

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده‌ی پردیس خوارزمی

مهندسی مکانیک-گرایش ساخت و تولید

عنوان

مطالعه‌ی تجربی و عددی فرآیند تاب‌گیری لوله‌های بدون درز فلزی

نگارش

حمید قندهاری

استاد/اساتید راهنما:

سید هادی قادری

استاد مشاور:

هادی شانظری

بهمن ۱۳۹۴

تعهد نامه

اینجانب حمید قندهاری علویجه دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-ساخت و تولید دانشکده‌ی پردیس خوارزمی دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه‌ی تجربی و عددی فرآیند تاب‌گیری لوله های بدون درز فلزی تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری

متعهد می‌شوم:

- 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 شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» 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 می‌گردد.
- 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 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 نمی‌باشد.

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

چکیده

لوله‌های بدون درز فلزی پس از عملیات نورد و اعمال نیروهای غیر متقارن، دارای تاب می‌شوند. برای مستقیم کردن این مقاطع، یک عملیات تابگیری انجام می‌شود. به دلیل اینکه لوله‌ها معمولاً تاب سه‌بعدی دارند، مستقیم کردن آنها مشکل است. برای همین، باید با دوران لوله حول محور خود و اعمال خمش‌های معکوس شونده مستقیم شوند. معمولاً این فرآیند در دستگاه تابگیری به‌وسیله جفت غلتک‌هایی با پروفیل هایپربولیک انجام می‌شود. با این حال، فرآیند تابگیری لوله‌های جدار نازک بستگی به تجربه اپراتور و نتایج سعی و خطای متعدد دارد. این فرآیند سعی خطا، باعث ضایعات قابل توجه و کاهش در بهره‌وری تولید، می‌شود. این پایان‌نامه به مطالعه تجربی و عددی پارامترهای موثر در فرآیند تابگیری لوله‌ی فلزی بی‌درز جدارنازک می‌پردازد. پارامترهای موثر در دستگاه تابگیری شامل، سرعت غلتک، خارج از مرکزی غلتک‌ها، زاویه و فشار غلتک‌ها می‌باشد. برای انجام آزمایش تجربی از روش طراحی آزمایش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده‌است. روش تجربی در دو مرحله انجام شد. مرحله‌ی اول شامل چهار طراحی و مرحله دوم شامل یک طراحی می‌باشد. آزمایش‌های مرحله‌ی دوم بر اساس نتایج به دست آمده از مرحله‌ی اول طراحی شد. مرحله‌ی اول شامل ۷۲ آزمایش و مرحله‌ی دوم ۱۶ آزمایش می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش‌های مرحله‌ی اول، آزمایش‌های مرحله‌ی دوم طراحی شد. در انتها، برخی از آزمایش‌های پیشنهاد شده روش تاگوچی، به روش تحلیل عددی با استفاده از حل‌گر صریح نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. برای تغییر پارامترهای شبیه‌سازی، فایل ورودی متنی به‌صورت پارامتریک ایجاد و مورد استفاده قرار گردید. پارامترهای به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها، مشابه مقادیر تجربی می‌باشد. حالت بهینه روش تجربی با روش عددی شبیه‌سازی و مقایسه شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد، پارامترهای میزان فشردگی غلتک‌ها، سرعت حرکت لوله، زاویه غلتک‌ها و خارج از مرکزی غلتک‌ها میانی، به ترتیب بیشترین اثر را در مستقیمی نهایی لوله دارند. نتایج شبیه‌سازی نیز روند مشابهی را پیش‌بینی می‌نماید.

واژگان کلیدی: تابگیری لوله، طراحی تجربی، روش المان محدود، بهینه‌سازی

تقدیم نامہ

تقدیم بہ پدر، مادر، همسر و فرزندان عزیز و مہربانم کہ در تمام مراحل زندگی یار و یاور من بودند و از ہیچ کمکی در جہت موفقیت من دریغ نکردند و تقدیم بہ آنانی کہ دلشان با پرتو ولایت امام زمان (عج) مصفا می شود.

سپاس‌گزاری

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید هادی قادری که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کارساز و سازنده بارور ساختند، تقدیر و تشکر نمایم. از استاد مشاور عزیزم آقای دکتر هادی شانظری سپاس‌گزاری می‌کنم. همچنین از اساتید محترم دانشکده مهندسی مکانیک و کارکنان دانشکده پردیس خوارزمی صمیمانه تشکر می‌کنم. همچنین از همه‌ی دوستان و همکارانم و تمامی کسانی که در طول دوران زندگی به‌نحوی به من کمک کردند، تشکر می‌کنم. نیز، از خانواده عزیزم که وجودشان مایه دلگرمی من است، قدردانی می‌کنم.

فهرست عنوان‌ها

فهرست شکل‌ها ق

فهرست جدول‌ها ث

فهرست نشانه‌ها ذ

فصل ۱ مقدمه ۱

۱-۱- لوله‌های بدون درز ۲

۱-۱-۱ سوراخ‌کاری شمش‌ها ۲

۱-۱-۲ کشش با سنبه ثابت ۳

۱-۱-۳ کشش با سنبه متحرک در قفسه‌های پیوسته ۴

۱-۱-۴ نورد عرضی ۵

۱-۲- تولید غلاف‌های سوخت ۵

۱-۲-۱ خردایش، ریخته‌گری ۶

۱-۲-۲ آهن‌گری گرم ۸

۱-۲-۳ اکستروژن ۸

۱-۲-۴ اسید شویی ۹

۱-۲-۵ عملیات حرارتی ۹

۱-۲-۶ نورد سرد لوله ۱۰

۱-۳- فرآیند تابگیری لوله‌ها ۱۲

۱-۳-۱ ماشین‌های دو غلتکی ۱۲

۱-۳-۲ ماشین‌های شش غلتکی ۱۲

۱-۳-۳ ماشین‌های ده غلتکی ۱۳

۱-۳-۴ ماشین غلتکی متناوب ۱۴

۱-۳-۵ ماشین تابگیری هفت غلتکی ۱۵

۱-۴- اصول کلی تابگیری ۱۵

۱-۵- تنظیم کردن دستگاه تابگیری ۱۰ غلتکی ۱۹

۱-۶- غلتک‌های ماشین تابگیری ۲۲

۱-۶-۱ فرم انحناي غلتک ۲۳

۱-۶-۲ تجهیزات محرک غلتک‌ها (دراپوهای غلتک) ۲۷

۱-۶-۳ پوشش غلتک‌ها ۲۷

۱-۶-۴ تعیین پروفیل غلتک ۲۸

۳۰ پیشینه‌ی پژوهش ۵-۶-۱

فصل ۲ روش تجربی ۳۳

۳۳ ۱-۲ لوله‌ی بدون درز فلزی ۳۳

۳۵ ۱-۱-۲ کاربرد و شرایط لوله ۳۵

۳۶ ۲-۱-۲ مشخصات دستگاه تابگیری ۳۶

۳۶ ۳-۱-۲ معرفی روش انجام طراحی آزمون ۳۶

۳۸ ۲-۲ طراحی آزمایش‌ها ۳۸

۳۸ ۱-۲-۲ تعیین عوامل کنترلی و غیر کنترلی ۳۸

۳۸ ۲-۲-۲ خارج از مرکزی غلتک‌ها ۳۸

۴۰ ۳-۲-۲ زاویه غلتک‌ها ۴۰

۴۱ ۴-۲-۲ فشردگی غلتک‌ها ۴۱

۴۲ ۵-۲-۲ سرعت چرخش غلتک‌ها ۴۲

۴۲ ۱-۲-۲ نرم‌افزار مینی تب ۴۲

۴۳ ۲-۲-۲ کنترل میزان تاب خروجی ۴۳

۴۵ ۳-۲-۲ انجام آزمون و ثبت نتایج در نرم‌افزار ۴۵

۴۹ ۴-۲-۲ تعیین پروفیل غلتک ۴۹

فصل ۳ شبیه سازی المان محدود ۵۱

۵۱ ۱-۳ نرم‌افزار آباکوس ۵۱

۵۳ ۲-۳ مدل سازی ۵۳

۵۴ ۳-۳ خواص مکانیکی ۵۴

۵۵ ۴-۳ مونتاژ قطعات ۵۵

۵۶ ۵-۳ گام و زمان تحلیل ۵۶

۵۷ ۶-۳ مش بندی لوله ۵۷

۵۷ ۷-۳ شرایط مرزی ۵۷

۵۸ ۸-۳ اجرای شبیه سازی ۵۸

۵۹ ۹-۳ پارامتری کردن متغیرها ۵۹

فصل ۴ نتایج و بحث ۶۱

۶۱ ۱-۴ نتایج تجربی ۶۱

۶۱ ۱-۱-۴ سطوح انتخابی از نتایج چهار طراحی و آزمون‌ها ۶۱

۶۵ ۲-۱-۴ آنالیز واریانس ۶۵

- ۴-۱-۳ انجام آزمایش تاییدی ۶۶
- ۴-۲- نتایج شبیه‌سازی ۶۶
- ۴-۲-۱ تغییرات سرعت نسبت به زوایای مختلف ۶۶
- ۴-۳- عدم وابستگی نتایج به اندازه جرم ۶۷
- ۴-۴- میزان تاب خروجی فرآیند شبیه‌سازی ۶۷

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۷۵

- ۵-۱- نتیجه‌گیری ۷۵
- ۵-۲- پیشنهادها ۷۷

منبع‌ها ۷۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: فرآیند پرس کاری گرم [۳] ۲
- شکل ۲-۱: فرآیند نورد مایل مانسمان ۳
- شکل ۳-۱: کشش لوله با سنبه ثابت ۴
- شکل ۴-۱: کشش لوله با سنبه متحرک ۴
- شکل ۵-۱: (الف) غلتک‌های نورد عرضی (ب) قطعات تولیدی ۵
- شکل ۶-۱: مراحل تولید غلاف زیرکونیوم ۶
- شکل ۷-۱: قرص پرس شده ۷
- شکل ۸-۱: (الف) جوشکاری قرص‌ها در دستگاه EBW (ب) انتهای فرآیند جوشکاری و تولید الکتروود ۷
- شکل ۹-۱: (الف) کوره VAR (ب) الکتروود بسته شده در کوره VAR ۸
- شکل ۱۰-۱: آهنگری شمش زیرکونیوم ۸
- شکل ۱۱-۱: (الف) بیلت با روکش مسی (ب) لوله‌ی اکسترود شده ۹
- شکل ۱۲-۱: سیکل عملیات حرارتی لوله‌های زیرکونیومی ۱۰
- شکل ۱۳-۱: (الف) غلتک پیلگر (ب) مندرل ۱۱
- شکل ۱۴-۱: (الف) فرآیند نورد سه غلتک (ب) نمونه غلتک و مندرل ۱۱
- شکل ۱۵-۱: دستگاه تابگیری دوغلتکی ۱۲
- شکل ۱۶-۱: نحوه قرار گیری لوله بین غلتک‌ها ۱۳
- شکل ۱۷-۱: دستگاه تابگیری شش غلتکی ۱۳
- شکل ۱۸-۱: دستگاه تابگیری ده غلتکی ۱۴
- شکل ۱۹-۱: ماشین غلتکی متناوب ۱۴
- شکل ۲۰-۱: ماشین تابگیری هفت غلتکی ۱۵

- شکل ۱-۲۱: نحوه قرار گیری میله بین غلتک‌ها ۱۶
- شکل ۱-۲۲: لوله بین غلتک‌ها تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرد ۱۷
- شکل ۱-۲۳: تابگیری ۶ غلتکی و ۱۰ غلتکی ۱۷
- شکل ۱-۲۴: تنظیم صحیح و برابر غلتک‌ها ۲۰
- شکل ۱-۲۵: تنظیم غلتک‌ها با استفاده از میله تست ۲۰
- شکل ۱-۲۶: ناحیه پلاستیک و خم شدگی در میله ۲۱
- شکل ۱-۲۷: زاویه α بین غلتک و لوله ۲۲
- شکل ۱-۲۸: انواع غلتک تابگیری ۲۳
- شکل ۱-۲۹: به دست آوردن جابجایی گام غلتک [۸] ۲۴
- شکل ۱-۳۰: اندازه‌گیری جابجایی گام غلتک [۸] ۲۵
- شکل ۱-۳۱: محل تماس ناقص بر روی غلتک ۲۶
- شکل ۱-۳۲: الف) غلتک با لبه‌ی تیز ب) غلتک با لبه‌ی مماس ۲۶
- شکل ۱-۳۳: محور اتصال غلتک و درایور ۲۷
- شکل ۱-۳۴: تنظیم غلط غلتک و خوردگی سطح آن ۲۸
- شکل ۱-۳۵: محورهای مختصات غلتک و تشکیل پروفیل غلتک [۲] ۲۹
- شکل ۱-۳۶: سطح پروفیل به دست آمده از روش انولوپ [۲] ۳۰
- شکل ۲-۱: دستگاه آزمایش کشش ۳۴
- شکل ۲-۲: نمونه آزمایش کشش ۳۴
- شکل ۲-۳: منحنی تنش و کرنش ۳۵
- شکل ۲-۴: دستگاه تابگیری ده غلتکی: (۱) دسته تنظیم ارتفاع غلتک‌های بالا (۲) دسته تنظیم زاویه غلتک‌ها ۳۶
- شکل ۲-۵: شماره گذاری جفت غلتک‌ها (ایستگاه‌ها) و نشانگر آنالوگ ۳۹
- شکل ۲-۶: خارج از مرکزی غلتک‌ها با δ مشخص شده است ۴۰

- شکل ۲-۷: زاویه α غلتک‌ها و نشانگر آنالوگ زاویه ۴۱
- شکل ۲-۸: لوله فشرده شده توسط غلتک‌های بالایی ۴۱
- شکل ۲-۹: پتانسیومتر تغییر سرعت ۴۲
- شکل ۲-۱۰: محدودیت طراحی سه ستون سه سطحی و یک ستون شش سطحی ۴۳
- شکل ۲-۱۱: نحوه نمایش تیرانس مستقیمی روی محور قطعه ۴۴
- شکل ۲-۱۲: نحوه نمایش تیرانس مستقیمی روی سطح قطعه ۴۴
- شکل ۲-۱۳: اندازه‌گیری انحنای لوله روی صفحه سنگ صافی ۴۵
- شکل ۲-۱۴: لوله‌ی شمشیری ۴۵
- شکل ۲-۱۵: فرم ثبت نتایج آزمون‌ها ۴۶
- شکل ۲-۱۶: قرار دادن خروجی روی کمترین ۴۶
- شکل ۲-۱۷: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۱ ۴۷
- شکل ۲-۱۸: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۲ ۴۷
- شکل ۲-۱۹: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۳ ۴۸
- شکل ۲-۲۰: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۴ ۴۸
- شکل ۲-۲۱: معادله منحنی پروفیل و ابعاد غلتک ۴۹
- شکل ۳-۱: پروفیل غلتک در نرم‌افزار آباکوس ۵۳
- شکل ۳-۲: مدل غلتک در نرم‌افزار آباکوس ۵۴
- شکل ۳-۳: طول و میزان غیر مستقیمی لوله در نرم‌افزار آباکوس ۵۴
- شکل ۳-۴: مونتاژ لوله و غلتک و راهنما ۵۶
- شکل ۳-۵: انحراف لوله از بین غلتک‌ها لوله ۵۸
- شکل ۴-۱: طراحی سه ستون دو سطحی و یک ستون هشت سطحی ۶۲
- شکل ۴-۲: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون جدید ۶۴

- شکل ۳-۴: نمودار تغییرات سرعت نسبت به زوایای مختلف غلتک ۶۷
- شکل ۴-۴: مقایسه انرژی درونی و انرژی جنبشی ۶۷
- شکل ۵-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۱ (تنظیم حالت بهینه) ۶۹
- شکل ۶-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۲ ۶۹
- شکل ۷-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۳ ۷۰
- شکل ۸-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۴ ۷۰
- شکل ۹-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۵ ۷۱
- شکل ۱۰-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۶ ۷۱
- شکل ۱۱-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۷ ۷۲
- شکل ۱۲-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۸ ۷۲
- شکل ۱۳-۴: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۹ ۷۳

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- مقایسه دقت تابگیری‌های مختلف برای روش‌ها و جنس‌های مختلف ۱۸
- جدول ۱-۲- ترکیب شیمیایی لوله ۳۴
- جدول ۲-۲- خواص مکانیکی لوله در آزمایش کشش ۳۵
- جدول ۳-۲- سطوح قابل تنظیم ارتفاع جفت غلتک‌های (ایستگاه‌های) ۲، ۳، ۴ ۳۹
- جدول ۴-۲- سطوح قابل تنظیم زاویه غلتک‌های بالا و پایین ۴۰
- جدول ۵-۲- میزان فشردگی غلتک‌ها ۴۱
- جدول ۶-۲- تنظیمات پتانسیومتر و سرعت خطی لوله ۴۲
- جدول ۱-۴- سطوح انتخابی آزمون‌ها مؤثر در فاکتور خارج از مرکزی غلتک‌ها ۶۱
- جدول ۲-۴- پارامترهای ورودی و سطوح مربوطه ۶۲
- جدول ۳-۴- جدول ثبت نتایج آزمون مجدد ۶۳
- جدول ۴-۴- مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف ۶۴
- جدول ۵-۴- حالت بهینه فرآیند ۶۵
- جدول ۶-۴- نتایج آنالیز واریانس داده‌ها ۶۵
- جدول ۷-۴- نتایج بر مبنای حالت بهینه فرآیند ۶۶
- جدول ۸-۴- مقادیر تنظیمی شبیه‌سازی ۶۸
- جدول ۹-۴- مقایسه نتایج تاب خروجی لوله در شبیه‌سازی و تجربی ۷۳

فهرست نشانه‌ها

| | | | |
|---------------|----------------|---------------|---------------------------|
| R | شعاع | E | مدول یانگ |
| C | ماتریس میرایی | T | دما |
| M | ماتریس جرم | α | زاویه‌ی غلتک |
| ξ | نسبت میرایی | ϑ | ضریب پواسون |
| L | طول | UTS | استحکام نهایی |
| I | ممان اینرسی | Y.S | استحکام تسلیم |
| ω_0 | فرکانس طبیعی | ρ | چگالی |
| γ, μ | ضرایب لامه | n | تعداد تکرارها |
| V | سرعت | y_i | خروجی‌های اندازه‌گیری شده |
| SS | مجموع مربعات | y_0 | اندازه‌ی اسمی مطلوب |
| MS | میانگین مربعات | SN | نسبت سیگنال به نویز |
| F | توزیع نسبی | δ | خارج از مرکزی |
| | | ε | فشردگی لوله |
| | | d | قطر |

فصل ۱ مقدمه

لوله‌های فولادی برای اولین بار در سال ۱۸۰۰ تولید و با رشد و توسعه مستمر به فرآیندهای تولید مدرن امروزی تبدیل شد. هر ساله میلیون‌ها تن لوله‌های فلزی و فولادی در سراسر دنیا تولید و مصرف می‌شوند. لوله‌های فلزی در مکان‌ها و مصارف متنوع مانند زیرزمین برای انتقال آب و گاز، استفاده در ساخت و ساز برای محافظت از سیم‌های الکتریکی، به دلیل وزن پایین و استحکام بالا استفاده وسیع در صنایع خودرو سازی، نیروگاهی، پالایشگاهی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. لوله‌های فلزی در صنعت کاربردهای زیادی داشته و برای اهداف مختلف استفاده می‌شوند. لوله‌های فلزی معمولاً در دو نوع بدون درز و درزدار می‌باشند. برای تولید هر دو مورد، فلز خام، ابتدا ریخته‌گری شده و به فرم قابل شکل‌دهی تبدیل می‌شود. سپس با روش کشیدن^۱ یا نورد، به لوله‌های بدون درز^۲ و یا با خم کردن لبه‌های ورق و جوش دادن آنها به لوله‌های درز دار تبدیل می‌شوند.

