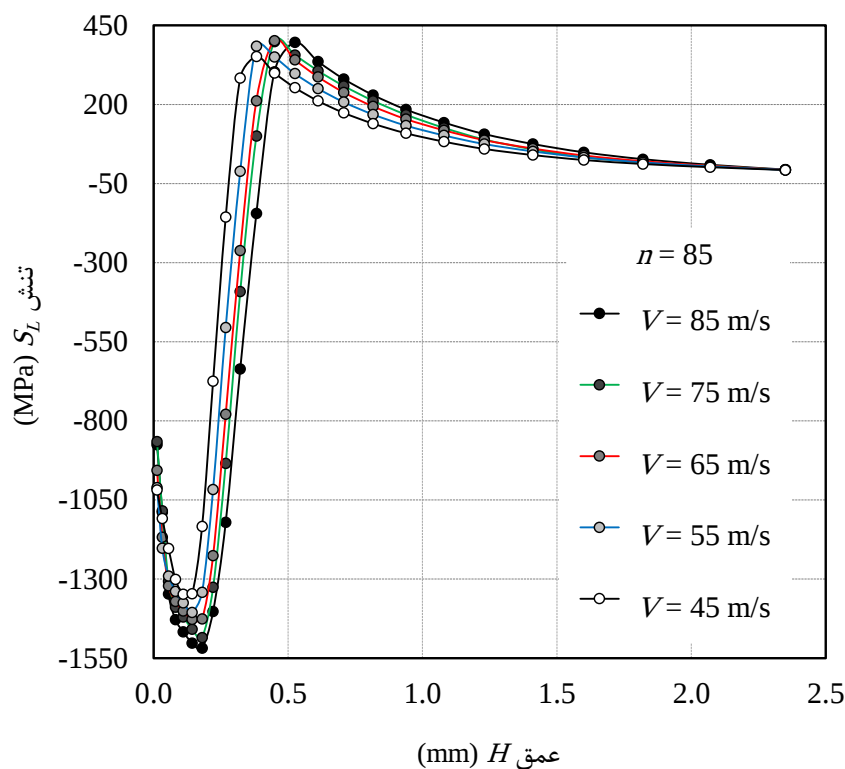


شکل (۳-۱۹) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های صلب

۳-۱-۳-۱ اثر سرعت برخورد

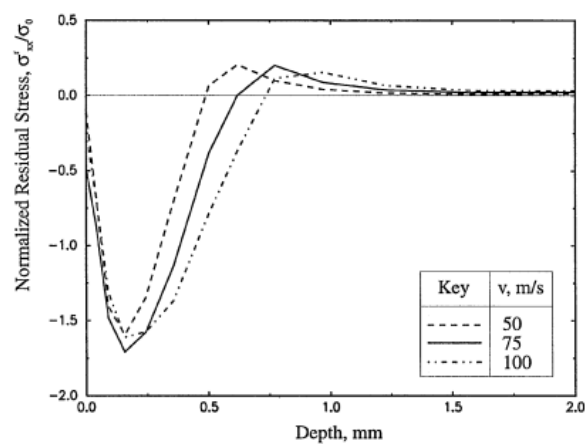
شکل (۳-۲۰) نمودار توزیع تنش پسماند را به ازای سرعت‌های مختلف برخورد نشان می‌دهد. این نمودار نشان‌گر آن است که با افزایش سرعت گلوله، سطح تنش‌های ایجاد شده در ماده افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش سرعت گلوله، پهنای پروفیل تنش بیشتر شده است. این بدان معنا است که ضخامت بیشتری از ماده تحت تاثیر ضربه‌ی ساچمه قرار گرفته است. بررسی سایر پژوهش‌گران همچون مگوید و همکاران [۳۰] و همچنین هنگ و همکاران [۳۳] که در شکل (۳-۲۱) آمده نیز، نتایج به دست آمده را تایید می‌کند. قابل ذکر است، همان‌گونه که در شکل (۳-۲۲)، که بررسی اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند در آلیاژ آلومینیوم را توسط لاسپالاس و همکاران [۴۲] نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود

که تاثیرپذیری تنش پسماند ایجاد شده به ازای سرعت‌های مختلف در مواد فولادی نسبت به موادی از قبیل آلیاژهای آلومینیوم کمتر می‌باشد.

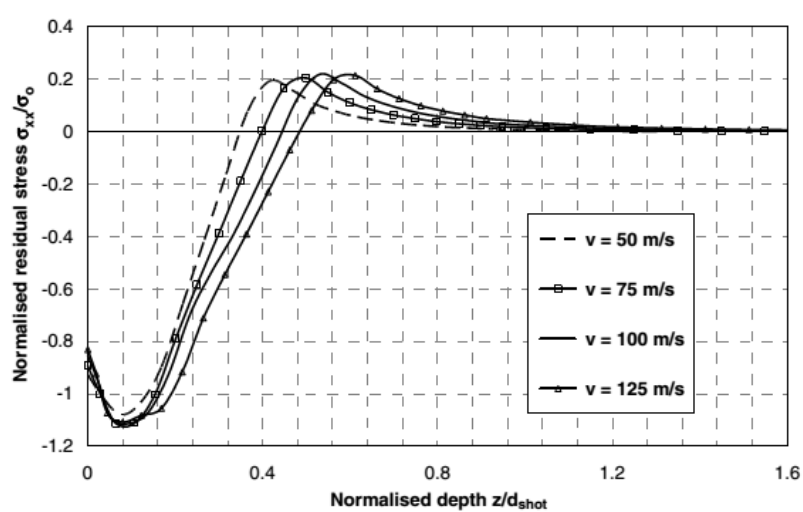


شکل (۳-۲۰) تغییرات تنش پسماند با افزایش سرعت برخورد ساچمه‌های صلب

نمودار تغییرات کرنش پلاستیک معادل در راستای ضخامت به ازای سرعت‌های برخورد مختلف در شکل (۳-۲۳) آمده است. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش سرعت برخورد، کرنش پلاستیک نیز افزایش می‌یابد اما عمق لایه‌ی سطحی که دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود، تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. در سرعت‌های بالا، بیشترین مقدار کرنش پلاستیک معادل مربوط به اولین لایه‌ی روی سطح می‌باشد؛ در حالی‌که در سرعت‌های پایین‌تر، بیشترین کرنش پلاستیک معادل در لایه‌ی زیرین قرار دارد.