لوله‌های بدون درز همواره پس از عملیات نورد و بارگذاری نامتقارن دارای مقداری انحنا و اعوجاج می‌شوند. به همین دلیل پس از نورد، یک عملیات تابگیری، برای اصلاح عدم مستقیمی^۳ انجام می‌شود. این لوله‌ها با اعمال خم‌های متناوب و معکوس، مستقیم می‌شوند. به دلیل پیچش تاب در لوله در هنگام نورد، منحنی خمش فضایی می‌باشد. این شرایط، فرآیند تابگیری را مشکل می‌سازد. لوله‌های بدون درز تحت بارهای

¹ Drawing

² Seamless

³ Out of straightness

خمشی و نیروهای متمرکز امکان له شدن و یا حتی پاره شدن در مقاطع جدار نازک را دارند، که باید تا جایی که امکان دارد نیروها گسترده باشند و از نیروی متمرکز پرهیز و نیرو حول مقطع وارد شود.

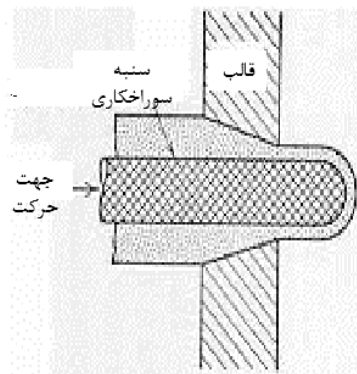
۱-۱- لوله‌های بدون درز

لوله‌ها به علت کاربرد وسیعی که دارند از مواد مختلفی مانند انواع فولادها، مس، آلومینیوم و آلیاژهای دیگر و با ابعاد گوناگون (از چند میلی‌متر تا چند متر قطر خارجی و چند صدم میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر ضخامت) تولید می‌شوند. روش‌های مختلفی برای تولید لوله‌های بی‌درز به کار می‌رود. لوله‌ها عمدتاً از شمش‌های ریخته‌گری شده از طریق روش‌های مختلفی، بی‌درز تولید می‌شوند [۳].

تولید لوله می‌تواند مستقیماً از طریق ریخته‌گری، مانند روش ریخته‌گری گریز از مرکز، انجام می‌شود. نورد و کشش یکی از روش‌های تولید لوله‌ی بی‌درز است. اولین گام برای تولید لوله‌های بی‌درز تهیه شمش یا لقمه اولیه است. به این منظور ابتدا شمش‌های حاصل از ریخته‌گری با نورد، سوراخ شده و سپس از طریق یکی از روش‌های شناخته شده‌ی تغییر شکل، به لوله تبدیل می‌شوند [۳].

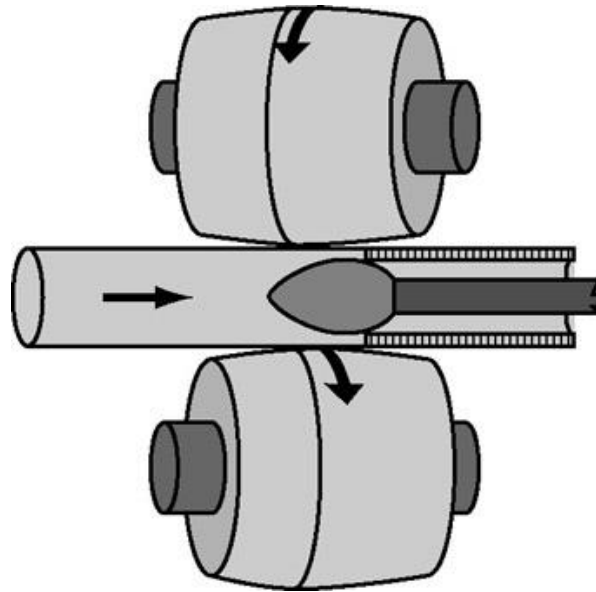
۱-۱-۱ سوراخ‌کاری شمش‌ها

سوراخ‌کاری شمش‌ها از طریق پرس‌کاری گرم، (شکل ۱-۱) و یا نورد با غلتک‌های مایل مانسمان^۱، (شکل ۱-۲)، یا روش‌های دیگر انجام می‌شود.



شکل ۱-۱: فرآیند پرس‌کاری گرم [۳]

¹ Mannesmann



شکل ۱-۲: فرآیند نورد مایل مانسمان

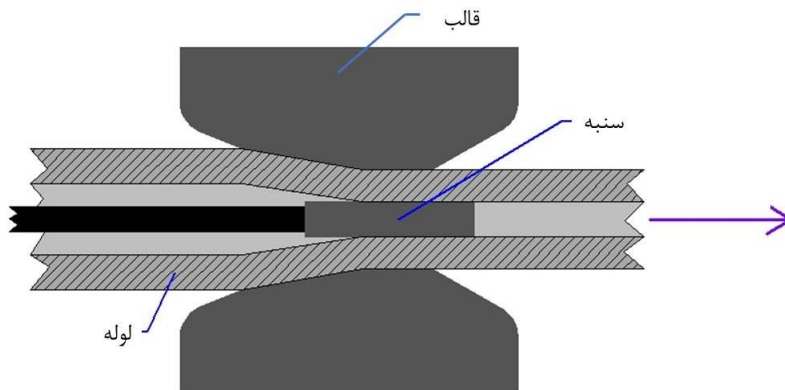
روش سوراخ‌کاری با استفاده از غلتک‌های مایل مانسمان به این ترتیب است که دو غلتک که محورهایشان حدود ۵ تا ۱۲ نسبت به هم به طور مایل قرار گرفته‌اند، هر دو در یک جهت می‌چرخند و میله با یک حرکت پیچی شکل، در حالی که در جهت شعاع فشرده می‌شود به سمت داخل دهانه دو غلتک حرکت می‌کند. لقمه در حال نورد توسط غلتک‌های کمکی یا هادی‌های دیگر در منطقه تغییر شکل نگه‌داشته می‌شود. غلتک‌های به کار رفته در این روش همچنان که شکل ۱-۲ نشان می‌دهد، مخروطی یا دو مخروطی شکل شده‌اند. منطقه تغییر شکل به یک مخروط برای سوراخ‌کاری و مخروطی دیگر برای گشاد کردن لقمه تقسیم می‌شوند. در مخروط سوراخ‌کاری در داخل شمش، تنش‌های کششی و فشاری شعاعی به وجود می‌آید و لقمه با چرخش، جهت خود را به صورت متناوبی تغییر می‌دهد، به این صورت که لقمه در حال چرخش، در اثر افزایش فشار شعاعی به صورت بیضی شکل تغییر شکل می‌دهد. به طوری که در جهت قطر بزرگ بیضی تحت تأثیر تنش‌های کششی قرار می‌گیرد. در نتیجه این چرخش، لقمه می‌تواند بر روی سنبه کشیده شود.

۱-۱-۲ کشش با سنبه ثابت

در این روش شمش تو خالی در قفسه کشش از روی یک سنبه، که در وسط قالب ثابت و محکم نگه‌داشته شده‌است، کشش می‌شود (شکل ۱-۳). فرآیند کشش اغلب در طی دو عبور انجام می‌شود. بیشترین تغییر

شکل در اولین عبور انجام می‌گیرد، در حالی که در عبور دوم بهبود شکل داخلی لوله مورد نظر است. با این روش تولید، لوله‌های بی‌درز با قطر حدود ۸۰ تا ۴۰۰mm و ضخامت جداره ۲۰ تا ۷۰mm و طول تا ۱۸ m را تولید می‌شود [۳].

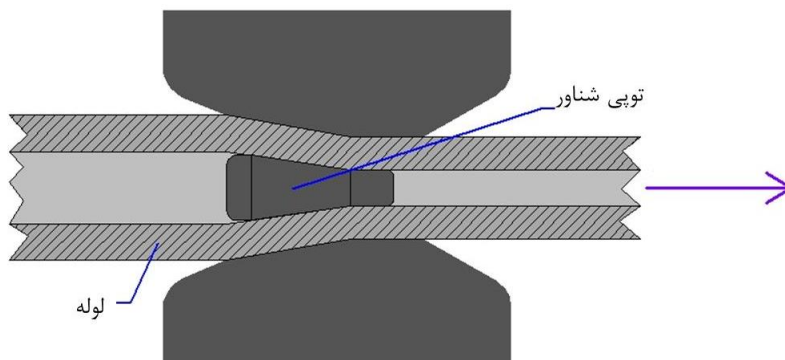
عیب این روش سایش زیاد سنبه، به ویژه برای لوله‌های با طول زیاد است. اما در عوض مزایای این روش توان بازدهی بیش از ۹۰٪ آن و کیفیت بالای سطح خارجی است.



شکل ۱-۳: کشش لوله با سنبه ثابت

۱-۱-۳ کشش با سنبه متحرک در قفسه‌های پیوسته

در روش کشش با سنبه متحرک، لقمه اولیه بر روی سنبه‌ای قرار گرفته است (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴: کشش لوله با سنبه متحرک

این روش پیشرفته‌ای برای تولید لوله‌های فولادی با قطر کوچک و متوسط حدود ۱۵mm است. کاهش مقطع جداره در این روش می‌تواند به ۷۵٪ برسد. عیوب این روش، انحراف از دقت ابعادی ضخامت جداره یا

قطر می‌باشد. همچنین شیارهایی که در موقع خارج ساختن سنبه در سطح داخلی لوله ایجاد می‌شود، از عیوب دیگر این روش است [۳].

۱-۱-۴ نورد عرضی^۱

در نورد عرضی، قطعه اولیه متناسب با شکل هندسی ابزار تغییر شکل می‌دهد و نحوه حرکت آنها با استفاده از روشی که در شکل ۱-۵ نمایش داده شده است، انجام می‌گیرد.

با نورد عرضی محصول نیمه تمام استوانه‌ای شکل، مانند تکه میله‌ای، در حالت گرم به قطعه مدور متقارنی با قطر متغیر در امتداد محور تبدیل می‌شود. این روش می‌تواند برای توزیع مناسب بوده و ماده به عنوان آماده سازی فرم میانی برای فورجینگ با قالب بسته و یا برای تولید قطعه اولیه برای کار نهایی به صورت براده برداری بر روی آن، به کار رود [۳]. در این روش کاهش مقطع به کمک فرم گوه‌ای شکل ایجاد شده بر روی قالب ایجاد می‌شود. به این ترتیب قطر اولیه تکه میله‌ها (به قطر حدود ۱۵ تا ۵۰ mm و طول حدود ۳۵ تا ۱۰۰ mm) باید تقریباً نزدیک به بزرگترین قطر قطعه نهایی باشد. افزایش قطر فقط در شرایط خاصی امکان پذیر است. در این روش سیلان قطعه، عمدتاً فقط در امتداد محور قطعه انجام می‌گیرد، به طوری که طول قطعه افزایش می‌یابد. فرم گوه‌ای شکل ایجاد شده در قالب، سبب شکل‌گیری تنش‌های کششی در قطعه و در امتداد طول شده که نهایتاً به ایجاد ترک‌های داخلی قطعه منجر می‌شود.

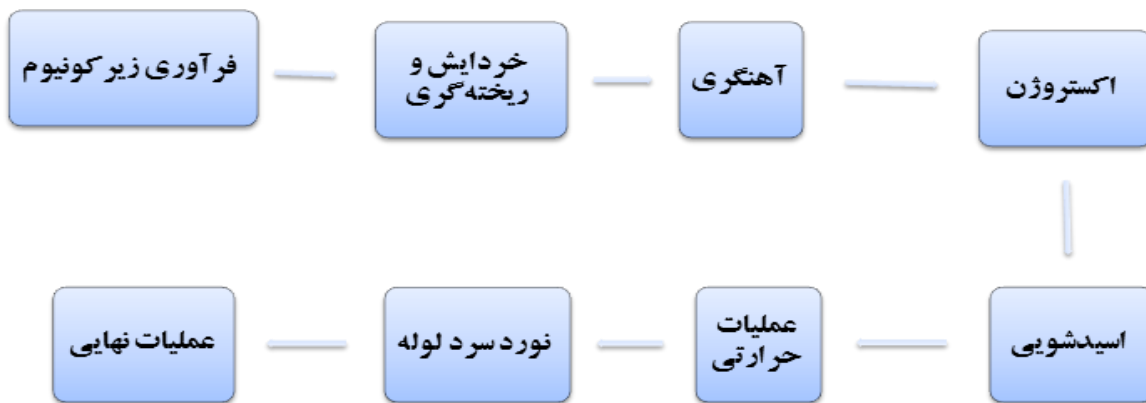


شکل ۱-۵: (الف) غلتک‌های نورد عرضی (ب) قطعات تولیدی

۱-۲- تولید غلاف‌های سوخت

¹ Cross Rolling

یکی از کاربردهای لوله‌های بدون‌درز، استفاده در میله‌های سوخت است. جنس میله‌های سوخت از فلز زیرکونیوم است. زیرکونیوم به لحاظ خواص برتر هسته‌ای از جمله برخورداری از سطح مقطع جذب نوترونی پایین و خواص مناسبی همچون استحکام کافی، مقاومت در برابر خوردگی و ضریب انتقال حرارتی مناسب در محیط راکتور مورد انتخاب صنعتگران هسته‌ای قرار گرفته‌است. بعد از تولید اسفنج زیرکونیوم، با هدف تولید لوله‌های زیرکونیومی برای میله‌های سوخت، مراحل شکل‌دهی و رسیدن به فرم نهایی لوله انجام می‌شود (۱-۶).



شکل ۱-۶: مراحل تولید غلاف زیرکونیوم

۱-۲-۱ خردایش، ریخته‌گری

در این قسمت اسفنج زیرکونیوم خالص تولید شده در مرحله فرآوری زیرکونیوم، به قطعات ریز، خردایش می‌شود. پس از آن با یک درصد نیوبیوم مخلوط و در زیر پرس به شکل قرص‌هایی در می‌آید (شکل ۱-۷). قرص‌های تولیدی در دستگاه جوشکاری باریکه الکترونی^۱ (EBW) تحت خلأ 5×10^{-3} Pa به هم جوشکاری شده و الکتروود تولید می‌شود (شکل ۱-۸). در کوره‌ی ذوب قوسی^۲ (VAR)، الکتروود تولیدی تحت خلأ 10^{-1} Pa به 1×10 شمش آلیاژی زیرکونیوم تبدیل می‌شود (شکل ۱-۹).

کوره ذوب قوس الکتریکی دارای بوت‌ه مس با پوشش آب خنک‌کننده می‌باشد. پس از برقراری جریان مستقیم و ولتاژ بالا بین الکتروود ساخته شده و کف قالب، قوس الکتریکی برقرار و گرمای تولیدی منجر به ذوب الکتروود می‌شود. مذاب، به طور قطره‌ای ریزش کرده و قالب مسی را پر می‌کند. پس از ذوب کامل

¹ Electron Beam Welding

² Vacuum Consumable Arc Casting

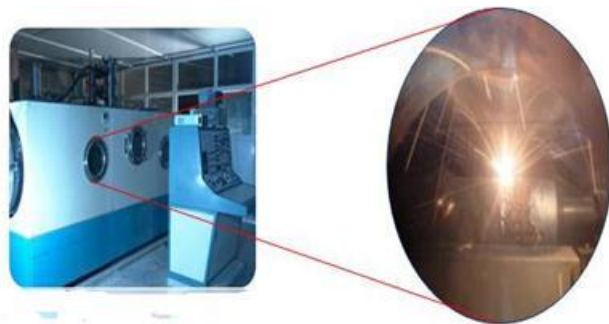
جریان قطع شده و زمان لازم برای خنک شدن داده می‌شود. شمش از قالب جدا شده و آماده‌ی عملیات بعدی می‌شود.



شکل ۱-۷: قرص پرس شده



(ب)



(الف)

شکل ۱-۸: (الف) جوشکاری قرص‌ها در دستگاه EBW (ب) انتهای فرآیند جوشکاری و تولید الکتروود



(ب)



(الف)

شکل ۱-۹: الف) کوره VAR ب) الکتروود بسته شده در کوره VAR

۱-۲-۲ آهنگری گرم^۱

آهنگری به فرآیندی گفته می‌شود که قطعه با تغییر شکل مومسان و با اعمال نیروهای فشاری تولید می‌شود. از این روش برای ساختن قطعات با شکل‌ها، اندازه و جنس‌های مختلف استفاده می‌شود. با این روش می‌توان جریان فلز و ساختار دانه‌ای آن را کنترل نمود و در نتیجه به استحکام و چقرمگی خوبی دست یافت. شمش در کوره الکتریکی در دمای 1000°C پیش‌گرم می‌شود. پس از آن توسط پرس ضربه‌ای آهنگری می‌شود (شکل ۱-۱۰). در انتهای عملیات به قطعات مورد نظر بریده می‌شود. یک مرحله‌ی دیگر این فرآیند انجام می‌شود و سپس فرآیند خنک‌کاری سریع^۲ انجام می‌شود. پس از ماشین‌کاری، بیلت^۳ برای فرآیند بعدی تولید می‌شود.



شکل ۱-۱۰: آهنگری شمش زیرکونیوم

۱-۲-۳ اکستروژن^۴

در فرآیند اکستروژن، شمش حرارت دیده با عبور تحت فشار از یک مجرای کوچکتر، کاهش سطح مقطع می‌یابد. در این فرآیند، ماده خام که معمولاً گرد می‌باشد، با فشار از داخل یک قالب می‌گذرد. به دلیل نیاز به نیروی بسیار زیاد، تغییر شکل باید در دمای بالا انجام شود و به دلیل فعال بودن آلیاژ زیرکونیوم در مجاورت اکسیژن و در دمای بالا، بر روی آن پوششی از جنس مس برای محافظت از اکسیداسیون و نیز برای روان

¹ Hot forging

² Quenching

³ Billet

⁴ Extrusion

کاری در حین اکستروژن استفاده می‌شود (شکل ۱-۱۱-الف). بیلت‌ها در دمای 750°C به مدت ۱ ساعت پیش‌گرم می‌شوند و در دستگاه اکستروژن، اکسترود می‌شوند (شکل ۱-۱۱-ب).



(ب)



(الف)

شکل ۱-۱۱: الف) بیلت با روکش مسی ب) لوله‌ی اکسترود شده

۱-۲-۴ اسید شویی^۱

فرآیند اسید شویی برای شستشوی شیمیایی پوشش‌های مسی و اکسیدزدایی سطوح قطعات استفاده می‌شود. این کار معمولاً با استفاده از اسیدنیتریک^۲ که روی زیرکونیوم مؤثر نیست، انجام می‌گیرد. پس از رفع پوشش مسی، اکسید سطحی با اسیدنیتریک و اسیدفلوریدریک^۳ و آب برداشته می‌شود.

۱-۲-۵ عملیات حرارتی

هدف فرآیند عملیات حرارتی برگشت، کاهش سختی، کاهش تردی، بهبود قابلیت ماشین‌کاری، تسهیل کار سرد بر روی فلز، تنش زدایی، تولید میکروساختار با خواص مناسب مکانیکی و فیزیکی و تغییر خواص مغناطیسی می‌باشد.

عملیات حرارتی آنیلینگ^۴ شامل گرمایش فلز تا دمای مناسب و دادن زمان برای هم دما شدن تمام قسمت‌های آن و سپس خنک شدن آرام قطعه به صورت یکنواخت می‌باشد. برای جلوگیری از اکسیداسیون سطحی، این فرآیند تحت خلأ 1×10^{-2} Pa انجام می‌شود. سیکل عملیات حرارتی، با توجه به نوع جنس،

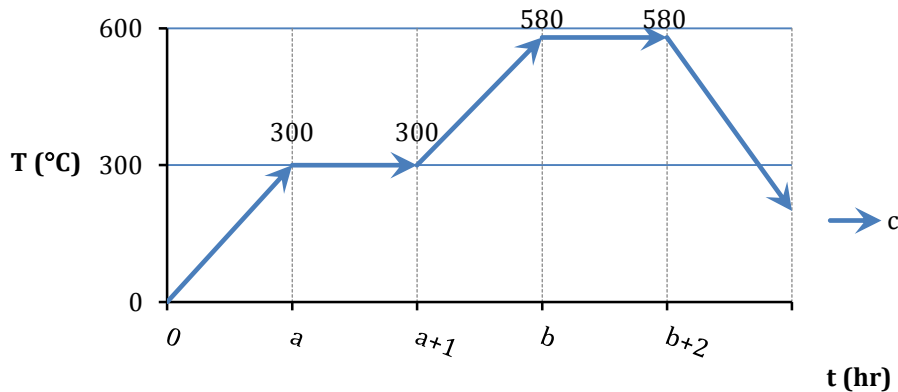
¹ Pickling

² HNO₃

³ HF

⁴ Annealing

ضخامت، گرید محصول متفاوت است. عموماً در لوله‌های زیرکونیومی، سیکل نگهداری قطعات به مدت ۲ ساعت در دمای 580°C و آرام سرد شدن متداول است. یکی از نمونه سیکل‌ها در شکل ۱-۱۲ مشخص است.



شکل ۱-۱۲: سیکل عملیات حرارتی لوله‌های زیرکونیومی

۱-۲-۶ نورد سرد لوله

نورد سرد یکی از مراحل ساخت لوله‌های بدون درز می‌باشد. در این قسمت طی چند مرحله نورد سرد لوله‌های اکستروود شده به لوله‌ی نهایی تبدیل می‌شوند. در این مرحله دو روش نورد انجام می‌گیرد که به شرح ذیل می‌باشد:

• نورد پیلگر^۱

روش نورد پیلگر، یکی از روش‌های متداول و توسعه یافته‌ای است که برای تولید لوله‌های بدون درز در محدوده‌ی قطر ۲۰ mm تا ۷۰۰ mm و ضخامت ۴ mm تا ۱۲۰ mm و طول حدود ۳۰ m به کار می‌رود.

نوعی نورد با غلتک‌های دارای شیار غیر متقارن برای کاهش قطر و ضخامت لوله می‌باشد (شکل الف ۱-۱۳). در این روش لوله‌ی اولیه بر روی سنبه‌ای به نام مندرل^۲ قرار می‌گیرد. سپس با حرکت رفت و برگشتی، در حالی که لوله چرخش داده می‌شود به منظور تغییر شکل به داخل دهانه‌ی بین دو غلتک به صورت گام به گام هدایت می‌شود. در هر گام، لوله کمی به جلو رفته و مجدداً می‌ایستد. در این دستگاه، میزان کاهش قطر^۳ زیاد و تا حدود ۵۰-۸۰ درصد می‌تواند باشد.

¹Pilger

²Mandrel

³Reduction

مندرل، مفتول کار شده‌ای است، با استحکام و کیفیت سطح بالا که از آن برای تنظیم قطر داخلی لوله در حین فرآیند نورد استفاده می‌شود. قطر مندرل، در واقع تعیین کننده‌ی قطر داخلی لوله در یک پاس مشخص می‌باشد (شکل ب ۱-۱۳).



(ب)



(الف)

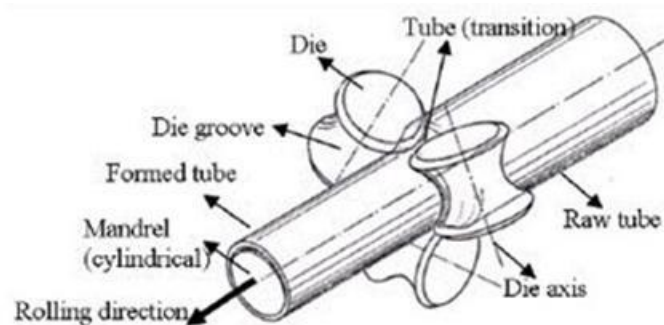
شکل ۱-۱۳: الف) غلتک پیلگر ب) مندرل

• نورد سه غلتکی

طرز کار نورد سه غلتکی شبیه پیلگر است. در این فرآیند، سه غلتک با فاصله‌ی زاویه‌ای 120° در اطراف لوله، فرآیند تغییر شکل را انجام می‌دهند (شکل ۱-۱۴). در این فرآیند به دلیل ضخامت کم و نازک بودن جداره، کیفیت سطح و دقت ابعادی بالا، تغییر شکل و میزان کاهش قطر کم و در حدود ۲۰ تا ۳۵ درصد می‌باشد. قطر لوله‌ی خروجی این دستگاه تا ۶ mm و ضخامت حدود 0.2 mm قابل دستیابی می‌باشد. لازم به توضیح است، بین هر یک از مراحل نورد باید عملیات حرارتی آنیلینگ انجام گیرد.



(ب)



(الف)

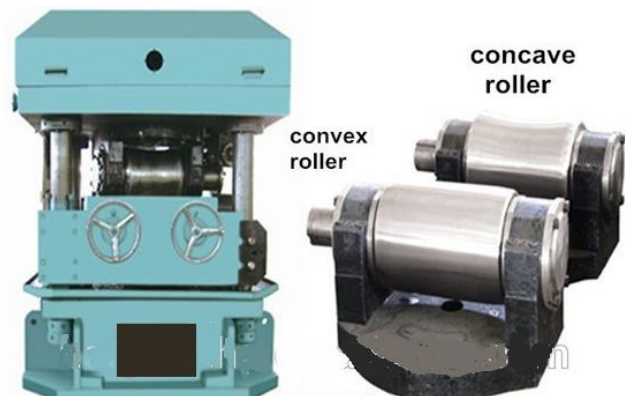
شکل ۱-۱۴: الف) فرآیند نورد سه غلتک ب) نمونه غلتک و مندرل

۳-۱- فرآیند تابگیری لوله‌ها

در عملیات تابگیری، میله‌ها، لوله‌ها و مقاطع گرد، حول محور طولی خود می‌چرخند و همزمان به جلو و بین جفت غلتک‌ها وارد می‌شوند. این غلتک‌ها نیروی متناوب خمشی معکوس شونده را روی لوله اعمال می‌کنند که باعث وارد شدن تنشی بالاتر از تنش حد الاستیک می‌شود و به لوله تغییر شکل خواسته شده را می‌دهد. ماشین‌های تابگیری به پنج دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

۱-۳-۱ ماشین‌های دو غلتکی

در ماشین‌های دو غلتکی، میله توسط دو غلتک که یکی محدب و دیگری مقعر می‌باشند و روبروی یکدیگر قرار دارند، خم می‌شود و از بین آنها عبور می‌کند (شکل ۱-۱۵). در حین عبور لوله از بین جفت غلتک‌ها، علاوه بر نیروی فشاری، نیروی خمشی نیز توسط انحنای غلتک‌ها بر لوله وارد می‌شود. از این دستگاه برای پیش‌تابگیری هم استفاده می‌شود. محدودیت استفاده از آن در لوله‌های جدار نازک می‌باشد. چون لوله بین یک جفت غلتک وارد و تمام نیروی خمشی، آنی و در یک مرحله وارد می‌شود و ممکن است باعث ترک خوردن لوله یا بهم ریختگی ساختار لوله شود.



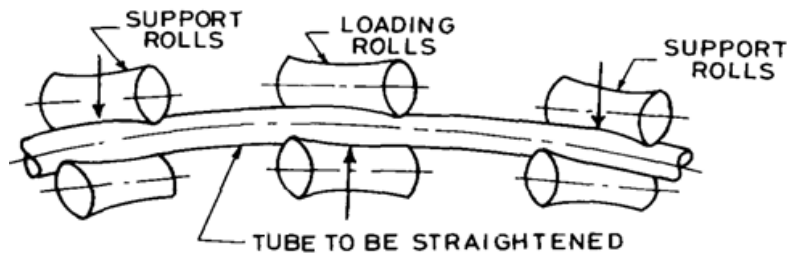
شکل ۱-۱۵: دستگاه تابگیری دوغلتکی

۲-۳-۱ ماشین‌های شش غلتکی

ماشین‌های شش غلتکی، دارای شش غلتک به صورت سه جفت غلتک می‌باشند. در این ماشین‌ها هر شش غلتک مقعر می‌باشند و برای تماس بهتر با لوله مقداری از محور اصلی خود، زاویه می‌گیرند تا علاوه بر

افزایش خط تماس لوله با غلتک و وارد شدن نیروی گسترده، امکان چرخش عرضی نیز برای لوله مهیا شود (شکل ۱-۱۶).

این دستگاه بسته به نوع سایز لوله در انواع مختلفی ساخته می‌شوند. با این دستگاه می‌توان، لوله و میله را تابگیری کرد. میزان تاب دقیقی را می‌توان با این دستگاه به دست آورد (شکل ۱-۱۷).



شکل ۱-۱۶: نحوه قرار گیری لوله بین غلتک‌ها



شکل ۱-۱۷: دستگاه تابگیری شش غلتکی

۱-۳-۳ ماشین‌های ده غلتکی

ماشین‌های ده غلتکی، مانند ماشین شش غلتکی می‌باشند، با این تفاوت که دارای چهار غلتک علاوه بر شش غلتک است، که باعث ایجاد مزیت‌هایی نسبت به ماشین شش غلتکی می‌شود (شکل ۱-۱۸). در بخش‌های بعدی در خصوص این ماشین و مزیت‌های آن، بیشتر توضیح داده می‌شود.



شکل ۱-۱۸: دستگاه تابگیری ده غلتکی

۴-۳-۱ ماشین غلتکی متناوب

ماشین غلتکی متناوب، دارای ۵، ۷ و یا ۱۰ غلتک می‌باشد که در فاصله‌های مشخص، غلتک‌ها یک در میان قرار می‌گیرند و به طور متناوب نیروهایی که در جهت عکس یکدیگر و به طور متمرکز به لوله وارد می‌کنند (شکل ۱-۱۹).



شکل ۱-۱۹: ماشین غلتکی متناوب

۱-۳-۵ ماشین تابگیری هفت غلتکی

ماشین تابگیری هفت غلتکی، معمولاً دارای ۷ غلتک می‌باشند که در دو گروه پنج و دو غلتکی قرار دارد. یکی از غلتک‌ها در مرکز گروه پنج غلتکی قرار دارد و برای ایجاد خم در راستای لوله می‌باشد (شکل ۱-۲۰). این روش مانند یک تیر می‌باشد که از دو طرف مهار شده و یک نیروی متمرکز در وسط آن وارد می‌شود. [۴].

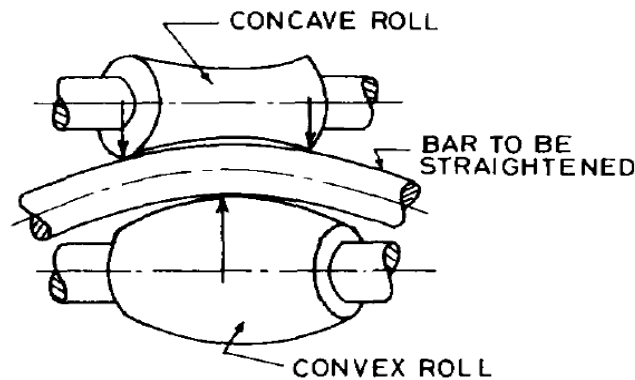


شکل ۱-۲۰: ماشین تابگیری هفت غلتکی

۱-۴- اصول کلی تابگیری

در یک نوع تابگیری، با عبور میله یا لوله از بین دو غلتک که یکی مقعر و دیگری محدب می‌باشد، عمل مستقیم کردن انجام می‌شود. اگر فاصله بین غلتک‌ها بیشتر از قطر میله باشد، میله فقط متحمل خمش خالص می‌شود (شکل ۱-۲۱). ولی اگر فاصله غلتک‌ها کم شود به گونه‌ای که قطر میله بزرگتر از فاصله بین غلتک‌ها باشد، میله دچار تنش لهیدگی نیز می‌شود. علاوه بر آن اگر فاصله بین غلتک‌ها بیشتر از حد مورد نیاز باشد و یا بیشتر از قطر لوله باشد، لوله حرکت نمی‌کند و به داخل غلتک‌ها هدایت نمی‌شود. چرا که در این ماشین‌ها لوله یا میله توسط غلتک‌ها باید به داخل دستگاه کشیده شود و حرکت خارجی لوله را هدایت

نمی کند. همچنین فاصله بین جفت غلتکها باید هم اندازه باشند. این کار باعث می شود در بین جفت غلتکی که فاصله زیاد است میله تحت فشار قرار نگیرد و نیروی کششی به میله وارد نشود.