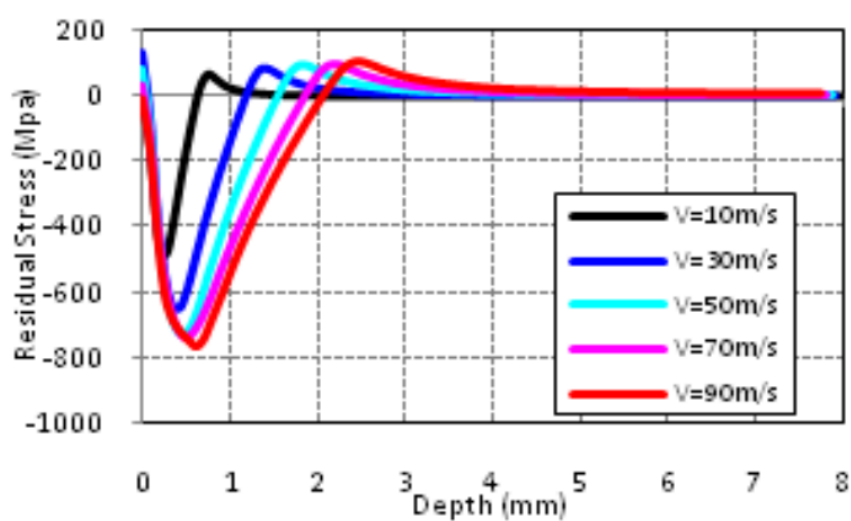


(الف)

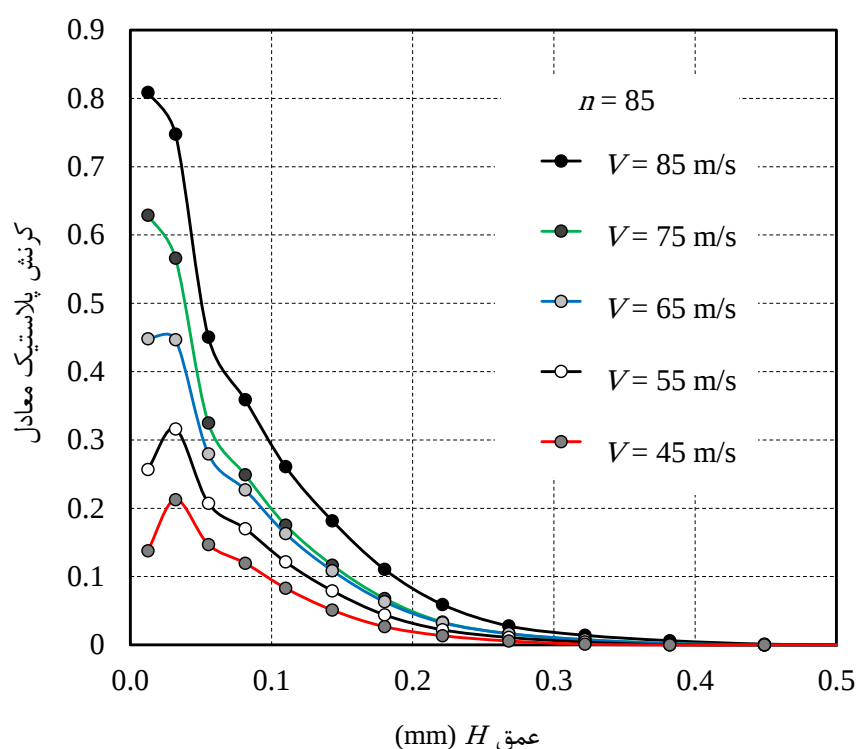


(ب)

شکل (۳-۲۱) اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند (الف) مگوید و همکاران [۳۰]، (ب) هنگ و همکاران [۳۳]



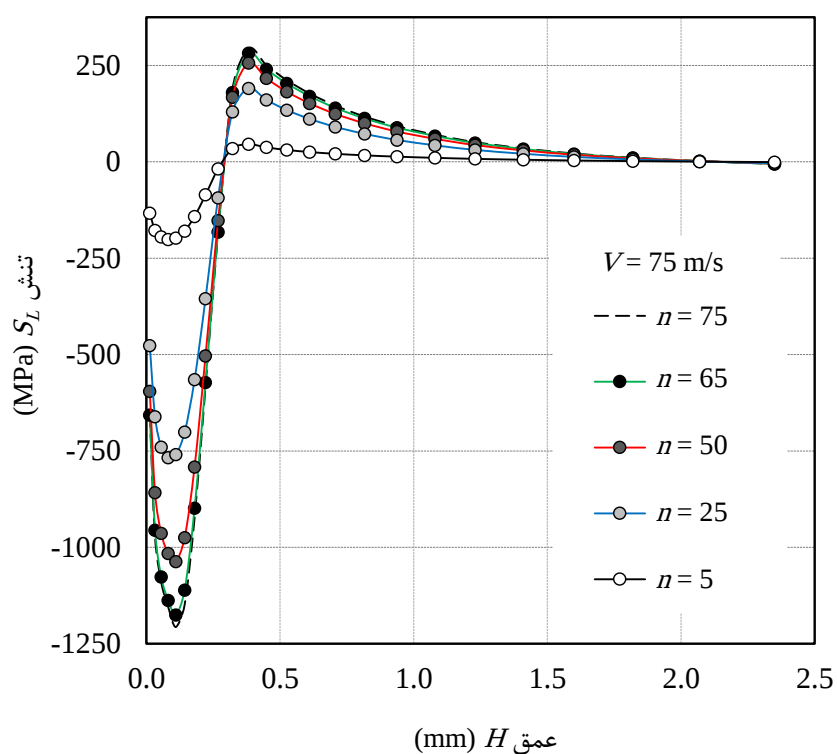
شکل (۳-۲۲) اثر سرعت برخورد روی تنش پسماند در آلیاژ آلومینیوم [۴۲]



شکل (۲۳-۳) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش سرعت برخورد ساچمه‌های صلب

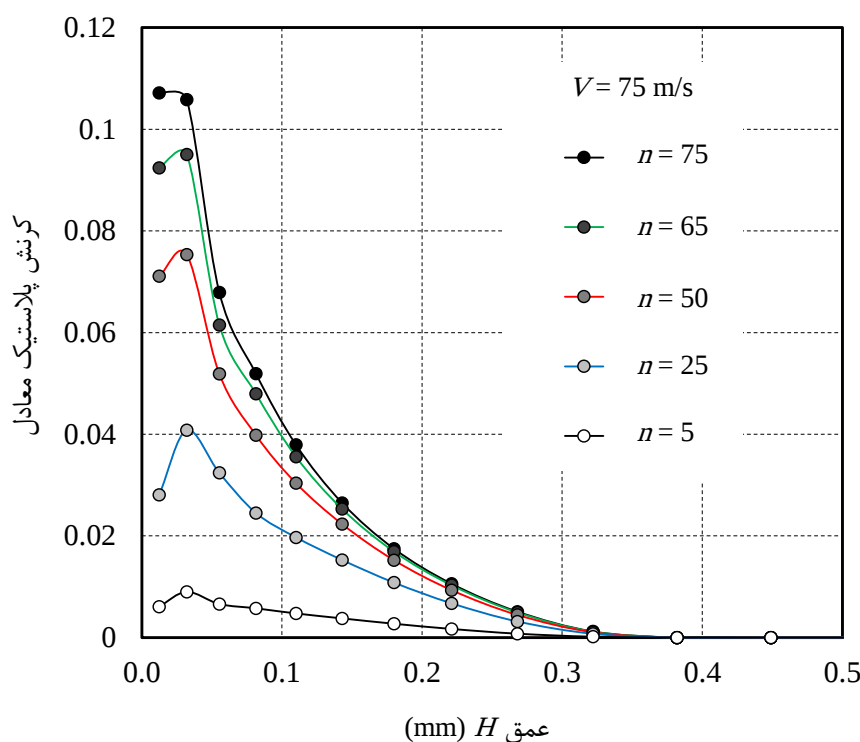
۳-۳-۲ ساچمه تغییر شکل پذیر

شکل (۲۴-۳) تغییرات میانگین S_L را در راستای ضخامت قطاع در حالتی که ساچمه‌ها تغییر شکل پذیر و برخوردها عمودی هستند، نمایش می‌دهد. در مقایسه با نتایج به دست آمده از تحلیل با ساچمه‌های صلب، مقدار بیشترین تنش حدود ۱۵ درصد کاهش یافته و به ۱۲۰۰ MPa رسیده است. همچنین عمق بیشترین تنش اندکی کمتر شده است.