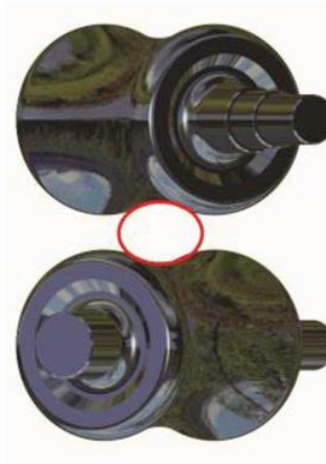
شکل ۱-۲۱: نحوه قرار گیری میله بین غلتکها

لوله در حین عبور از بین غلتکها تحت دو نیرو قرار می گیرد [۵]:

۱- بار فشاری مستقیم کننده

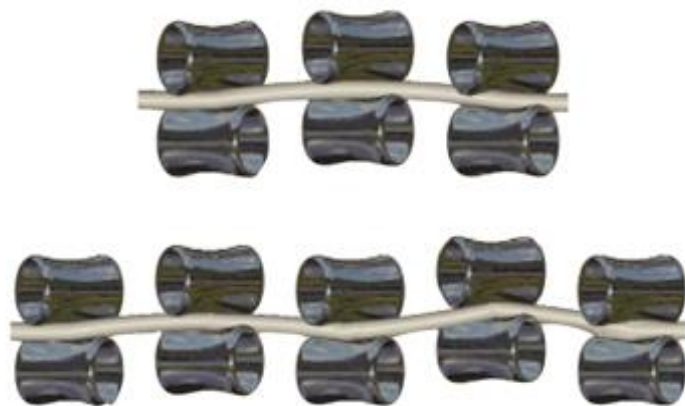
۲- بار خمشی مستقیم کننده

نیروی فشاری مستقیم کننده: هر جفت غلتک به گونه ای تنظیم می شوند، که فاصله ی بین جفت غلتک، مقداری از قطر خارجی لوله کمتر باشد (شکل ۱-۲۲). بنابراین هنگامی که لوله از بین جفت غلتک عبور می کند، تحت نیروی فشاری روی دیواره قرار می گیرد و باعث می شود تنش وارد شده از حد الاستیک بگذرد و در نتیجه مقداری مستقیمی به دست آید. اگر این عملیات به درستی انجام شود، باعث افزایش گردی لوله، حذف اعوجاج و از بین رفتن بیضی شکل بودن آن می شود.



شکل ۱-۲۲: لوله بین غلتک‌ها تحت نیروی فشاری قرار می‌گیرد

بار خمشی: معمولاً یک جفت غلتک می‌تواند به گونه‌ای تنظیم شود که در لوله در حال حرکت ایجاد خمش و حرکت انحنادار نماید. همان خمشی که به این صورت به لوله وارد می‌شود، مهمترین عامل تابگیری می‌باشد. مقدار خم‌شدگی باید به دقت کنترل شود، زیرا نیروی بیش از حد، باعث کارسختی و مشکلات دیگر می‌شود. یکی از اختلافات اصلی بین ماشین‌های ۶ غلتکی و ۱۰ غلتکی، تعداد ممان‌های خمشی وارد شده می‌باشد که در ماشین ۶ غلتکی یک عدد ممان خمشی و در ۱۰ غلتکی دو عدد ممان وجود دارد (شکل ۱-۲۳).



شکل ۱-۲۳: تابگیری ۶ غلتکی و ۱۰ غلتکی

برای مثال در لوله‌های کم کربن با قطر 0.541 in و ضخامت جداره 0.118 in و اختلاف مستقیمی 0.0018 in/foot و بیضی بودن 0.0002 in می‌توان، تا اندازه مستقیمی 0.048 (in/foot) و بیضی بودن 0.0004 با ماشین شش غلتکی به‌دست آورد، ولی با ماشین ۱۰ غلتکی می‌توان، تا مستقیمی کمتر از 0.0006 (in/foot) به‌دست آورد. در جدول ۱-۱ مقایسه برخی عملیات‌های انجام شده توسط این دو دستگاه ملاحظه می‌شود [۵].

جدول ۱-۱- مقایسه دقت تابگیری‌های مختلف برای روش‌ها و جنس‌های مختلف [۵]

| Material and Sizes | | | Original Tube Condition | | After 6-Roll Straightening | | After 10-Roll Straightening | | Straightness Improvement | | |
|--------------------|---------|----------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|---------|--------------------|
| | Tube OD | Wall Thickness | Out of Straight (In. per Foot) | Out of Round | Out of Straight (In. per Foot) | Out of Round | Out of Straight (In. per Foot) | Out of Round | 6-Roll | 10-Roll | 10-Roll vs. 6-Roll |
| Low-carbon Steel | 0.541 | 0.118 | 0.048 | 0.0002 | 0.0018 | 0.0000 | 0.0006 | 0.0000 | 26.7 | 80.0 | 3.0 |
| | 0.787 | 0.197 | 0.048 | 0.0000 | 0.0016 | 0.0000 | 0.0004 | 0.0000 | 30.0 | 120.0 | 4.0 |
| Hard-drawn Brass | 0.391 | 0.039 | 0.048 | 0.0004 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0007 | 0.0000 | 8.0 | 68.6 | 8.6 |
| | 0.746 | 0.078 | 0.048 | 0.0008 | 0.0048 | 0.0008 | 0.0016 | 0.0000 | 10.0 | 30.0 | 3.0 |
| Hard-drawn Cu/Ni | 0.992 | 0.078 | 0.048 | 0.0400 | 0.0072 | 0.0008 | 0.0007 | 0.0000 | 6.7 | 68.6 | 10.3 |
| | 1.811 | 0.118 | 0.072 | 0.0016 | 0.0060 | 0.0008 | 0.0005 | 0.0000 | 12.0 | 144.0 | 12.0 |
| Half-hard Copper | 0.559 | 0.039 | 0.072 | 0.0004 | 0.0084 | 0.0000 | 0.0005 | 0.0000 | 8.6 | 144.0 | 16.8 |
| | 1.380 | 0.059 | 0.036 | 0.0335 | 0.0066 | 0.0028 | 0.0012 | 0.0000 | 5.5 | 30.0 | 5.5 |
| Aluminum | 0.500 | 0.039 | 0.036 | 0.0004 | 0.0024 | 0.0004 | 0.0009 | 0.0000 | 15.0 | 40.0 | 2.7 |
| | 1.004 | 0.019 | 0.048 | 0.0043 | 0.0027 | 0.0016 | 0.0002 | 0.0000 | 17.8 | 240.0 | 13.5 |
| Averages | | | 0.0504 | 0.0082 | 0.0048 | 0.0007 | 0.0007 | 0.0000 | 14.0 | 96.5 | 7.9 |

اضافه کردن ممان خمشی، در فرآیندهای تابگیری مزایای زیر را به همراه دارد:

- * اپراتور می‌تواند در اولین جفت غلتک ممان خمشی زیادی وارد کند و این ممان‌های خمشی را به طور خطی در غلتک‌های بعدی کم کند. جفت غلتک نهایی، عمل نهایی و پرداخت را انجام می‌دهد. ولی اگر تعداد جفت غلتک‌ها کم باشند، ممان خمشی وارد شده شدید می‌باشد.
- * تعداد زیاد سیکل‌های معکوس شونده در محدوده‌ی پلاستیک باعث می‌شود، لوله‌هایی با انحنای زیاد را نیز مستقیم کنند.

* ابتدا و انتهای لوله را بهتر صاف شود.

* در بعضی مواد مانند لوله‌های مسی، به گونه‌ای بسیار خوب مستقیم می‌شوند که تنش پسماند در لوله پدید نمی‌آید و در نتیجه عملیات آنیل تغییری روی مستقیمی لوله پدید نمی‌آورد. تنش پسماند، به دلیل کاهش تغییرات شدید ممان خمشی وارد شده در مراحل مختلف است.

* در این روش، مستقیمی و گردی بهتری فراهم می‌آید.

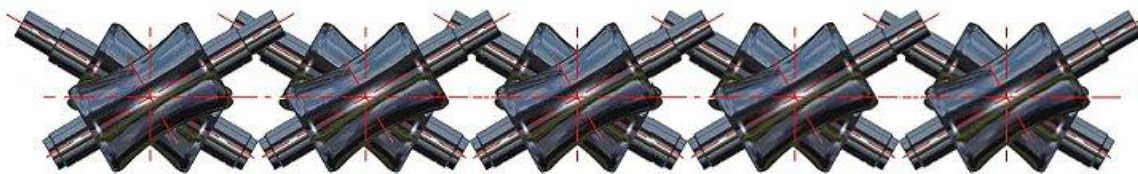
تنظیم کردن غلتک‌ها در ماشین‌های ۱۰ غلتکی یک عملیات پیچیده و وقت‌گیر می‌باشد، همچنین به نسبت در ماشین‌های ۶ غلتکی این عملیات مستلزم صرف زمان زیادتری می‌باشد. زیرا باید زاویه ۱۰ غلتک، فاصله بین هر جفت غلتک، مقدار خمش وارد شده و غیره را تنظیم کرد. در سیستم‌های قدیمی و دستی کیفیت محصول تولیدی، به نسبت مهارت و تجربه‌ی اپراتور، تغییر می‌کند. اما در سیستم‌های اتوماتیک، زمان تنظیمات و اطلاعات برای هر سایز لوله فراهم شده‌است و تنظیم کردن دستگاه به منظور تغییر در سایز لوله، کمتر از ۱ دقیقه زمان لازم دارد و همچنین مقدار مستقیمی و بیضی بودن دیگر متناسب با تجربه و مهارت افراد تغییر نمی‌کند. در نتیجه با سیستم‌های کامپیوتری امکان تولید چندین دسته محصول با سایزهای مختلف در یک شیفت کاری مهیا می‌باشد [۵].

۱-۵- تنظیم کردن دستگاه تابگیری ۱۰ غلتکی

اگر غلتک‌ها به طور صحیح تنظیم نشوند، دسترسی به خط تماس صحیح ممکن نخواهد بود. همچنین عدم تنظیم صحیح، باعث خوردگی سریع غلتک‌ها می‌شود. برای تنظیم فاصله غلتک‌ها متناسب با سایز لوله یا میله‌ای که می‌خواهند عملیات را روی آن انجام دهند، ابتدا هر پنج غلتک پایین را در یک راستا و زاویه آن را صفر درجه (یا عمود بر محور حرکت لوله) تنظیم می‌کنند (شکل ۱-۲۴). اولین مرحله که معمولاً نادیده گرفته می‌شود تنظیم کردن و ردیف کردن غلتک‌ها با یک میله تست^۱ می‌باشد (شکل ۱-۲۵). سپس زاویه آن‌ها را متناسب با قطر لوله می‌چرخانند. غلتک‌های بالایی را در جهت مخالف غلتک‌های پایین و به اندازه‌ی

¹ test bar

غلتک‌های بالایی می‌چرخانند. لوله را در فاصله بین غلتک‌ها قرار داده و غلتک بالا را پایین آورده تا مماس بر لوله شوند، برای بهتر نتیجه گرفتن می‌توان غلتک‌ها را در حال چرخش قرار داد و هنگامی که فاصله دقیقاً برابر با قطر لوله شد، غلتک‌ها لوله را به داخل می‌کشند و می‌توان نتیجه گرفت این فاصله برابر با قطر لوله مورد نظر است که پس از آن متناسب با جنس لوله یا سختی لوله، با استفاده از ورنیه‌های موجود روی دستگاه غلتک بالایی را حرکت داده و به مقدار لازم پایین آورده و در واقع نیروی فشاری یا لهیدگی بیشتر روی لوله ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۲۴: تنظیم صحیح و برابر غلتک‌ها

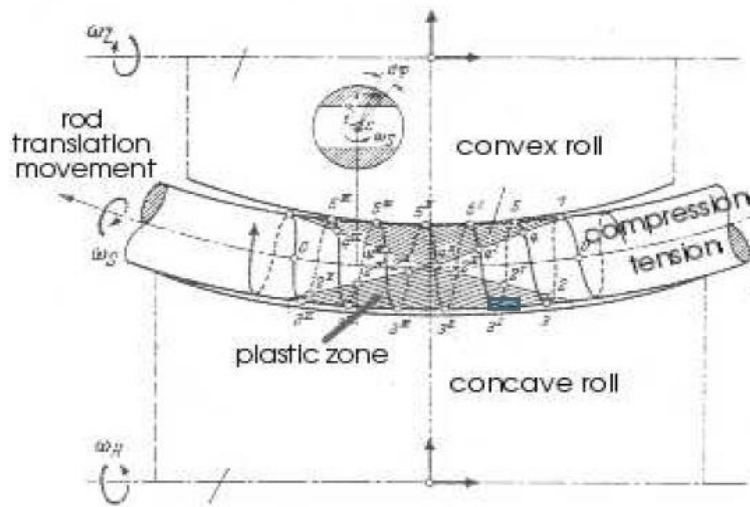


شکل ۱-۲۵: تنظیم غلتک‌ها با استفاده از میله تست

برای تنظیم ارتفاع جفت غلتک‌ها نسبت به هم، معمولاً جفت غلتک دوم، سوم و چهارم را مقداری بالاتر و یا پایین تر از خط مرکز جفت غلتک اول و آخر قرار می‌دهند. این کار باعث می‌شود لوله در حین عملیات علاوه بر تنش لهیدگی دارای کشیدگی و همچنین مقداری خم در آن به وجود آید. در این عملیات میله به

طور چرخشی در زیر غلتک‌ها به جلو رانده می‌شود. به دلیل اینکه غلتک‌ها مقداری اختلاف ارتفاع دارند و همچنین لوله در زیر غلتک‌ها در حال چرخش است، این خمش دائماً در حال معکوس شدن است.

همانطور که در شکل ۱-۲۶ ملاحظه می‌شود، تنش در وسط میله از حد الاستیک می‌گذرد و وارد منطقه پلاستیک می‌شود و به همین صورت تا انتهای لوله ادامه پیدا می‌کند و پس از خارج شدن از غلتک‌ها و برگشت فنی انحنای مورد نظر به دست می‌آید.

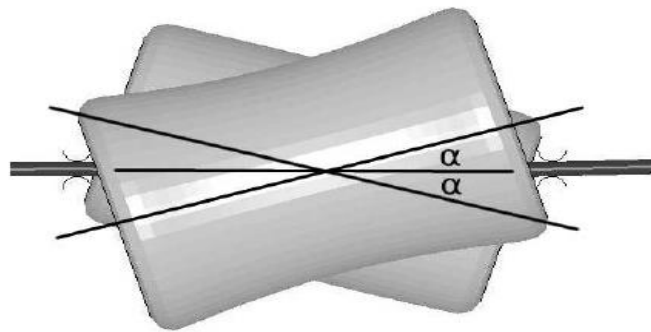


شکل ۱-۲۶: ناحیه پلاستیک و خم شدگی در میله

اگر یک نقطه روی سطح میله در حین فرآیند در نظر گرفته شود، مسیر حرکت آن مانند یک مارپیچ است که محور آن مطابق غلتک‌ها دارای انحراف است، که این انحنا به دلیل وجود مقداری اختلاف ارتفاع در غلتک‌ها می‌باشد. محور غلتک‌ها نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به محور میله، دارای زاویه می‌باشد. این زاویه اثر بسیار مهمی روی دقت فرآیند دارد.

زاویه‌ی محور غلتک با محور لوله را زاویه انحراف غلتک گویند و با α نمایش می‌دهند (شکل ۱-۲۷). در حالت معمولی با نورد ساده، زاویه محور غلتک با محور لوله، 90° یا در حالت عمود بر یکدیگر قرار دارند. با کاهش زاویه α بین غلتک‌ها میله بیشتر تحت خمش قرار می‌گیرد. همچنین خط تماس لوله با غلتک تا اندازه‌ای بیشتر می‌شود. البته این افزایش خط تماس مقدار بهینه دارد زیرا پس از این مقدار بهینه، خط تماس لوله با غلتک کمتر شده و به دو خط مجزا تقسیم می‌شوند که این دو خط در لبه‌های انتهایی غلتک

تماس دارند. علاوه بر آن با کاهش زاویه α سرعت پیشروی لوله کاهش می‌یابد. همچنین اگر این زاویه در حالت عمود بر محور لوله باشد ناحیه توزیع تنش بسیار کم و متمرکز می‌شود. بهترین زاویه زمانی است که بیشترین خط تماس و بیشترین مستقیم‌شدگی و همچنین سرعت پیشروی مناسب نیز وجود داشته باشد. امروزه زاویه α بیشتر براساس تجربه و بسته به جنس انتخاب می‌شود [۶].



شکل ۱-۲۷: زاویه α بین غلتک و لوله

تنظیمات غلط غلتک‌ها در این ماشین‌ها باعث بروز مشکلات زیر می‌شوند [۷]:

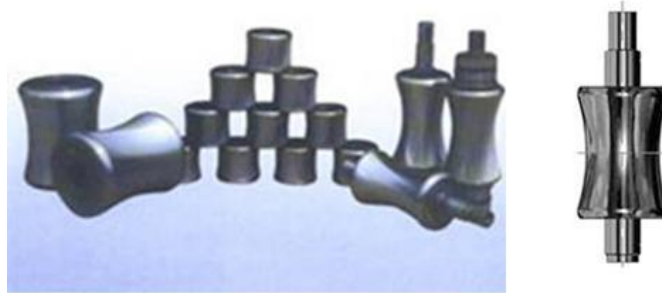
- * تابگیری ناقص و ضعیف لوله
- * عدم اصلاح مناسب بیضی شدگی مقاطع
- * خط انداختن روی محصول و کیفیت نامناسب لوله ی خروجی
- * تغییرات ابعادی ناخواسته
- * کار سختی بیش از حد روی محصول
- * سایش و خوردگی سریع غلتک‌ها

۱-۶- غلتک‌های ماشین تابگیری

همانند اکثر ماشین آلات، کلیه قطعات و سیستم‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا هدف مورد نظر میسر شود که این هدف در ماشین‌های تابگیری، مستقیم‌کردن و یکنواخت کردن لوله‌ها و مقاطع گرد می‌باشد.