شکل (۳-۲۴) تغییرات تنش پسماند با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های تغییر شکل پذیر

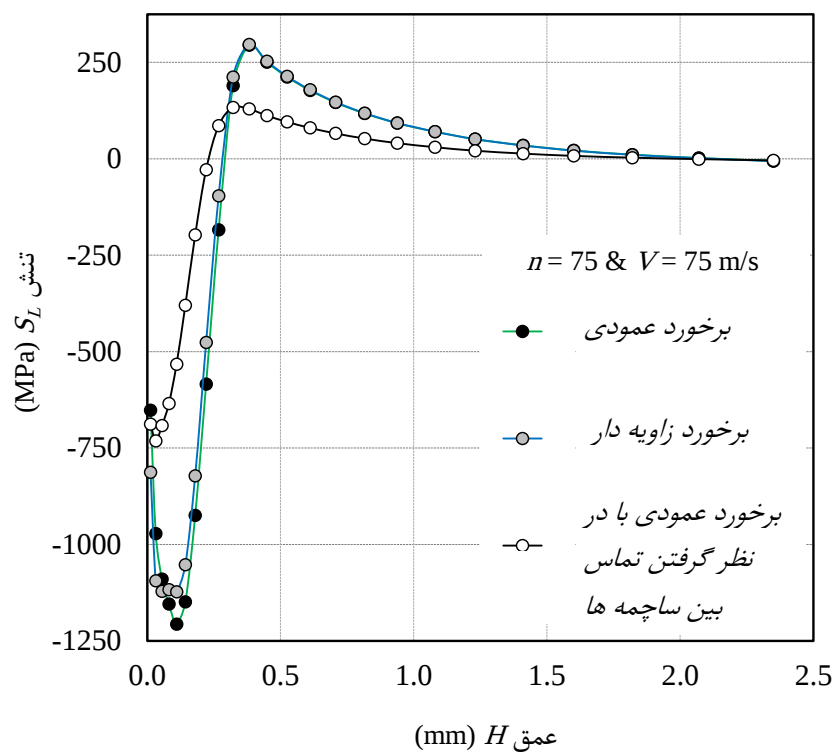
میزان کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده در این حالت نیز در مقایسه با برخورد با ساچمه‌های صلب کمتر می‌باشد (شکل (۳-۲۵)). بیشترین کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده در حالت قبل، پس از ۵۰ برخورد، حدود ۰/۳۵ و در این تحلیل کمتر ۰/۰۸ می‌باشد که نشان دهنده‌ی کاهش ۷۷ درصدی می‌باشد. تفاوت قابل ذکر دیگر اینست که در تحلیل با ساچمه‌های تغییر شکل پذیر، بیشترین میزان کرنش پلاستیک، مربوط به لایه سطحی نبوده و در لایه‌ی زیرین اتفاق می‌افتد. مشابه این حالت در تحلیل با ساچمه‌های صلب و در سرعت‌های برخورد پایین‌تر نیز رخ داد.



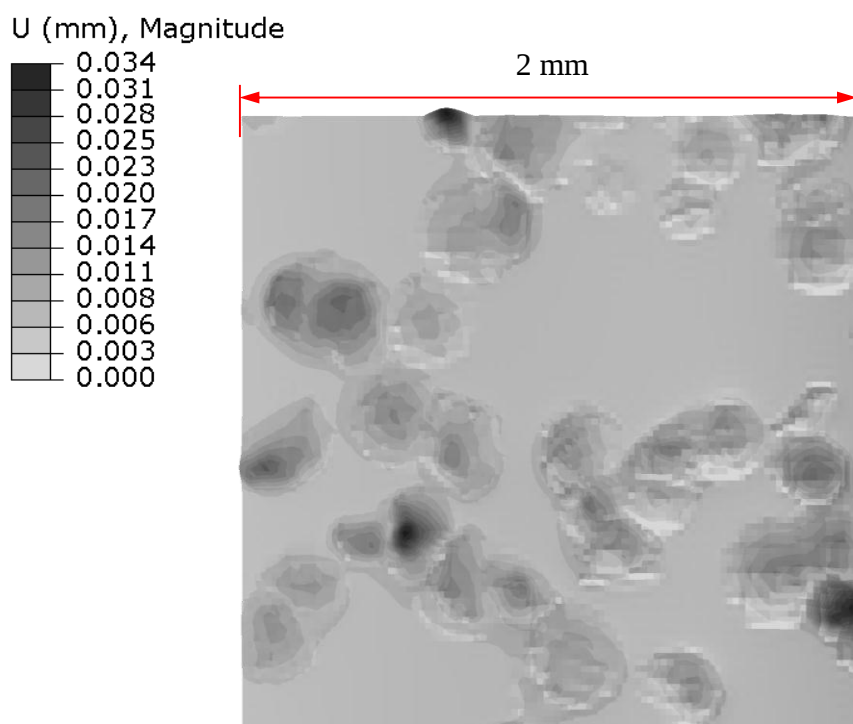
شکل (۳-۲۵) تغییرات کرنش پلاستیک معادل با افزایش تعداد برخورد ساچمه‌های تغییر شکل پذیر

تغییرات میانگین S_L را در راستای ضخامت قطاع در سه حالت برخورد عمودی، برخورد زاویه‌دار و برخورد عمودی با در نظر گرفتن تماس بین ساچمه‌ها در شکل (۳-۲۶) مشاهده می‌شود. بیشینه‌ی تنش در حالت برخورد عمودی 1200 MPa و در برخورد زاویه‌دار 1120 MPa می‌باشد. پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی برخورد زاویه‌دار مانند کیم و همکاران [۳۸] نشان می‌دهد که با افزایش زاویه برخورد و نزدیک شدن به حالت برخورد عمودی، تنش پسماند افزایش می‌یابد. با توجه به زاویه‌ی برخورد، اختلاف تنش ایجاد شده با برخورد عمودی قابل توجه است. برای مثال در [۳۸]، در برخورد با زاویه 60° ، اختلاف بیشینه‌ی تنش پسماند ایجاد شده با برخورد عمودی حدود 25% درصد می‌باشد. اما در تحلیل انجام شده در این پژوهش، این اختلاف کم و در حدود 7% درصد می‌باشد. علت این اختلاف اینست که، در اکثر کارهای انجام شده، زاویه برخورد برای همه ساچمه‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود؛ ولی در این پژوهش، زاویه برخوردها از 45° تا 90° درجه (برخورد عمودی) متغیر می‌باشد، یعنی حتی برخی از برخوردها عمودی هستند، که به واقعیت نیز نزدیک‌تر است. در حالتی که تماس بین ساچمه‌ها

وجود دارد، تنش پسماند ایجاد شده خیلی کمتر است. علت این امر اینست که ساچمه‌هایی که در ابتدا برخورد کرده‌اند، مانعی برای برخورد ساچمه‌های دیگر با سرعت اولیه‌ی خودشان هستند و بخش قابل توجهی از انرژی برخوردها که در حالت‌های قبلی به نمونه می‌رسید، با برخورد ساچمه‌ها با یکدیگر از بین می‌رود. به همین دلیل می‌توان گفت، برخورد کمتری صورت می‌گیرد. در این حالت، همانطور که از شکل (۳-۲۷) مشخص است، با اینکه تحلیل با ۷۵ ساچمه انجام شده است، اما پوشش برخورد نسبت به تحلیل‌های قبلی بسیار کمتر می‌باشد.

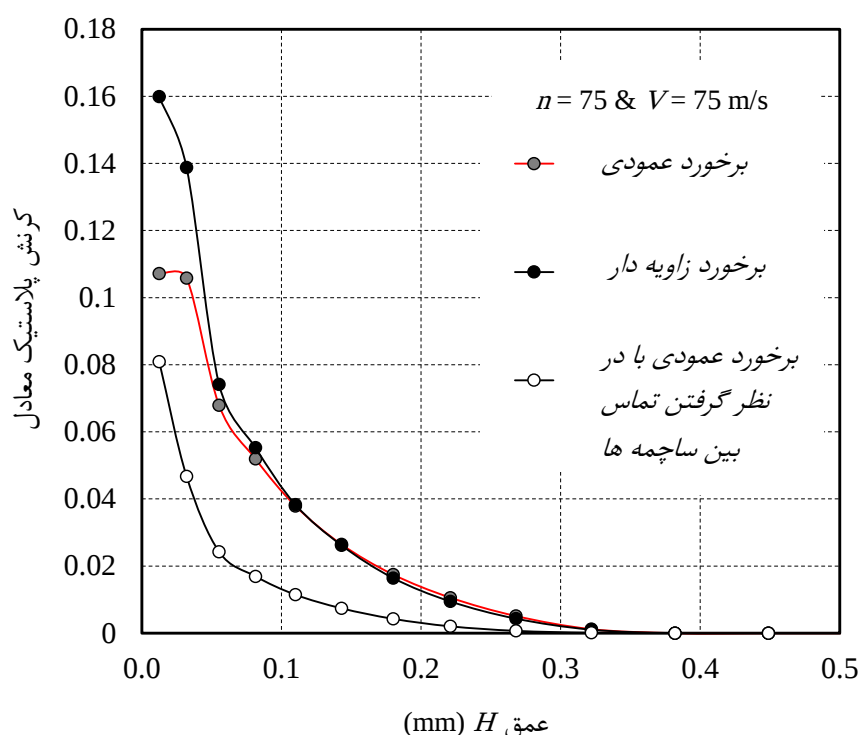


شکل (۳-۲۶) مقایسه تنش پسماند در سه حالت تحلیل با ساچمه تغییرشکل پذیر



شکل (۳-۲۷) تغییر شکل سطح پس از برخورد ۷۵ ساچمه در حالتی که تماس بین ساچمه‌ها وجود دارد.

مقایسه بین کرنش پلاستیک معادل ایجاد شده برای این سه حالت برخورد نیز در شکل (۳-۲۸) آمده است. میزان کرنش پلاستیک معادل برای دو حالت برخورد عمودی و زاویه‌دار در ضخامت ۰/۰۵ mm از روی سطح متفاوت است و از آنجا به بعد به طور تقریبی یکسان می‌باشد. در لایه‌های سطحی، کرنش پلاستیک بیشتری در حالت برخورد زاویه‌دار ایجاد می‌شود که می‌توان آن را به همین زاویه‌دار بودن برخوردها نسبت داد، برخورد زاویه‌دار در مقایسه با برخورد عمودی، لایه‌ی سطحی را دچار تغییر شکل بیشتری می‌کند. در حالتی که تماس بین ساچمه‌ها وجود دارد، به همان دلایل ذکر شده در مورد تنش پسماند ایجاد شده و برخورد کمتر ساچمه‌ها با سطح، کرنش پلاستیک معادل نسبت به سایر تحلیل‌ها کمتر است.

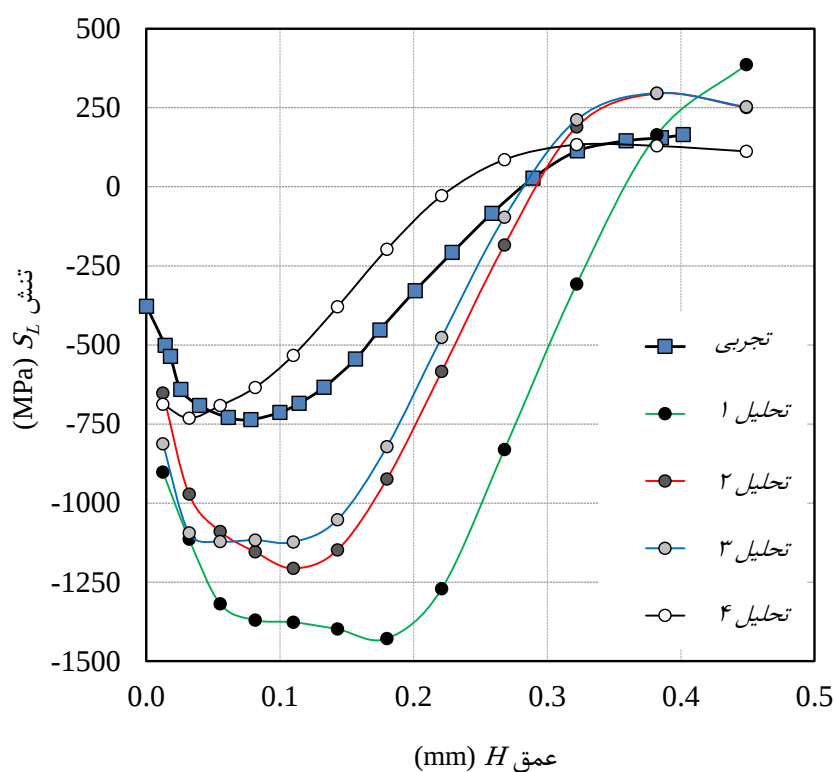


شکل (۳-۲۸) مقایسه کرنش پلاستیک معادل در سه حالت تحلیل با ساچمه تغییرشکل پذیر

۳-۳-۳ مقایسه با نتایج تجربی

در این بخش نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از اشعه X را، که مربوط به شرکت فنرلول است، با نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف مقایسه می‌کنیم (شکل (۳-۲۹)). در نتایج تجربی مذکور، تنش پسماند تا عمق 0.4 mm اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که در این نتایج، میزان پوشش برخورد در نمونه مشخص نیست و به احتمال زیاد خیلی کمتر از ۱۰۰ درصد باشد. تحلیل ۱ که در شکل (۳-۲۹) آمده است بیانگر تحلیل با ساچمه صلب و تحلیل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب معرف تحلیل با ساچمه تغییر شکل پذیر با برخورد عمودی، برخورد زاویه‌دار و برخورد عمودی با در نظر گرفتن تماس بین ساچمه‌ها می‌باشد. تحلیل ۱ بیشترین اختلاف را با نتایج تجربی دارد. در نظر گرفتن ساچمه‌ها به عنوان یک جسم صلب، در این مورد فرض مناسبی نیست. چرا که ماده مفتول فنر از فولاد پر استحکام با تنش تسلیم بسیار بالایی می‌باشد و در عمل جنس ساچمه‌ها از جنس فنر ضعیف‌تر می‌باشد. اما در تحلیل ۱، به علت در نظر گرفتن ساچمه‌ها به عنوان جسم صلب، استحکام ساچمه‌ها بیشتر از ماده‌ی