غلتک‌های ماشین به عنوان قلب این ماشین‌ها و عامل اصلی در این فرآیند می‌باشند و به‌خصوص کانتور انحنا این غلتک باعث می‌شود تا لوله‌هایی با قطرهای مختلف را مستقیم کند (شکل ۱-۲۸).

در این ماشین‌ها با تنظیم صحیح و منطقی سیستم حرکت دورانی غلتک‌ها و اینکه غلتک‌ها در موقعیت دقیق و در یک محور قرار داشته باشند، می‌توان بسیاری از مشکلات بوجود آمده را برطرف کرد. انحنا غلتک‌ها در ابتدا به صورت هذلولی بوده است که این شکل باعث بروز مشکلاتی در فرآیند، مانند عدم تماس یک خط کامل بر روی غلتک می‌شود. تماس لوله با غلتک ممکن است، در سه نقطه باشد. خط تماس لوله با غلتک یک خط بسیار کوتاه است که باعث ایجاد تنش متمرکز بر روی لوله، خوردگی و فرسایش سریع غلتک و بسیاری مشکلات دیگر می‌شود. فرم منحنی غلتک در هر ده غلتک در اینگونه ماشین‌ها باید کاملاً یکسان باشند [۸].



شکل ۱-۲۸: انواع غلتک تابگیری

۱-۶-۱ فرم انحنا غلتک

پروفیل غلتک‌ها یک منحنی دقیق هایدربولیک می‌باشد که ممکن است به مرور زمان به علت فرسایش از بین رفته و فرم خود را از دست بدهد. حال سؤال اینجاست که پروفیل دقیق غلتک‌ها در سیستم تابگیری چرخشی چگونه است؟

پروفیل غلتک‌ها هنگامی صحیح است که:

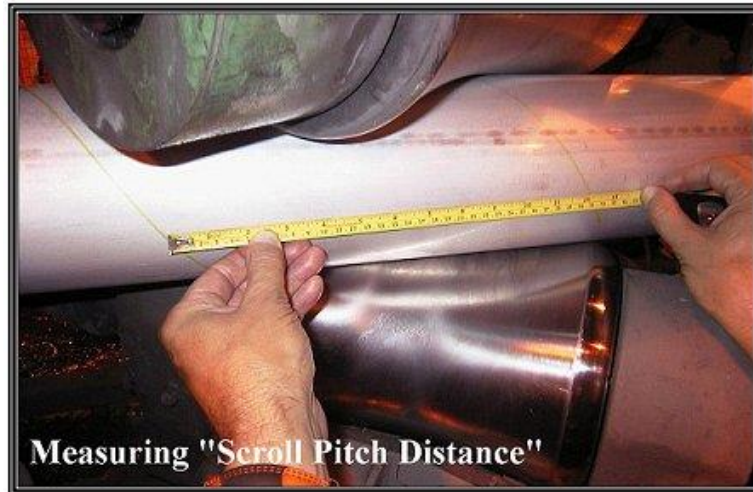
۱- موقعیت زاویه‌ای غلتک بتواند به گونه‌ای تنظیم شود که محدود قطر لوله‌هایی که دستگاه برای آن تعریف شده‌است را در برگیرد. به گونه‌ای که خط تماس ۱۰۰٪ در طول غلتک مهیا شود. معمولاً دستگاه‌های تابگیری، تنها برای یک سایز لوله ساخته نمی‌شوند و غلتک‌های آنها را به گونه‌ای طراحی می‌کنند تا محدوده‌ای از قطر لوله را در بر گیرد. برای لوله با قطرهای مختلف می‌توان با تغییر زاویه غلتک‌ها، بهترین خط تماس بین لوله و غلتک را به دست آورد.

۲- گام طولی حرکت لوله یا مقدار جابجایی که لوله هنگام چرخش به جلو حرکت می‌کند، در بزرگ‌ترین اندازه خود، باید کمتر از طول پروفیل غلتک باشد [۸].

جابجایی گام، مقدار حرکت به جلویی است که لوله در طی یک دوران انجام می‌دهد. در شکل ۱-۲۹ و شکل ۱-۳۰ این جابجایی گام، برای سایز مشخصی از لوله مشاهده می‌شود. همانطور که این شکل نشان می‌دهد سایز لوله از ظرفیت دستگاه بیشتر است.



شکل ۱-۲۹: به دست آوردن جابجایی گام غلتک [۸]



شکل ۱-۳۰: اندازه‌گیری جابجایی گام غلتک [۸]

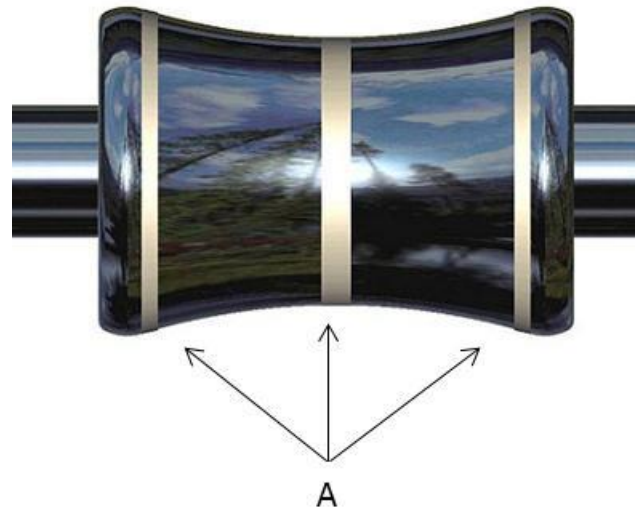
عواملی که باعث تغییر در منحنی پروفیل غلتک‌ها می‌شوند شامل موارد ذیل می‌باشد:

۱- فرسایش غلتک‌ها: به علت کار زیاد، تماس با لوله‌هایی با جنس‌های سخت و یا آلودگی‌های محیطی؛ جلوگیری از شرایط آلوده و کثیف مخصوصاً ذرات فلزی و تمیز نگه داشتن غلتک‌ها اثر بسیار مهمی روی عمر غلتک‌ها می‌گذارد. تحت شرایط بسیار تمیز، عمر این غلتک‌ها می‌تواند بیش از ۳۰ برابر حالت معمولی افزایش یابد.

۲- تعمیر غلتک‌ها

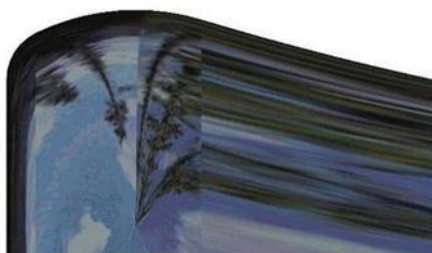
۳- ساختن غلتک با منحنی غیر صحیح و یا دایره‌ای ساده [۸]

اگر به دلیل عوامل بالا فرم منحنی غلتک‌ها تغییر پیدا کند، لوله خط تماس ۱۰۰٪ را با جفت غلتک‌ها ندارد و تنها در سه نقطه ابتدا، انتها و در وسط با غلتک تماس دارد که در شکل ۱-۳۱ مشاهده می‌شود. این تماس ناقص لوله با غلتک باعث بروز مشکلاتی مانند فرسایش بیشتر غلتک‌ها، خط انداختن و اثر گذاشتن بر روی لوله و گاهی اوقات ترک برداشتن و یا پاره شده لوله و بسیاری مشکلات دیگر می‌شود.



شکل ۱-۳۱: محل تماس ناقص بر روی غلتک

علاوه بر فرم انحنای پروفیل غلتک‌ها، در انتهای غلتک نیز یک فرم منحنی دیگر وجود دارد که از وجود لبه تیز در انتهای غلتک جلوگیری می‌کند. این انتقال انحنای منحنی هایپربولیک به طرف انتهای غلتک، تحت مطالعات فراوانی قرار گرفته است. در اینجا این انحنای به وسیله یک منحنی کاملاً مماس به وجود آمده است (شکل ۱-۳۲). این منحنی مماس، همواره باعث می‌شود که روی لوله، اثر حرکت غلتک‌ها کمتر بماند و به اصطلاح کمتر روی لوله خط بیندازد [۸].



(ب)



(الف)

شکل ۱-۳۲: الف) غلتک با لبه‌ی تیز ب) غلتک با لبه‌ی مماس

۱-۶-۲ تجهیزات محرک غلتک‌ها (درايوهای غلتک)

ماشین‌های تابگیری با محرک‌های مختلفی ساخته می‌شوند. بعضی ماشین‌ها سیستم موتور درايو مجزا برای هر غلتک دارند، ولی اکثر ماشین‌ها از دو موتور درايو استفاده می‌کنند. یک موتور برای مجموعه غلتک‌های بالا و یکی برای مجموعه غلتک‌های پایین استفاده می‌شود (شکل ۱-۳۳). صرف‌نظر از روش چرخاندن غلتک‌ها، این نکته بسیار مهم است که همه غلتک‌ها با یک سرعت یکسان بچرخند زیرا اختلاف سرعت چرخشی غلتک‌ها روی لوله باعث می‌شود، یک غلتک روی لوله لیز بخورد و یا به یک غلتک، نیروی بیشتری وارد شود. به علاوه سازنده باید یک سیستم تقسیم کننده نیرو برای غلتک‌ها مهیا کند تا توان غلتک‌ها به طور مساوی بین آنها تقسیم شود. هر بار که غلتک‌ها تعویض می‌شوند، کنترل دوران غلتک‌ها و نیروی وارد بر موتور لازم است اندازه‌گیری شود. اگر غلتک‌ها با دوران مساوی بچرخند، تابگیری دقیق صورت نمی‌گیرد، همچنین خوردگی غلتک‌ها بسیار زیاد می‌شود و تحت بارهای زیاد، موتور ضعیف و یا متوقف می‌شود.



شکل ۱-۳۳: محور اتصال غلتک و درايو

۱-۶-۳ پوشش غلتک‌ها

مقدار پوشش غلتک‌ها باید به طور ماهانه بسته به میزان استفاده آن کنترل شود، بهترین راه برای کنترل کردن پوشش سطح غلتک‌ها و اندازه‌گیری مقدار خوردگی غلتک‌ها، اندازه‌گیری و کنترل قطر غلتک در مرکز انحنا می‌باشد. وقتی این اختلاف به میزان تolerانس ذکر شده در دفترچه رسید، غلتک باید تعویض یا اصلاح شود. معمولاً قطر وسط انحنای غلتک‌ها اگر تا ۰.۸٪ قطر اولیه باشند، می‌توانند تعمیر و مجدداً استفاده شوند در غیر این صورت باید غلتک‌ها تعویض شوند.

معمولاً جنس غلتک‌ها از فولاد کربنی ابزار با آلیاژ کروم زیاد می‌باشد که تحت عملیات سخت کاری از ۵۸ الی ۶۴ راکول c سختی به دست می‌آورند [۸]. شکل ۱-۳۴ غلتکی را نشان می‌دهد که به طور صحیح تنظیم نشده‌است و دچار خوردگی در مرکز قطعه و اثر گذاشتن روی سطح پروفیل شده‌است.



شکل ۱-۳۴: تنظیم غلط غلتک و خوردگی سطح آن

در این شکل مشخص است که ساییدگی روی غلتک بیشتر مایل به راست است و نشان می‌دهد که لوله خارج از مرکز حرکت می‌کرده است.

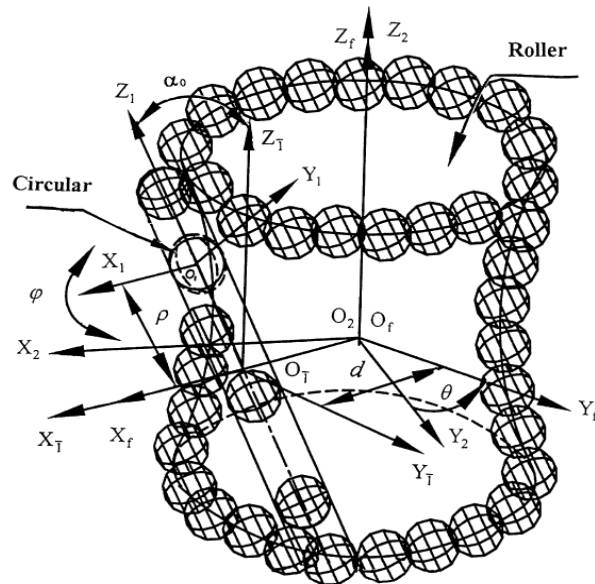
در بعضی موارد به علت اینکه روی لوله نباید اثری از غلتک‌ها بماند، غلتک‌هایی با پوشش خاص و غیر اثرگذار استفاده می‌شوند. این غلتک‌ها بوسیله پوشش‌های پلیمری و مواد فیبری پوشیده می‌شوند.

۱-۶-۴ تعیین پروفیل غلتک

تعیین پروفیل غلتک یکی از عامل‌های مؤثر در عملیات تابگیری می‌باشد. برای ساخت انحناى غلتک با دقت قابل قبول که یک سطح با انحناى سه بعدی می‌باشد، اگر پروفیل سطح غلتک با محاسباتی صحیح تعیین شود، می‌تواند به سادگی و با دقت خوبی توسط ماشین آلات مختلف ساخته و بازرسی شوند. تحقیقات انجام شده بر روی هندسه سطح غلتک‌ها بسیار کم می‌باشند.

. طبق تئوری انولوپ^۱، کانتور غلتک به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که مانند پیچیدن یک منحنی دایره‌ای فضایی سه پارامتری در یک عملیات همزمان چرخشی و انتقالی می‌باشد [۲]، از این رو به آن تئوری انولوپ یا پیچیدن می‌گویند.

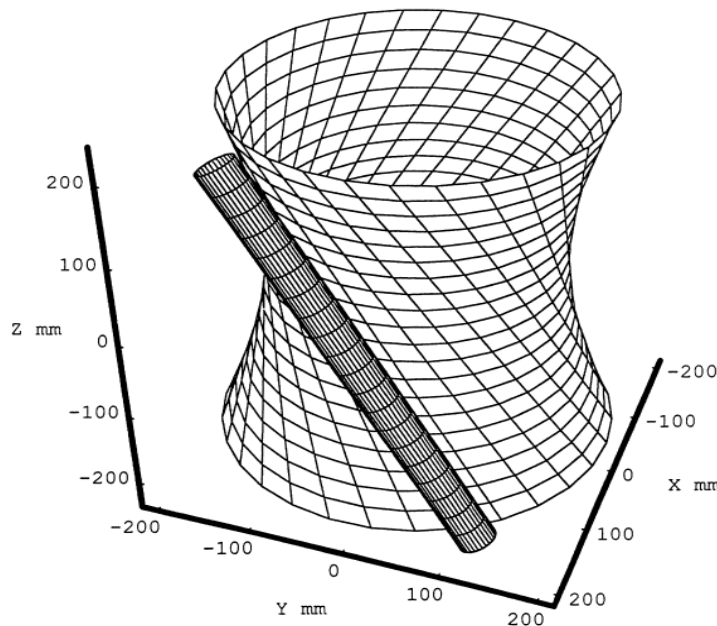
پروفیل غلتک به صورت پیچیدن مجموعه منحنی‌های دایره‌ای فضایی هستند که در هر مختصاتی شامل دوران و جابجایی همزمان می‌باشند. در شکل ۱-۳۵ محورهای مختصات $O_1X_1Y_1Z_1$ و $O_2X_2Y_2Z_2$ به ترتیب محور مختصات دایره فضای و محور مختصات غلتک می‌باشند. همچنین $O_{1f}X_fY_fZ_f$ محور مختصات مرجع می‌باشد. اگر منحنی دایره فضایی که بر روی صفحه $X_1 - Y_1$ قرار دارد، حول محور X_1 به اندازه φ بچرخد یک سطح کروی را تشکیل می‌دهد و جابجایی این کره به اندازه ρ در استای محور Z_1 تشکیل یک استوانه را می‌دهد و این استوانه‌ی تشکیل شده، می‌تواند با زاویه θ حول محور Z_2 دوران پیدا کند که منجر به بوجود آمدن پروفیل غلتک می‌شود. پارامتر d در این شکل حداقل فاصله بین مرکز دایره فضایی در موقعیت اولیه خود و محور دوران غلتک می‌باشد و زاویه کج شدگی بین محور Z_f و محور Z_1 با مقدار a_0 تعریف می‌شود [۲].



شکل ۱-۳۵: محورهای مختصات غلتک و تشکیل پروفیل غلتک [۲]

¹ Envelop Theory

برای به دست آوردن پروفیل نهایی به روش انولوپ از رابطه‌ها و محاسبات مشخصی استفاده می‌شود (شکل ۱-۳۶).



شکل ۱-۳۶: سطح پروفیل به دست آمده از روش انولوپ [۲]

۱-۶-۵ پیشینه‌ی پژوهش

به علت تفاوت در خواص مکانیکی فلزات مختلف و با قطرها و ضخامت‌های متفاوت، مسأله تابگیری برای هر نوع آلیاژ و با توجه به فرآیند تولید آن شاید یک مسأله جدید باشد. در پژوهشی، به مسأله‌ی تابگیری و پیچیدگی‌های مرتبط با آن در لوله‌های فلزی، بدون درز و جدار نازک با قطر کم، پرداخته شده‌است. این مسأله از طریق شبیه سازی المان محدود^۱ (FEM) مورد تحلیل قرار گرفته و با استفاده از معیارهای آسیب شرایط بروز و رشد ترک در حین عملیات تابگیری مورد بررسی قرار گرفته و بر این اساس راه‌های جلوگیری از بروز آن پیشنهاد شده‌است. در سال ۲۰۱۲ هانگ^۲ و همکاران، در مقاله‌ای با موضوع شبیه‌سازی عددی فرآیند تابگیری مقطع لوله در دستگاه ۱۰ غلتکی برای لوله‌های بدون درز با قطر بالا، به عیوبی شامل تاب و خروج از گردی مقطع که در فرآیند عملیات حرارتی ایجاد می‌شود را مورد بررسی قرار داده است. شبیه‌سازی

^۱ Finite Element Method

^۲ Huang

با یک مدل غیرخطی در نرم‌افزار اجزا محدود، با در نظر گرفتن میزان تاب و خروج از گردی اولیه انجام شده‌است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در فرآیند تابگیری با دستگاه ده غلتکی، گردی بهبود می‌یابد و تنش و کرنش نقاط مختلف قابل محاسبه و تحلیل است [۱۳]. در مقاله‌ای ژانگ^۱ و همکاران یک مدل تنشی جدید در ناحیه‌ی تغییر شکل لوله‌های جدار نازک حین تابگیری ارائه کرده‌اند. کرنش ناحیه تغییرشکل لوله تحلیل و سپس آزمایش‌هایی طراحی و انجام شده‌است. نتیجه این مقاله نشان می‌دهد که محاسبات تئوری با آزمایش‌های تجربی تطابق خوبی دارد [۱۴]. در مقاله‌ای جانسون^۲ به تحلیل آرایش و نحوه‌ی قرارگیری غلتک‌ها در دستگاه‌های مختلف تابگیری پرداخته شده‌است. با معرفی دستگاه‌هایی شامل تابگیری دو غلتکی، شش غلتکی، تابگیری با غلتک‌های یکی در میان، به تحلیل آنها پرداخته است [۴]. در مقاله‌ای به بهینه‌سازی فرآیند تابگیری برای آلومینیوم با نرم‌افزار اجزا محدود و روش تاگوشی پرداخته شده‌است و با شبیه‌سازی فرآیند تابگیری چهارده غلتکی به بررسی بهینه‌زاویه‌ی غلتک‌ها و خروج از مرکز هر جفت غلتک پرداخته شده‌است [۱۵]. در خصوص غلتک‌های دستگاه تابگیری، یانگ^۳ به روش تئوری انولوپ^۴، پروفیل و انحنا‌ی غلتک‌های تابگیری بر اساس قطر خارجی لوله به‌دست آورده است [۲]. ما^۵ و همکاران [۸] یک روش برای طراحی سطح سه بعدی غلتک ارائه دادند، به این صورت که بردار عمود و بردار سرعت نسبی در نقطه تماس بین غلتک و جسم غلتانده شده بر یکدیگر عمود باشند. همچنین کاراسویچ^۶ و همکاران [۹] یک بررسی تئوری و عملی برای توسعه روشی برای تابگیری دقیق لوله‌های جدار نازک در ماشین‌های غلتکی انجام دادند. در مقاله‌ای به بررسی فاکتور میزان فشار غلتک و زاویه‌ی آن در تابگیری دو غلتکی پرداخته شده‌است و میزان فشاری که به سطوح قطعه وارد می‌شود، مورد بحث قرار گرفته است [۱۶].

در فصل اول این پایان نامه مبتنی بر موارد فوق‌الذکر شامل مروری بر بررسی‌های قبلی انجام یافته، تشریح روش و آزمایش‌ها انجام گرفته برای راستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی در فصل دوم، آزمایش‌های تجربی، در

¹ Zhang

² W. Johnson

³ Li, Ke-Yang

⁴ envelope theory

⁵ Ma

⁶ Karasevich

فصل سوم، شبیه سازی المان محدود، مباحث و نتایج در فصل چهارم و در نهایت جمع بندی و پیشنهادات در فصل پنجم است.

فصل ۲ روش تجربی

در این فصل در مورد شرایط لوله استفاده شده برای آزمون، مشخصات و تنظیمات دستگاه تابگیری، طراحی و روش انجام آزمون و نحوه به دست آوردن پروفیل غلتک مطالبی گفته خواهد شد.

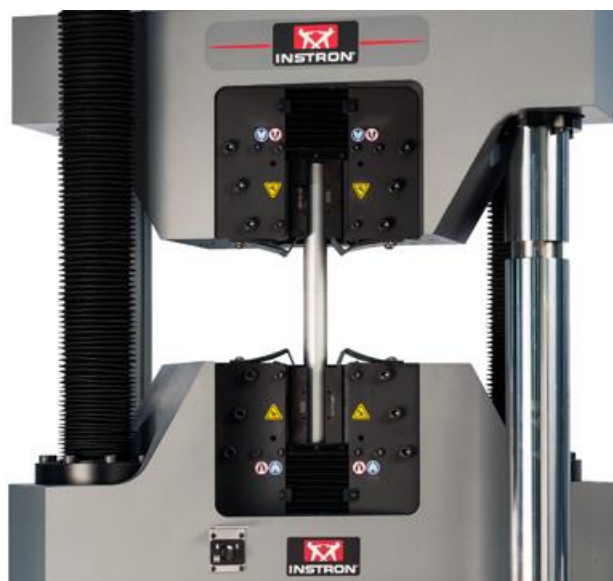
۲-۱- لوله‌ی بدون درز فلزی

لوله استفاده شده در آزمایش از جنس آلیاژ زیرکونیوم یک درصد نیوبیوم می‌باشد. ترکیب شیمیایی آن طبق جدول ۲-۱ می‌باشد. طول آن حدود ۱۲۰۰ mm، قطر خارجی ۹/۱ mm و قطر داخلی آن ۷/۷۵ mm می‌باشد. لوله از نوع جدار نازک و بدون درز می‌باشد.

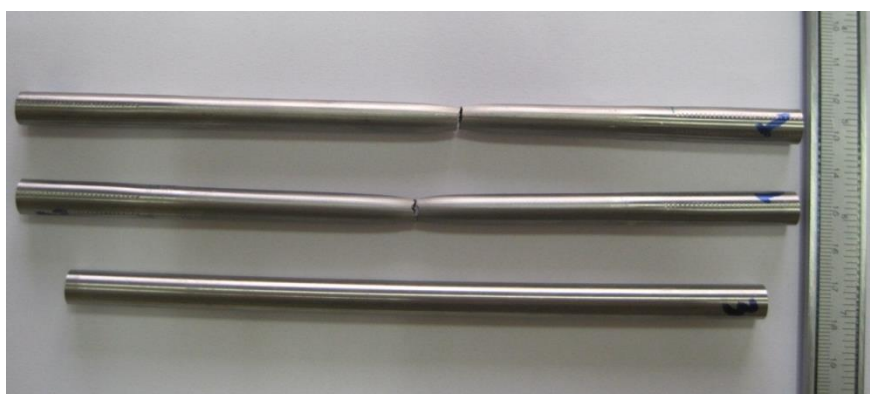
برای به دست آوردن خواص مکانیکی ماده مورد نظر ساده ترین راه انجام آزمایش کشش می‌باشد (شکل ۲-۱). تست کشش از روی نمونه‌ای از جنس لوله، طبق استاندارد ASTM E8 انجام می‌گیرد (شکل ۲-۲). لوله مورد آزمایش در مرحله عملیات نورد تولید و آنیل شده است (شکل ۲-۳).

مدول یانگ و نسبت پواسون با دستگاه اکستنسومتر^۱ لیزری و طبق استاندارد ASTM E111 به دست آمد (جدول ۲-۲).

¹ extensometer



شکل ۲-۱: دستگاه آزمایش کشش

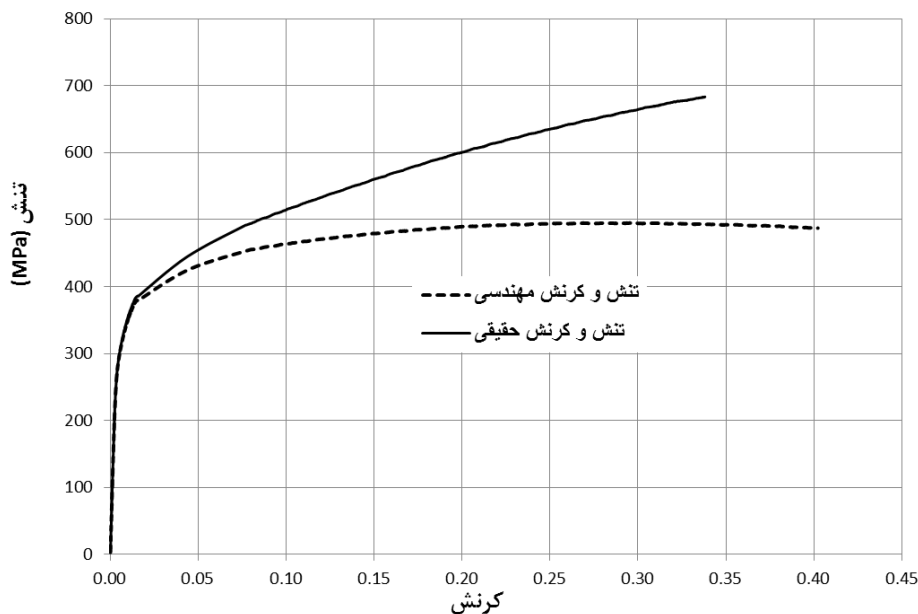


شکل ۲-۲: نمونه آزمایش کشش

جدول ۲-۱- ترکیب شیمیایی لوله

| No | Elements | Sample |
|----|----------|--------|
| ۱ | N | ۰/۰۰۴۹ |
| ۲ | Fe | ۰/۰۱۲ |
| ۳ | Si | ۰/۰۲۳ |
| ۴ | Ni | ۰/۰۰۲۴ |
| ۵ | Ti | ۰/۰۵۸ |

| | | |
|---|----|--------|
| ۶ | Cl | ۰/۰۰۸۶ |
| ۷ | Nb | ۱/۳۷ |
| ۸ | Zr | ۹۸/۴ |



شکل ۲-۳: منحنی تنش و کرنش

جدول ۲-۲- خواص مکانیکی لوله در آزمایش کشش

| چگالی ρ gr/cm ³ | استحکام تسلیم Y.S(MPa) | مدول یانگ E (GPa) | استحکام نهایی UTS (MPa) | نسبت یوآسون ν |
|------------------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| ۶/۶ | ۳۰۰ | ۸۶/۲ | ۶۲۶ | ۰/۳ |

۲-۱-۱ کاربرد و شرایط لوله

کاربرد این لوله در صنعت هسته‌ای و به عنوان غلاف سوخت می‌باشد. فرآیند تولید آن در قسمت تولید لوله‌های بدون درز توضیح داده شد. این لوله‌ها در حین فرآیند نورد سرد و عملیات حرارتی دارای تاب در طول می‌باشند. به دلیل اینکه میله‌های سوخت باید دارای تابی زیر ۰/۵ mm باشند، باید در مرحله نهایی تابگیری شوند. تاب اولیه لوله‌ها حدود ۱۰ mm در طول می‌باشند.

۲-۱-۲ مشخصات دستگاه تابگیری

تابگیری لوله‌ها با دستگاه ده غلتکی انجام می‌شود. نمای کلی دستگاه و اجزای قابل تنظیم دستگاه در شکل ۲-۴ مشخص است.



شکل ۲-۴: دستگاه تابگیری ده غلتکی: (۱) دسته تنظیم ارتفاع غلتک‌های بالا (۲) دسته تنظیم زاویه غلتک‌ها

(۳) دسته تنظیم ارتفاع غلتک‌های مرکزی پایین (۴) پتانسیومتر تغییر سرعت

۲-۱-۳ معرفی روش انجام طراحی آزمون

روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی^۱، در سال ۱۹۶۰ توسط پروفیسور تاگوچی معرفی شد. این روش می‌تواند با کمترین تعداد آزمایش‌ها، شرایط بهینه را تعیین کند و باعث کاهش چشمگیر زمان و هزینه انجام آزمایش‌ها مورد نیاز شود [۱۲].

در روش تاگوچی با توجه به تعداد پارامترهای انتخابی و سطوح مربوطه، از آرایه‌های متعامد مختلفی به عنوان ماتریس آزمایش‌ها استفاده می‌شود. در این روش تغییرات با عاملی به نام سیگنال به نویز^۲ معرفی

¹ Taguchi

² Signal to noise(S/N ratio)

می‌شود و آزمایشی که دارای بیشترین مقدار سیگنال به نویز باشد به عنوان شرایط بهینه انتخاب می‌شود [۱۲].

در ادامه برای توضیح بهتر فرآیند طراحی آزمایش‌ها، مراحل اجرایی روش تاگوچی به اختصار آورده شده‌است.

۱- انتخاب عوامل کنترلی^۱ و غیر کنترلی^۲ به همراه سطوح مربوطه.

عوامل کنترلی، در واقع پارامترهای ورودی مسئله هستند که به منظور رسیدن شرایط بهینه در طول آزمایش‌ها بر حسب سطوح انتخابی و ماتریس آزمایش‌ها تغییر می‌کنند. عوامل غیر کنترلی نیز به تمامی فاکتورهایی اطلاق می‌شود که باعث ایجاد تغییرات می‌شوند اما بر حسب شرایط در طی آزمایش‌ها ثابت فرض می‌گردند.

۲- محاسبه تابع زیان^۳ برای تعیین تغییرات موجود بین نتایج آزمایش‌ها و مقادیر مطلوب. این تابع با توجه به شرایط مسئله و به کمک فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود.

حالت اول: مقدار کوچکتر معرف حالت بهینه است:

$$SB = \frac{1}{n} \sum y_i^2 \quad (1-2)$$

حالت دوم: مقدار بزرگتر معرف حالت بهینه است:

$$LB = \frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \quad (2-2)$$

حالت سوم: اندازه اسمی مطلوب است:

$$NB = \frac{1}{n} \sum (y_i - y_0)^2 \quad (3-2)$$

که در آن n تعداد تکرارها و y_i ها خروجی‌های اندازه‌گیری شده و y_0 اندازه اسمی مطلوب است.

محاسبه مقادیر سیگنال به نویز کل برای هر یک خروجی‌ها طبق رابطه زیر:

¹ Signal factor

² Noise factor

³ Loos function

$$SN = -10 \log(L_i)$$

(۴-۲)

محاسبه مقدار سیگنال به نویز برای هر سطح از پارامترها: در روش تاگوچی سطوحی از پارامترها که دارای بیشترین مقادیر سیگنال به نویز هستند (بدون توجه به تابع زیان) به عنوان تابع بهینه معرفی می‌گردند.

۳- تعیین میزان اهمیت هر یک از پارامترها با استفاده از ابزار آماری آنالیز واریانس

۴- آنالیز داده‌ها و پیش بینی خروجی در حالت بهینه.

۵- انجام آزمایش تاییدی به منظور صحت‌گذاری و تصدیق نتایج به‌دست آمده.

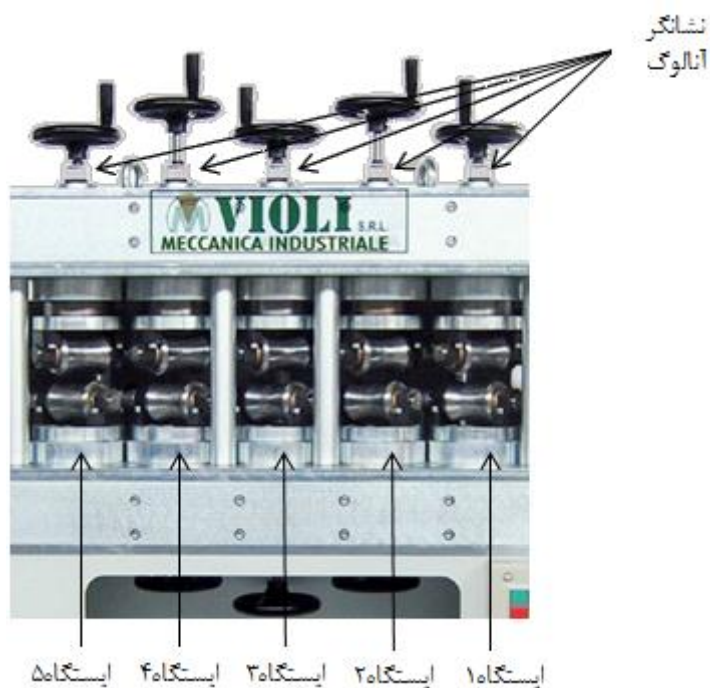
۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

۱-۲-۲ تعیین عوامل کنترلی و غیر کنترلی

در این فرآیند، پارامترهای خارج از مرکزی غلتک‌ها، زاویه غلتک‌ها، فشردگی غلتک‌ها و سرعت چرخش غلتک‌ها به عنوان عوامل کنترلی در نظر گرفته شدند. سایر پارامترها نظیر آنالیز متریال، تفاوت در میزان تاب لوله‌ها، خطای اپراتوری به عنوان عوامل غیر کنترلی لحاظ شدند و برای همین در طی انجام آزمایش‌ها ثابت گرفته شدند.