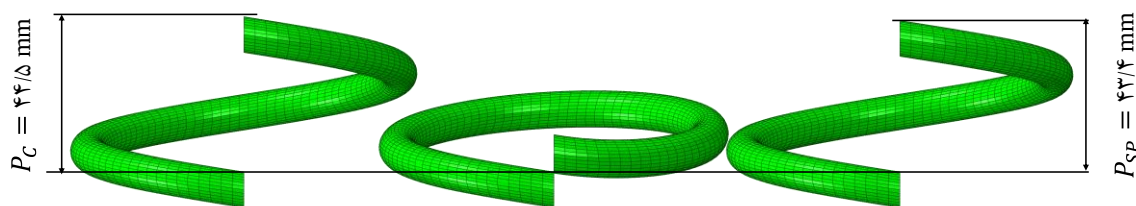
فتر فرض شده و تنش بیشتری نسبت به حالت واقعی در سطح فتر ایجاد می‌شود. نتایج تحلیل‌های ۲ و ۳ به نتایج تجربی نزدیک‌تر هستند اما باز هم اختلاف قابل توجهی بین آنها دیده می‌شود. مهمترین دلیل این اختلاف اینست که در شبیه‌سازی عددی، پوشش برخورد سطح کامل و نزدیک به ۱۰۰ درصد است اما در نمونه تجربی اینطور نیست و به همین دلیل تنش در نمونه تجربی کمتر است. علت دیگر سرعت برخوردهاست، که در شبیه‌سازی، تمام برخوردها با همان سرعت اولیه خود به سطح برخورد می‌کنند اما در واقعیت، به دلیل برخورد ساچمه‌ها با یکدیگر از سرعت آنها کاسته می‌شود و همین امر باعث ایجاد تنش کمتری در نمونه می‌شود. تحلیل ۴ تطابق مناسبی با نتایج تجربی دارد، اما همانطور که ذکر شد پوشش برخورد در این تحلیل خیلی کمتر از ۱۰۰ درصد می‌باشد؛ البته از این حیث نیز با نمونه تجربی همخوانی دارد اما در صورت اطلاع از میزان پوشش برخورد در نمونه تجربی، مقایسه دقیق‌تری می‌توان انجام داد.



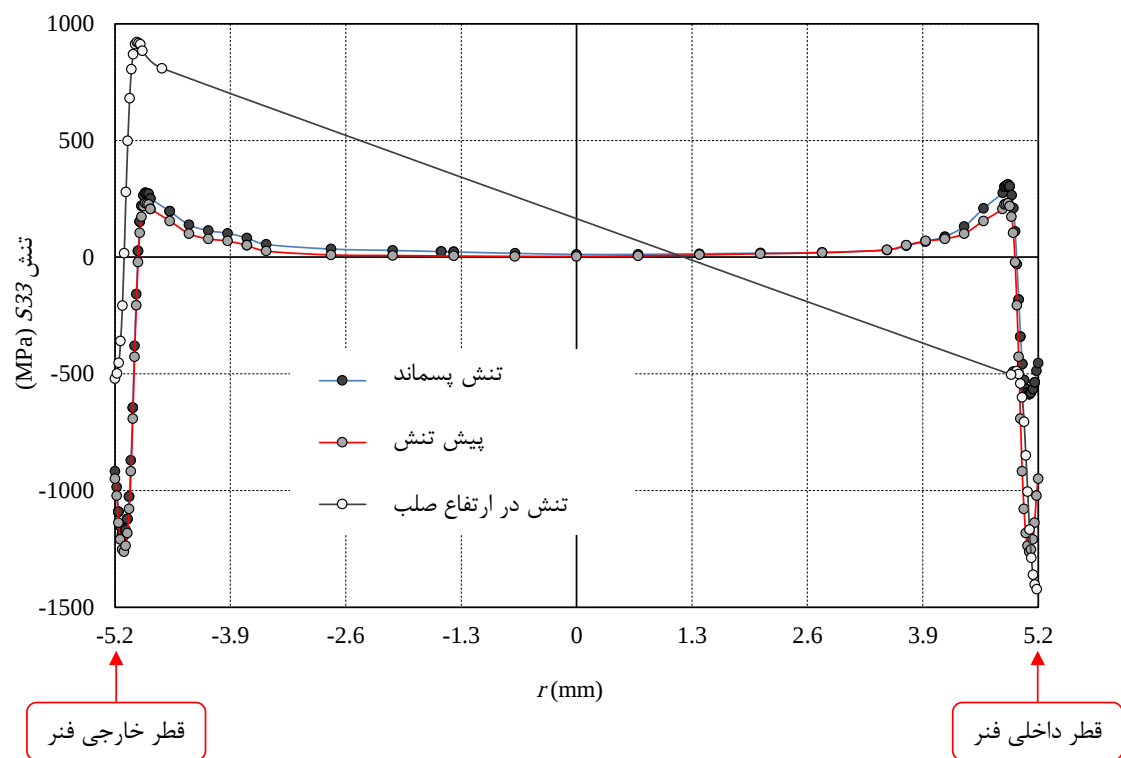
شکل (۳-۲۹) مقایسه تنش پسماند به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی

۳-۴ شبیه‌سازی پیش تنظیم

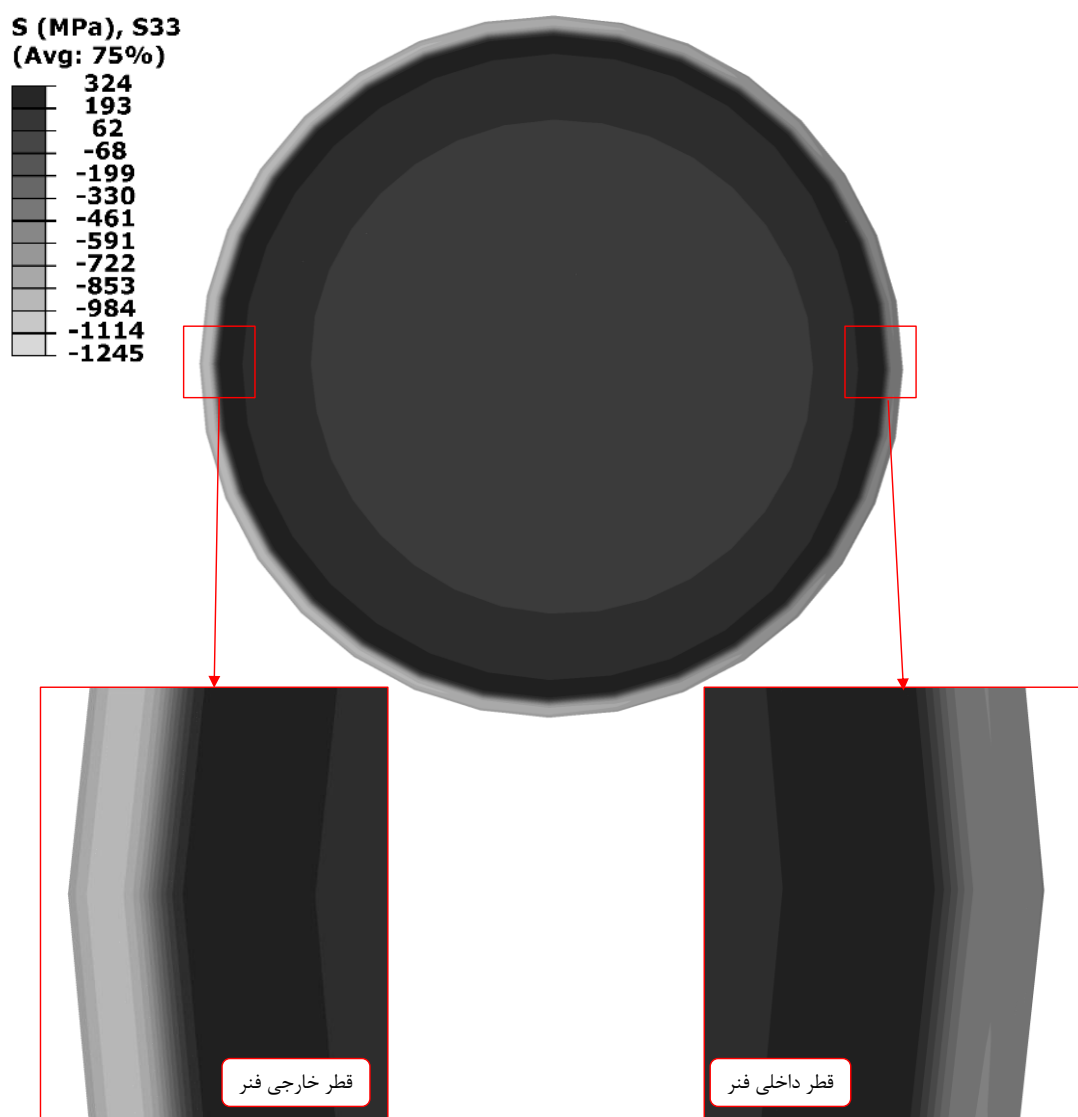
شکل (۳-۳۰) نتیجه‌ی شبیه‌سازی فرایند پیش تنظیم را نشان می‌دهد. همانطور که در فصل پیشین در قسمت معرفی نمونه‌ی صنعتی اشاره شد، گام فنر، پس از شکل‌دهی $P_C = 44/5 \text{ mm}$ است که پس از فرایند پیش تنظیم به $P_P = 43/5 \text{ mm}$ کاهش می‌یابد. در شبیه‌سازی، گام فنر به میزان $1/1 \text{ mm}$ کاهش یافته و به مقدار جدید $P_{SC} = 43/4 \text{ mm}$ می‌رسد که بیانگر اختلافی کمتر از ۱ درصد با مقادیر واقعی می‌باشد. پیش تنش، تنش در هنگامی که فنر فشرده شده و در ارتفاع صلب قرار دارد و همچنین تنش پسماند پس از پیش تنظیم، در مقطع فنر، در شکل (۳-۳۱) نشان داده شده است. سمت چپ نمودار، مربوط به قسمت بیرونی و سمت راست نمودار، مربوط به قسمت داخلی فنر است. همانگونه که انتظار می‌رود، هنگامی که فنر فشرده می‌شود، قسمت بیرونی تحت تنش کششی و ناحیه داخلی تحت تنش فشاری می‌باشد [۱۵]. پس از پایان فرایند و آزاد شدن فنر، تنش در قسمت بیرونی تا حد زیادی شبیه به پیش تنش اعمالی بوده ولی در قسمت داخلی، تنش فشاری کمتر شده و از نظر مقدار، به نصف میزان پیش تنش می‌رسد. شکل (۳-۳۲) تنش در مقطع فنر پس از پایان فرایند را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳۰) کاهش طول پس از پیش تنظیم

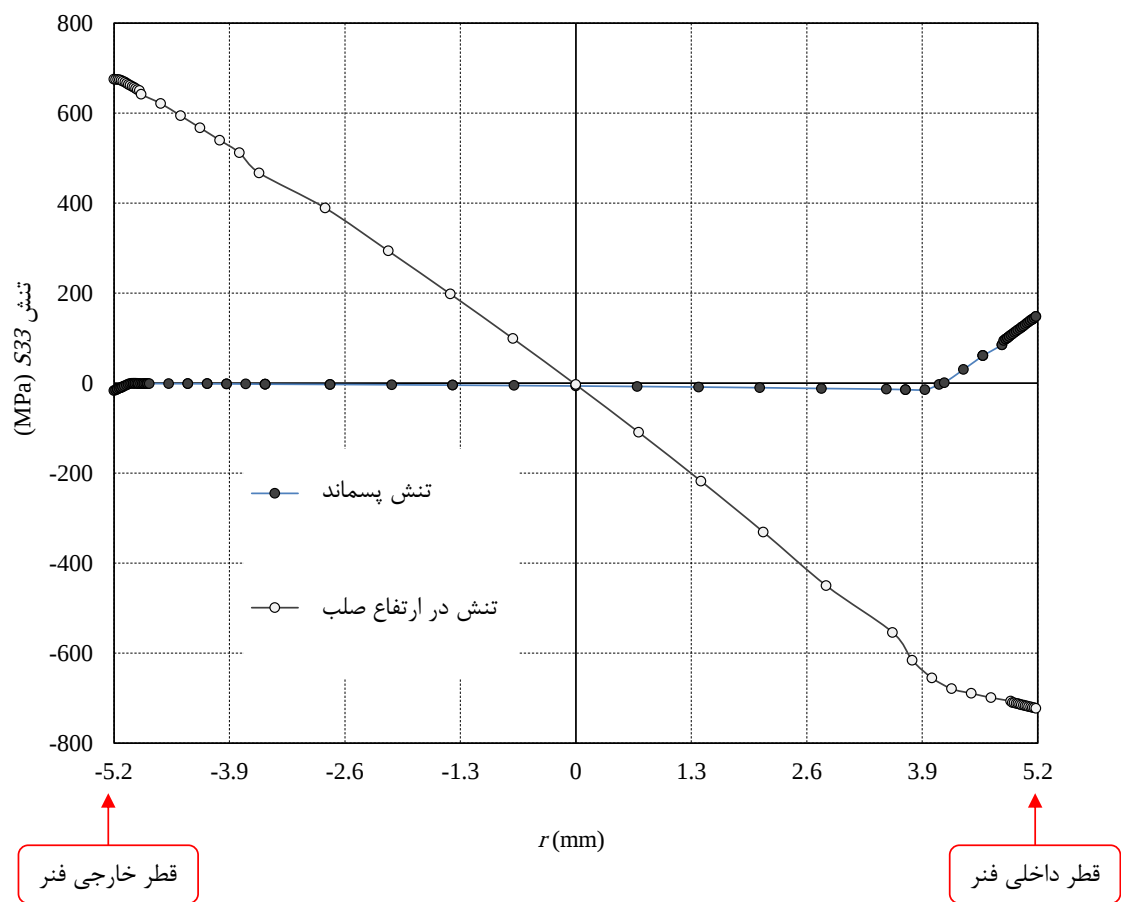


شکل (۳-۳۱) تنش محوری در پیش تنظیم



شکل (۳-۳۲) تنش پسماند محوری در مقطع فنر پس از پیش‌تنظیم

در تحلیل پیش‌تنظیم بدون اعمال پیش‌تنش، کاهش طول برای یک حلقه پس از فرایند ۰/۶ mm اندازه‌گیری شد که تنها کمی بیش از نصف کاهش طول در تحلیل قبلی (با اعمال پیش‌تنش) می‌باشد. دلیل این اختلاف این است که در تحلیل قبلی به دلیل وجود تنش در ابتدای فرایند، قسمت بیشتری از فنر به ناحیه پلاستیک می‌رسد و تغییر شکل ماندگار آن نیز بیشتر خواهد بود. تنش در ارتفاع صلب و تنش پس از فرایند در شکل (۳-۳۳) آمده است.