۲-۲-۲ خارج از مرکزی غلتک‌ها

در تجربه‌ی اپراتوری، خارج از مرکزی غلتک‌ها را به عنوان سینوس غلتک‌ها می‌شناسند (شکل ۲-۵). ترتیب سینوس، از زیاد به کم می‌باشد و فقط سه ایستگاه غلتک میانی قابلیت تغییر را دارند و ایستگاه غلتک ابتدا و آخر بدون تغییر و در یک راستا می‌باشند (شکل ۲-۶). هر کدام از این سه ایستگاه غلتک میانی، فاکتور موثر و قابل تغییر در فرآیند تابگیری می‌باشند ولی به دلیل اینکه ترتیب خاصی در تنظیم یعنی از بیشتر به کمتر باید رعایت شود و عکس آن اشتباه است، به ناچار سه ایستگاه غلتک میانی یک فاکتور و تنظیمات ارتفاع قابل تنظیم، به عنوان سطوح آن در نظر گرفته شد. (جدول ۲-۳)

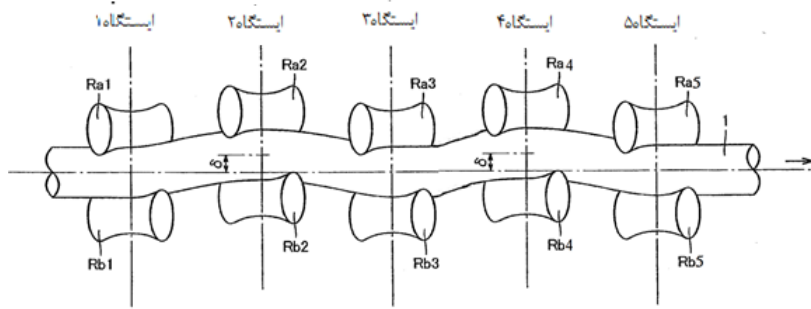


شکل ۲-۵: شماره گذاری جفت غلتک‌ها (ایستگاه‌ها) و نشانگر آنالوگ

جدول ۲-۳- سطوح قابل تنظیم ارتفاع جفت غلتک‌های (ایستگاه‌های) ۲، ۳، ۴

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| سطح | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
| تنظیم | ۱۰۱ | ۲۰۱ | ۲۰۲ | ۳۰۱ | ۳۱۲ | ۴۰۱ | ۳۰۲ | ۳۰۳ | ۴۰۲ | ۴۰۴ | ۴۲۳ | ۴۲۴ |
| سطح | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ | ۱۸ | ۱۹ | ۲۰ | ۲۱ | ۲۲ | ۲۳ | ۲۴ |
| تنظیم | ۲۱۲ | ۳۲۱ | ۴۰۳ | ۴۱۳ | ۴۲۱ | ۴۳۲ | ۱۲۳ | ۲۳۴ | ۳۱۳ | ۳۲۳ | ۴۱۴ | ۴۳۴ |

۲۴ سطح، برای ایستگاه غلتک‌های ۲، ۳، ۴، قابل تنظیم بر روی دستگاه تابگیری، انتخاب شد. برای مثال در سطح شماره ۶، عدد تنظیم آن ۴۰۱ است، یعنی ایستگاه شماره ۲ باید ۴ mm بالاتر از مرکز، ایستگاه شماره ۳ باید صفر میلیمتر و بدون تغییر و ایستگاه شماره ۴ باید ۱ mm بالاتر از مرکز تنظیم شود.



شکل ۲-۶: خارج از مرکزی غلتک‌ها با δ مشخص شده‌است

همانطور که در شکل ۲-۵ مشخص است، بر روی دسته غلتک‌های بالا یک نشانگر آنالوگ نصب است که می‌توان تغییر ارتفاع غلتک را با آن مشاهده نمود.

۲-۲-۳ زاویه غلتک‌ها

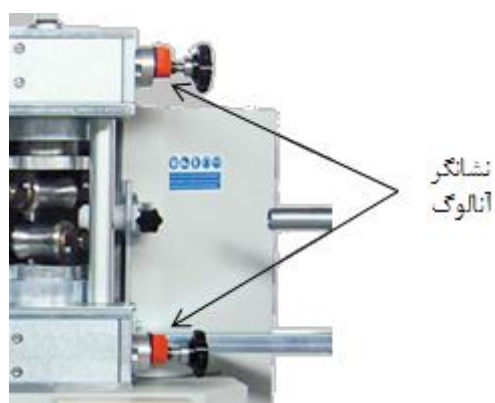
همانگونه که در مقدمه توضیح داده شد، غلتک‌ها نسبت به راستای لوله زاویه‌ی مشخصی دارند. زاویه تنظیمی بستگی به قطر لوله دارد. اگر زاویه بیش از اندازه باشد، تماس نقطه‌ای و ممکن است، لوله دارای اعوجاج شود. اگر از یک حدی زاویه کمتر باشد، ممکن است لوله به سر غلتک‌ها برخورد کند و یا از بین غلتک‌ها خارج شود.

زاویه قابل تنظیم در جدول ۲-۴ آورده شده‌است.

جدول ۲-۴- سطوح قابل تنظیم زاویه غلتک‌های بالا و پایین

| سطح | ۱ | ۲ | ۳ |
|-------|------------|------------|------------|
| تنظیم | 28° | 30° | 32° |

زاویه تنظیمی برای غلتک‌های پایین و بالا مانند هم می‌باشند (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷: زاویه α غلتک‌ها و نشانگر آنالوگ زاویه

۴-۲-۲ فشردگی غلتک‌ها

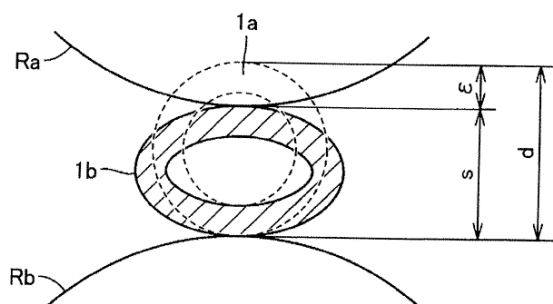
وقتی لوله با غلتک مماس شد، تمامی غلتک‌های بالا به اندازه یکسان و مشخصی پایین می‌آید. میزان فشردگی اگر از حدی کم باشد، لوله مستقیم نمی‌شود و اگر زیاد باشد، باعث شکستگی در لوله می‌شود (شکل ۲-۸).

فشردگی توسط دسته غلتک‌های بالایی و میزان آن با نشان گر کنترل می‌شود.

میزان فشردگی در سه سطح جدول ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۲-۵- میزان فشردگی غلتک‌ها

| سطح | ۱ | ۲ | ۳ |
|-----------------|-----|-----|-----|
| ϵ (mm) | ۰/۲ | ۰/۴ | ۰/۶ |



شکل ۲-۸: لوله فشرده شده توسط غلتک‌های بالایی

۵-۲-۲ سرعت چرخش غلتک‌ها

هماتطور که قبلاً توضیح داده شد، غلتک‌های بالا و پایین هر کدام با یک محرک شروع به چرخیدن می‌کنند. هر دو موتور با یک درایو می‌توانند تغییر دور داشته باشند. بر روی دستگاه یک پتانسیومتر تعبیه شده که دارای شماره ۰ تا ۱۰ خط کشی شده است (شکل ۲-۹).
سرعت بالا در تابگیری باعث عدم تابگیری صحیح، آسیب به غلتک‌ها و لوله می‌شود. تنظیم سرعت غلتک‌ها در جدول ۶-۲ مشخص شده است.

جدول ۶-۲- تنظیمات پتانسیومتر و سرعت خطی لوله

| سطح | ۱ | ۲ | ۳ |
|----------------------|----|----|----|
| تنظیم پتانسیومتر | ۲ | ۴ | ۶ |
| سرعت خطی لوله (mm/S) | ۱۰ | ۲۰ | ۳۰ |



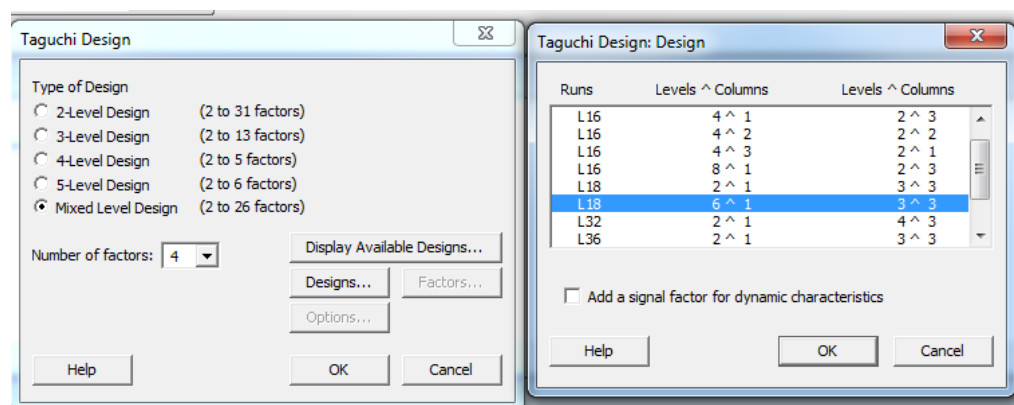
شکل ۲-۹: پتانسیومتر تغییر سرعت

۱-۲-۲ نرم‌افزار مینی تب^۱

برای طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار مینی تب ۱۷ استفاده شد. نرم‌افزار مینی تب یک نرم‌افزار آماری می‌باشد، که توانایی انجام محاسبات آماری از ابتدایی تا پیشرفته را دارد.

¹ MINITAB

به دلیل اینکه تعداد سطح خارج از مرکزی غلتکها با تعداد بقیه سطحها تفاوت دارد و دارای ۲۴ سطح می باشد و سه فاکتور دیگر دارای سه سطح می باشد، تنها حالتی را می توان استفاده کرد که سه فاکتور، دارای ۳ سطح و یک فاکتور، دارای ۶ سطح باشد (شکل ۲-۱۰). با این شرایط تصمیم بر این شد که چهار مرحله طراحی انجام شود، بدین صورت که فاکتور سینوس که دارای ۲۴ سطح است را چهار بار شش‌تایی با دیگر سطوح مورد آزمایش قرار گیرد.



شکل ۲-۱۰: محدودیت طراحی سه ستون سه سطحی و یک ستون شش سطحی

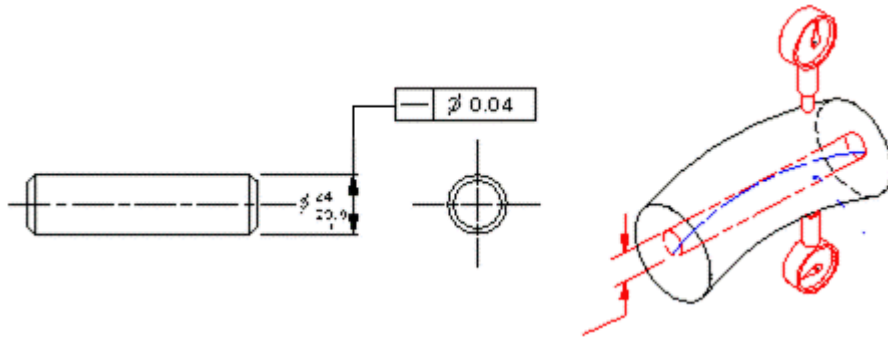
سطوح مشخص شده هر فاکتور، ثبت در نرم افزار شد و در هر طراحی، ۱۸ آزمایش باید انجام گیرد که در مجموع ۷۲ آزمایش می باشد. آزمایشها در فرم چک نویسی آماده شد و تحویل اپراتور دستگاه قرار گرفت. پاسخ هر کدام از آزمایشها به صورت میزان تاب خروجی از دستگاه می باشد.

۲-۲-۲ کنترل میزان تاب خروجی

تلرانس مستقیمی^۱ بر دو نوع است. (۱) مستقیمی محور قطعه کار (۲) مستقیمی سطح قطعه کار

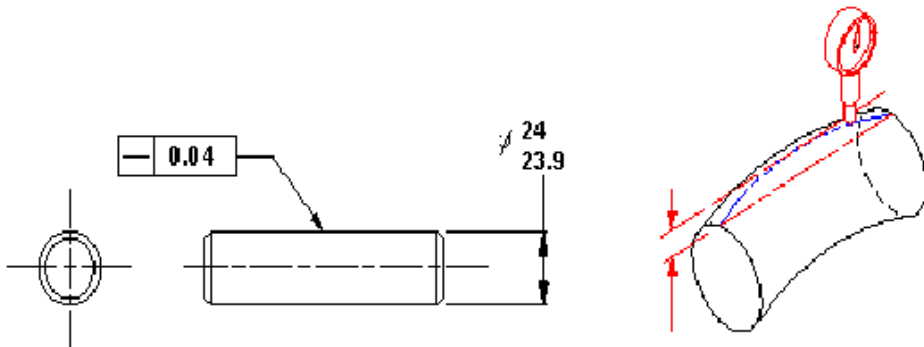
(۱) مستقیمی محور قطعه: در این نوع تلرانس علامت مستقیمی بر روی خط اندازه گذاشته می شود و اندازه مجاز نوشته شده نماینگر این است که مستقیمی محور قطعه نباید از تلرانس اندازه خارج شود (شکل ۲-۱۱).

¹ Straightness



شکل ۲-۱۱: نحوه نمایش تفرانس مستقیمی روی محور قطعه

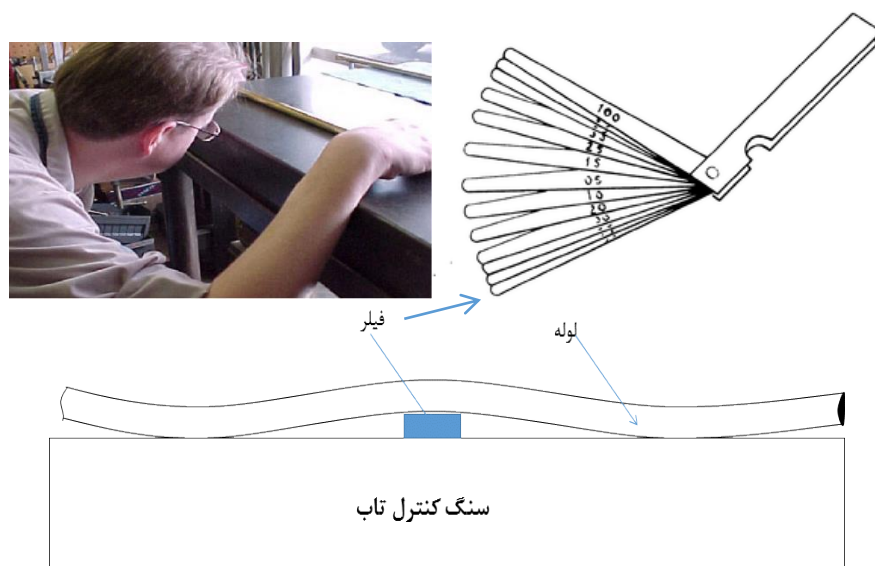
۲) مستقیمی سطح قطعه کار: در این نوع تفرانس علامت مستقیمی بر روی سطح قطعه گذاشته می‌شود و اندازه مجاز نوشته شده نماینگر این است که مستقیمی سطح قطعه نباید از تفرانس اندازه خارج شود (شکل ۲-۱۲).



شکل ۲-۱۲: نحوه نمایش تفرانس مستقیمی روی سطح قطعه

تفرانس مستقیمی لوله‌ها از نوع دوم می‌باشد که نحوه اندازه‌گیری محدوده تفرانس توضیح داده می‌شود. بعد از عملیات تابگیری، یک وسیله به نام صفحه سنگ کنترل مستقیمی لوله و میله وجود دارد (شکل ۲-۱۳) که شامل یک سنگ صاف با طول بلند است. جنس آن از گرانیت و ابعاد $400 \times 400 \times 500 \text{ mm}^3$ که روی یک میز قرار دارد و سطح آن مقدار شیب بسیار کم، تختی 0.02 mm دارد. (همچنین می‌توان از یک سطح کامل صاف و مسطح و به اندازه کافی بزرگ استفاده کرد). برای مشاهده و اندازه‌گیری تاب لوله مورد نظر، آن را روی سنگ قرار داده و در جهت عرض، لوله را می‌غلطانند. حداکثر قوسی که نور بیشتری از آن

عبور کرد را مد نظر قرار داده و با فیلر^۱ با ضخامت‌های مختلف، تاب آن را مشخص می‌کنند. همانطور که گفته شد مقدار قابل قبول، به شرایط کاری لوله بستگی دارد. اگر لوله دارای انحنا نباشد، به سادگی روی سنگ می‌گلتد و به حرکت خود ادامه می‌دهد.



شکل ۲-۱۳: اندازه‌گیری انحنای لوله روی صفحه سنگ صافی

۲-۲-۳ انجام آزمون و ثبت نتایج در نرم‌افزار

قبل از انجام آزمون، ۷۲ عدد لوله حدود یک متری انتخاب شد و برای یکنواختی تاب در همه‌ی لوله‌ها با دستگاه پیش‌تاب‌گیر یک تاب ۱۰ mm در طول لوله‌ها ایجاد شد. این تاب به صورت کمان (شمشیری) می‌باشد (شکل ۲-۱۴). پس از انجام آزمایش‌ها و ثبت نتایج در فرم، اطلاعات دیگری شامل میزان تاب در انتها و ابتدا، ضربه‌های وارد شده به غلتک‌ها و خم شدن لوله ثبت شد (شکل ۲-۱۵).

میزان تاب چهار مرحله آزمون وارد فرم شد و در ستون توضیحات، میزان تاب در قسمت سر یا ته لوله و برخورد لوله با غلتک‌ها نوشته شد.

مراحل و نتایج خروجی‌ها در شکل‌های زیر مشخص است.