شکل (۳-۳۳) تنش در پیش‌تنظیم (بدون پیش‌تنش)

فصل ۴ جمع‌بندی و پیشنهادها

۴-۱ نتیجه‌گیری

- ۱- در شکل‌دهی فنر، بیشترین میزان تنش هنگامی ایجاد می‌شود که اولین بخش شکل‌دهی توسط قطعه فرم دهنده انجام می‌شود و بیشترین احتمال شکست فنر نیز در همین ناحیه است.
- ۲- در حین شکل‌دهی، تنش معادل و محوری در قطر خارجی و داخلی مقطع بیشترین مقدار را دارند در حالیکه در میانه مقطع تنش بسیار کم است؛ ولی پس از پایان شکل‌دهی تنش معادل در میانه مقطع، بیشتر از سایر نواحی است. البته قسمت‌های بیرونی و داخلی نیز مقدار تنش بالاست اما تنش در نواحی که بین میانه مقطع و قسمت‌های خارجی آن (در فاصله‌ی نصف شعاع مفتول فنر از مرکز) قرار دارد، مقدار خیلی کمی دارد. همچنین پروفیل تنش پسماند محوری، شبیه به الگوی کلاسیک زیگ زاگ مورد انتظار برای یک میله می‌باشد که تحت خمش قرار گرفته، به تسلیم رسیده و سپس رها شده است.
- ۳- نیروی لازم برای تغذیه‌ی مفتول فنر در حدود ۸ kN به دست آمد.
- ۴- با افزایش ضریب اصطکاک، کرنش پلاستیک معادل و نیز بیشینه‌ی تنش معادل افزایش می‌یابد. دامنه‌ی این افزایش (که در مجموع تقریباً ناچیز است)، در ضرایب اصطکاک بالاتر، بیشتر است.
- ۵- کرنش پلاستیک معادل با افزایش سرعت تغذیه مفتول زیاد می‌شود. رابطه این دو پارامتر تقریباً خطی می‌باشد.
- ۶- همانطور که انتظار می‌رود، نرخ کرنش با افزایش سرعت تغذیه مفتول بیشتر می‌شود. در سرعت‌های پایین‌تر، افزایش بیشتری مشاهده می‌شود.
- ۷- عمق فرورفتگی ایجاد شده در ساچمه‌زنی با گلوله‌های صلب در حدود $30\text{ }\mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد.
- ۸- در ساچمه‌زنی، اگر چه با افزایش برخوردها لایه‌ی سطحی دچار تغییر شکل موضعی می‌شود، اما پس از تعداد برخورد مشخصی، انرژی کرنشی (الاستیک) اشباع شده و توزیع تنش، تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

- ۹- تنش فشاری ایجاد شده در اثر ساچمه‌زنی در فاصله‌ای در حدود 0.2 mm از سطح به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین تغییر شکل پلاستیک، محدود به لایه‌ی سطحی با ضخامت حدود 0.3 mm می‌باشد.
- ۱۰- در ساچمه‌زنی با گلوله‌های تغییر شکل پذیر در مقایسه با گلوله‌های صلب، تنش در حدود ۱۵ درصد و کرنش پلاستیک معادل در حدود ۷۰ درصد کاهش داشته است.
- ۱۱- در صورتی که برخوردها با زاویه باشند، نسبت به برخوردهای عمودی، تنش کمتری روی نمونه ایجاد می‌شود.
- ۱۲- برخورد با گلوله‌های تغییر شکل پذیر و در حالتی که تماس بین آنها در نظر گرفته شد، بهترین هم‌خوانی را با نتایج تجربی داشت.
- ۱۳- مقدار تنش پس از پیش‌تنظیم، در قطر بیرونی فنر، نسبت به پیش‌تنش اعمالی تغییر چندانی نمی‌کند؛ حال آنکه مقدار آن در قطر داخلی به طور قابل توجهی کم می‌شود.

۲-۴ پیشنهادها

در ادامه، پیشنهادهایی برای انجام مطالعه در آینده ارائه می‌گردد:

فرایند شکل‌دهی و پیش‌تنظیم در حالت سرد شبیه‌سازی شده است. بررسی این فرایندها در دمای بالا و مقایسه آن با نتایج پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود.

در شبیه‌سازی شکل‌دهی فنر، قطعات دستگاه به صورت صلب مدل شده است. در صورت امکان، تغییر شکل و به ویژه سایش قطعات و تاثیر آن روی دقت ابعادی و همچنین عمر این قطعات بررسی شود.

شبیه‌سازی برای هندسه‌های مختلف فنر انجام شود و وابستگی تنش پسماند به هندسه‌ی فنر، جهت بهینه کردن طراحی، مشخص شود.

در این تحقیق فرض شده است که در عملیات حرارتی بعد از فنرپیچی تمام تنش آزاد می‌شود. پیشنهاد می‌شود تنش باقی‌مانده‌ی احتمالی و اثر آن روی فرایندهای بعدی بررسی شود.

در شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، ساچمه‌ها کروی و با قطر و سرعت یکسان فرض شد. پیشنهاد می‌شود جهت نزدیک شدن به واقعیت، ساچمه‌ها مجموعه‌ای از شکل‌ها و اندازه‌های مختلف (در یک محدوده‌ی مشخص) و همچنین سرعت‌های متفاوت در نظر گرفته شود.

پیشنهاد می‌شود در شبیه‌سازی ساچمه‌زنی، اثر فاصله‌ی بین ساچمه‌ها، ناحیه‌ی نماینده و ناحیه‌ی توزیع بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد.

در شبیه‌سازی پیش‌تنظیم، روی خواص مکانیکی مورد استفاده برای ماده و تغییراتی که در اثر انجام فرایندهای قبلی در آن صورت می‌گیرد، مطالعه‌ی بیشتری انجام شود.

مواردی چون ناهمسانگردی و وابستگی ماده به نرخ کرنش در نظر گرفته نشده است که در بررسی‌های آینده می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

منبع‌ها

- [۱]. م. شریعتی، فنرهای لول. تهران: انتشارات آزاده، ۱۳۸۰.
- [2]. G. E. Dieter, Mechanical metallurgy vol. 3: McGraw-Hill New York, 1976.
- [3]. P. Withers and H. Bhadeshia, "Residual stress. Part 1—measurement techniques," Materials Science and Technology, vol. 17, pp. 355-3.۲۰۰۱, ۶۵
- [4]. F. Kandil, D. Lord, A. Fry, and P. Grant, A Review of Residual Stress Measurement Methods: A Guide to Technique Selection: National Physical Laboratory, 2001.
- [5]. N. Rossini, M. Dassisti, K. Benyounis, and A. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components," Materials & Design, vol. 35, pp. 572-588, 2012.
- [6]. .www.residualstress.org .
- [7]. .www.mechanicalspring.com .
- [۸]. م. شریعتی، شناسایی و انتخاب مواد برای فنر: بخشایش، ۱۳۸۰.
- [9]. D. Silberstein, "How to make springs," ed. home.earthlink.net, 2009.
- [۱۰]. ح. غ. افشار، "بررسی پارامترهای موثر در تنش پسماند ایجاد شده از فرآیند فنرپیچی فنرسیستم تعلیق پژو SD206 به کمک روش المان محدود"، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۱.
- [11]. .www.kilensprings.com .
- [12]. .www.digood.com .
- [13]. V. Kobelev, "Elastic-plastic work-hardening deformation under combined bending and torsion and residual stresses in helical springs," International Journal of Material Forming, vol. 3, pp. 869-881, 2010.
- [14]. J. Matejicek, P. C. Brand, A. R. Drews, A. Krause, and C. Lowe-Ma", Residual stresses in cold-coiled helical compression springs for automotive suspensions measured by neutron diffraction," Materials Science and Engineering: A, vol. 367, pp. 306-311, 2/25/ 2004.
- [15]. S. S. Committee, Spring Design Manual: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [16]. .www.wireweb.de .
- [17]. .www.trade.indiamart.com .
- [18]. .www.ctemag.com .
- [19]. .www.tmfshotpeening.com .
- [20]. .www.themetalcasting.com .
- [21]. S. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano, and G. Farrahi, "Finite element simulation of shot peening coverage with the special attention on surface nanocrystallization," Procedia Engineering, vol. 10, pp. 2464-2471, 2011.
- [22]. H. Miao, S. Larose, C. Perron, and M. Lévesque, "On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening," Advances in Engineering Software, vol. 40, pp. 1023-1038, 2009.
- [23]. J. O. Almen and P. H. Black, Residual stresses and fatigue in metals: McGraw-Hill New York, 1963.

- [24]. .www.electronics-inc.com .
- [25]. M. Happ and D. L. Rumpf, "Almen Strip Variability—A Statistical treatment," Proceedings of ICSPPS, pp. 302-311, 1993.
- [26]. shot peening applications, 9 ed.: metal improvement company, 2005.
- [27]. .www.straaltechniek.net .
- [28]. R. Stone, "Processing Effects on Residual Stress".
- [29]. F. Artaraz and S. Sánchez Beitia, "An unsuitable residual stress state in train springs originated by shot peening," International Journal of Fatigue, vol. 13, pp. 165-168, 1991.
- [30]. S. Meguid, G. Shagal, J. Stranart, and J. Daly, "Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses," Finite Elements in Analysis and Design, vol. 31, pp. 179-191, 1999.
- [31]. M. Todinov, "Residual stresses at the surface of automotive suspension springs," Journal of materials science, vol. 35, pp. 3313-3320, 2000.
- [32]. M. L. Aggarwal, V. P. Agrawal, and R. A. Khan, "A stress approach model for predictions of fatigue life by shot peening of EN45A spring steel," International Journal of Fatigue, vol. 28, pp. 1845-1853, 12// 2006.
- [33]. T. Hong, J. Y. Ooi, and B. A. Shaw, "A numerical study of the residual stress pattern from single shot impacting on a metallic component," Advances in Engineering Software, vol. 39, pp. 743-756, 9// 2008.
- [34]. M. Zimmermann, V. Schulze, and J. Hoffmeister, "Finite element modelling of coverage effects during shot peening of IN718: Dedicated to Professor Dr. Hermann Riedel on the occasion of his 65th birthday," International Journal of Materials Research, vol. 101, pp. 951-962, 2010.
- [35]. G. Berti and M. Monti, "FEM analysis of the forming process of automotive suspension springs," Tagungsband- ۱۲ RoundTable-Simulation in der massivumformung, vol. 2010, pp. 73-84, 2010.
- [36]. G. Berti and M. Monti, "Experimental and numerical analysis of the cold forming process of automotive suspension springs," 2011.
- [37]. T. Kim, H. Lee, H. C. Hyun, and S. Jung, "A simple but effective FE model with plastic shot for evaluation of peening residual stress and its experimental validation," Materials Science and Engineering: A, vol. 528, pp. 5945-5954, 2011.
- [38]. T. Kim, H. Lee, H. C. Hyun, and S. Jung, "Effects of Rayleigh damping, friction and rate-dependency on 3D residual stress simulation of angled shot peening," Materials & Design, vol. 46, pp. 26-37, 2013.
- [۳۹]. م. ح. سورگی, "راه اندازی و تهیه دستور العمل کاربردی نرم افزار آباکوس," پایان نامه کارشناسی, دانشگاه فردوسی مشهد, ۱۳۸۴.
- [۴۰]. ب. باقری, م. عباسی, و م. کتابچی, مرجع کاربردی نرم افزار آباکوس, همراه با حل مسائل الاستیسیته و پلاستیسیته: کیان رایانه سبز, ۱۳۹۱.
- [41]. "Abaqus version 6.11 documentation, Abaqus Analysis User's Manual".
- [42]. M. Laspalas, J. Gómez, F. M. de la Escalera, R. Sánchez, and M. Jiménez, "Simulation of Peen Forming Process of Aluminum Aeronautic Panel," presented at the SIMULIA Customer Conference 2011.
- [43]. F. Hochgraf. (2005) High Cycle Fatigue. Nuts & Bolts .

- [44]. W. Hosford and R. Caddell, "Metal Forming: Metallurgy and Mechanics," ed: Cambridge University Press, Cambridge, 2007, p. 199.
- [45]. M. Kobayashi, T. Matsui, and Y. Murakami, "Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening," International Journal of Fatigue, vol. 20, pp. 351-357, 1998.

Abstract

The springs are one of the most important and vital parts of the machine that according to their type of applications, may be under severe static or dynamic loading conditions. Therefore, the design and manufacturing process of them is very critical. Residual stress induced in the manufacturing process of the spring, plays an important role in its performance. Understanding of the effects of manufacturing stages on the residual stress is an essential step towards achieving a satisfying improvement in the design and manufacturing process. Coiling, shot peening and presetting are three main stages of manufacturing process of coil spring. In coiling, straight wire is deformed into a spiral coil. Then it subjected to shot peening which involves impacts of high velocity shots on the material. In the presetting stage, the spring is compressed to solid height and then released. In this study, 3D simulation of above processes were performed to investigate the induced residual stress using the finite element software ABAQUS. Case study is a kind of automotive suspension helical spring produced in Iran Fanarloom Company at ambient temperature. The coiling and shot peening processes simulation were performed by explicit solver and the preset process was simulated using standard solver. In shot peening simulation, a MATLAB code has been generated to produce a random distribution of shots. Two types of rigid and elastic-plastic shots were considered. In the case of elastic-plastic shots, oblique impact and vertical impact with contact between shots were included in the model. In preset simulation, residual stresses induced in shot peening is transferred to one turn of coil spring in the preset model. The dimensions of the spring resulted from analysis were very close to the real case. Distributions of strain, stress at moment of coiling and residual stress after coiling were studied. At the moment of coiling, maximum value of stress was seen in the inner and outer diameters of spring. Residual stress distribution after coiling shows that the stress value is maximal at the center of wire. The feeding force, effects of friction coefficient and feed rate was obtained. By increasing in friction coefficient, maximum value of equivalent plastic strain and stress increased but these effects are not considerable. With increase in the number of impacts, the residual stress increases up to the saturation point. The best correlation to the experimental result was obtained for the elastic-plastic shots contacting each other. Reduction in length of the spring obtained from simulation was close to the real value. Distribution of stress at solid height and residual stress after preset was obtained. In order

to verify the numerical analysis results, comparisons were made with the results available in the literature.

Keyword: Residual stress, Helical coil spring, Coiling, Shot peening, Preset, Finite element method.



Shahrood University
Department of Mechanical Engineering

M.Sc. Thesis
in
Mechanical Engineering

Title

**Investigation on the distribution of residual stress induced in the
manufacturing process of automotive suspension coil spring**

Written by

Hossein Baghizadeh

Supervisor

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

September 2014