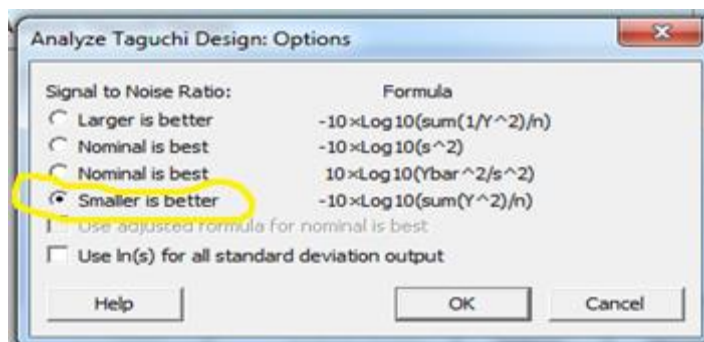
شکل ۲-۱۴: لوله‌ی شمشیری

¹ Feeler

| ردیف | Sm | RoAngle | Compression | Ro AngularVel | پاسخ | توضیحات | ردیف | Sm | RoAngle | Compression | Ro AngularVel | پاسخ | توضیحات |
|------|-----|---------|-------------|---------------|------|------------------------------|------|-----|---------|-------------|---------------|------|-----------------------------|
| ۱ | ۱۰۱ | ۲۰ | ۰/۲ | ۲ | ۰/۱ | (سر لوله) | ۱ | ۴۱۳ | ۳۰ | ۰/۲ | ۲ | ۲/۸۵ | (سر لوله) |
| ۲ | ۱۰۱ | ۲۸ | ۰/۴ | ۴ | ۱/۵ | (سر لوله) | ۲ | ۴۱۳ | ۲۸ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۵ | برخورد با غلتک(سر لوله) |
| ۳ | ۱۰۱ | ۳۲ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۵ | (ته لوله) | ۳ | ۴۱۳ | ۳۲ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۱ | برخورد با غلتک(سر لوله) |
| ۴ | ۲۰۱ | ۳۰ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۹ | (سر لوله) | ۴ | ۴۰۳ | ۳۰ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۵ | (سر لوله) |
| ۵ | ۲۰۱ | ۲۸ | ۰/۴ | ۶ | ۱/۵ | برخورد شدید با غلتک(سر لوله) | ۵ | ۴۰۳ | ۲۸ | ۰/۴ | ۶ | ۰/۳ | (سر لوله) |
| ۶ | ۲۰۱ | ۳۲ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۸ | (سر لوله) | ۶ | ۴۰۳ | ۳۲ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۹ | (ته لوله) |
| ۷ | ۳۰۱ | ۳۰ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۹ | (ته لوله) | ۷ | ۳۲۱ | ۳۰ | ۰/۴ | ۲ | ۱ | |
| ۸ | ۳۰۱ | ۲۸ | ۰/۶ | ۴ | ۱/۵ | انحراف و برخورد شدید با غلتک | ۸ | ۳۲۱ | ۲۸ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۸ | (ته لوله) |
| ۹ | ۳۰۱ | ۳۲ | ۰/۲ | ۶ | ۰/۳ | (سر لوله) | ۹ | ۳۲۱ | ۳۲ | ۰/۲ | ۶ | ۰/۹ | برخورد با غلتک(ته لوله) |
| ۱۰ | ۴۰۱ | ۳۰ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۸ | (سر لوله) | ۱۰ | ۴۲۳ | ۳۰ | ۰/۶ | ۶ | ۱۰ | خم شدن لوله |
| ۱۱ | ۴۰۱ | ۲۸ | ۰/۲ | ۲ | ۱۰ | (سر لوله) | ۱۱ | ۴۲۳ | ۲۸ | ۰/۲ | ۲ | ۱/۵ | (سر لوله) |
| ۱۲ | ۴۰۱ | ۳۲ | ۰/۴ | ۴ | ۱/۸ | برخورد با غلتک(ته لوله) | ۱۲ | ۴۲۳ | ۳۲ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۴ | (ته لوله) |
| ۱۳ | ۲۰۲ | ۳۰ | ۰/۴ | ۶ | ۰/۳ | (ته لوله) | ۱۳ | ۴۲۱ | ۳۰ | ۰/۴ | ۶ | ۰/۸ | (ته لوله) |
| ۱۴ | ۲۰۲ | ۲۸ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۳ | (سر لوله) | ۱۴ | ۴۲۱ | ۲۸ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۱ | برخورد با غلتک(ته لوله) |
| ۱۵ | ۲۰۲ | ۳۲ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۸ | (سر لوله) | ۱۵ | ۴۲۱ | ۳۲ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۹ | (ته لوله) |
| ۱۶ | ۳۱۲ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۵ | (سر لوله) | ۱۶ | ۲۱۲ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ | ۱/۵ | (سر لوله) |
| ۱۷ | ۳۱۲ | ۲۸ | ۰/۲ | ۶ | ۱/۱ | (سر لوله) | ۱۷ | ۲۱۲ | ۲۸ | ۰/۲ | ۶ | ۱/۵ | ترک لوله |
| ۱۸ | ۳۱۲ | ۳۲ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۳ | برخورد با غلتک(ته لوله) | ۱۸ | ۲۱۲ | ۳۲ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۳ | (ته لوله) |
| ۱ | ۳۰۲ | ۳۰ | ۰/۲ | ۲ | ۰/۱ | (سر لوله) | ۱ | ۳۲۳ | ۳۰ | ۰/۲ | ۲ | ۲/۲ | (سر لوله) |
| ۲ | ۳۰۲ | ۲۸ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۳ | برخورد شدید با غلتک(ته لوله) | ۲ | ۳۲۳ | ۲۸ | ۰/۴ | ۴ | ۲/۷ | برخورد با غلتک(سر لوله) |
| ۳ | ۳۰۲ | ۳۲ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۲ | (سر لوله) | ۳ | ۳۲۳ | ۳۲ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۱ | (ته لوله) |
| ۴ | ۴۰۲ | ۳۰ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۸ | (ته لوله) | ۴ | ۳۱۳ | ۳۰ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۵ | (سر لوله) |
| ۵ | ۴۰۲ | ۲۸ | ۰/۴ | ۶ | ۰/۸ | برخورد شدید با غلتک(سر لوله) | ۵ | ۳۱۳ | ۲۸ | ۰/۴ | ۶ | ۲/۲ | برخورد با غلتک(سر لوله) |
| ۶ | ۴۰۲ | ۳۲ | ۰/۶ | ۲ | ۱/۵ | برخورد شدید با غلتک(ته لوله) | ۶ | ۳۱۳ | ۳۲ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۱۵ | گیر کردن در دستگاه(سر لوله) |
| ۷ | ۳۰۳ | ۳۰ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۶ | (ته لوله) | ۷ | ۴۱۴ | ۳۰ | ۰/۴ | ۲ | ۱ | (سر لوله) |
| ۸ | ۳۰۳ | ۲۸ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۸ | برخورد شدید با غلتک(سر لوله) | ۸ | ۴۱۴ | ۲۸ | ۰/۶ | ۴ | ۱ | برخورد با غلتک(سر لوله) |
| ۹ | ۳۰۳ | ۳۲ | ۰/۲ | ۶ | ۰/۳ | (سر لوله) | ۹ | ۴۱۴ | ۳۲ | ۰/۲ | ۶ | ۶ | برخورد با غلتک(سر لوله) |
| ۱۰ | ۴۲۴ | ۳۰ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۹ | (سر لوله) | ۱۰ | ۴۳۴ | ۳۰ | ۰/۶ | ۶ | ۰/۷ | (سر لوله) |
| ۱۱ | ۴۲۴ | ۲۸ | ۰/۲ | ۲ | ۱/۵ | (سر لوله) | ۱۱ | ۴۳۴ | ۲۸ | ۰/۲ | ۲ | ۲/۱ | (سر لوله) |
| ۱۲ | ۴۲۴ | ۳۲ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۲ | (ته لوله) | ۱۲ | ۴۳۴ | ۳۲ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۳ | (سر لوله) |
| ۱۳ | ۴۰۴ | ۳۰ | ۰/۴ | ۶ | ۱/۱۵ | (ته لوله) | ۱۳ | ۱۲۳ | ۳۰ | ۰/۴ | ۶ | ۰/۹ | (ته لوله) |
| ۱۴ | ۴۰۴ | ۲۸ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۸ | (سر لوله) | ۱۴ | ۱۲۳ | ۲۸ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۳ | (سر لوله) |
| ۱۵ | ۴۰۴ | ۳۲ | ۰/۲ | ۴ | ۱/۹۵ | برخورد با غلتک(ته لوله) | ۱۵ | ۱۲۳ | ۳۲ | ۰/۲ | ۴ | ۰/۸ | (سر لوله) |
| ۱۶ | ۴۲۳ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۸ | (ته لوله) | ۱۶ | ۲۳۴ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۶ | (سر لوله) |
| ۱۷ | ۴۲۳ | ۲۸ | ۰/۲ | ۶ | ۱/۹ | (سر لوله) | ۱۷ | ۲۳۴ | ۲۸ | ۰/۲ | ۶ | ۲۰ | (ته لوله) |
| ۱۸ | ۴۲۳ | ۳۲ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۱ | برخورد با غلتک(سر لوله) | ۱۸ | ۲۳۴ | ۳۲ | ۰/۴ | ۲ | ۶ | برخورد با غلتک(سر لوله) |

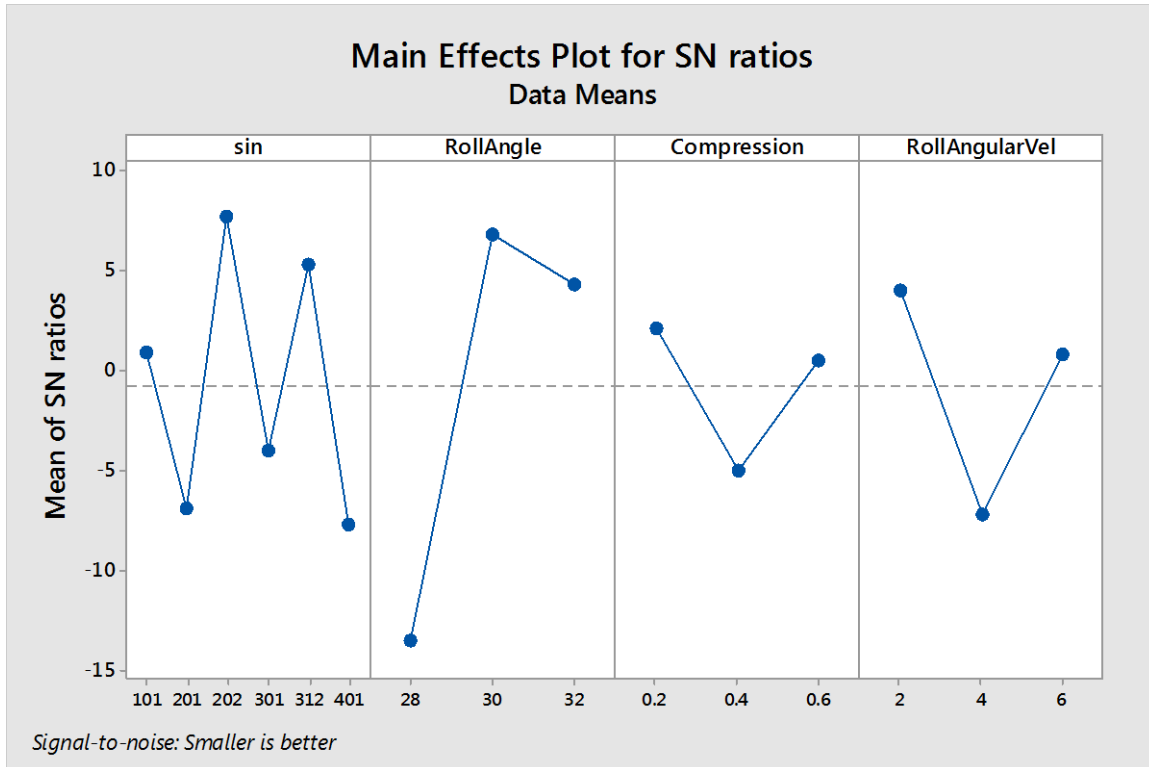
شکل ۲-۱۵: فرم ثبت نتایج آزمون‌ها

مطالبی که در قسمت توضیحات جدول فوق آمده، مشخص کننده تاب خروجی در سر یا ته لوله است. در مرحله آنالیز، خروجی را بر روی "کمترین جواب بهتر می‌باشد" قرار می‌دهیم (شکل ۲-۱۶).

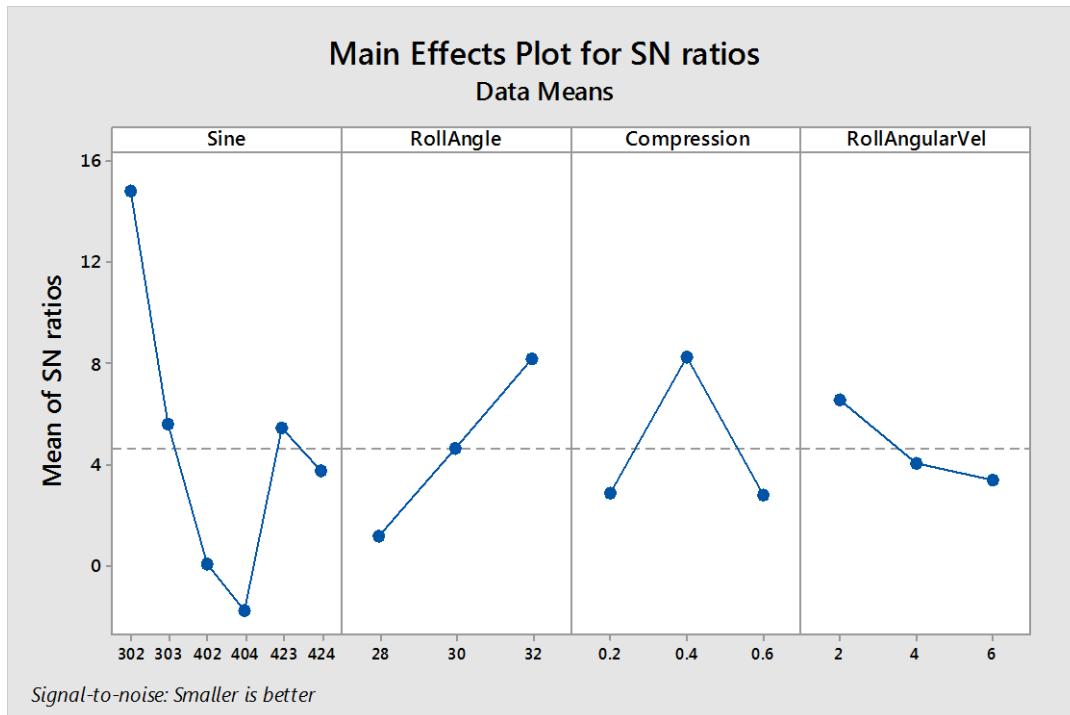


شکل ۲-۱۶: قرار دادن خروجی روی کمترین

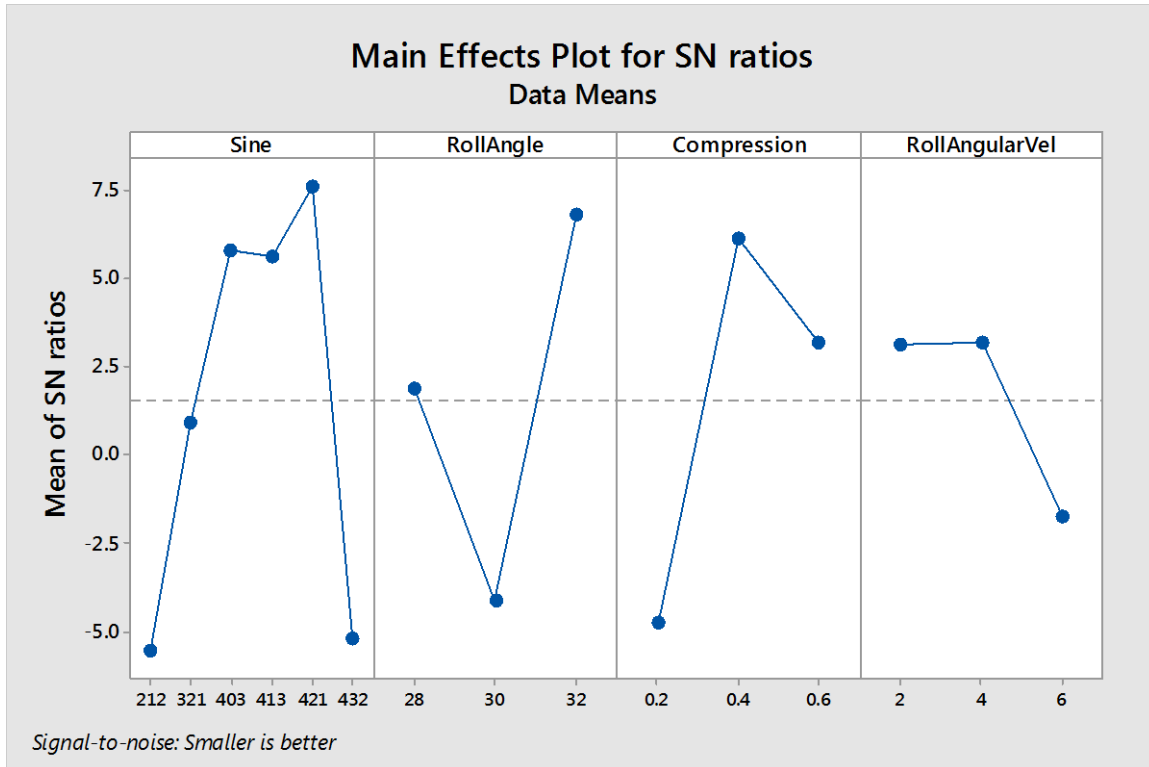
نمودارهای سیگنال به نویز در نرم‌افزار به دست می‌آید (شکل ۲-۱۷، ۲-۱۸، ۲-۱۹، ۲-۲۰).



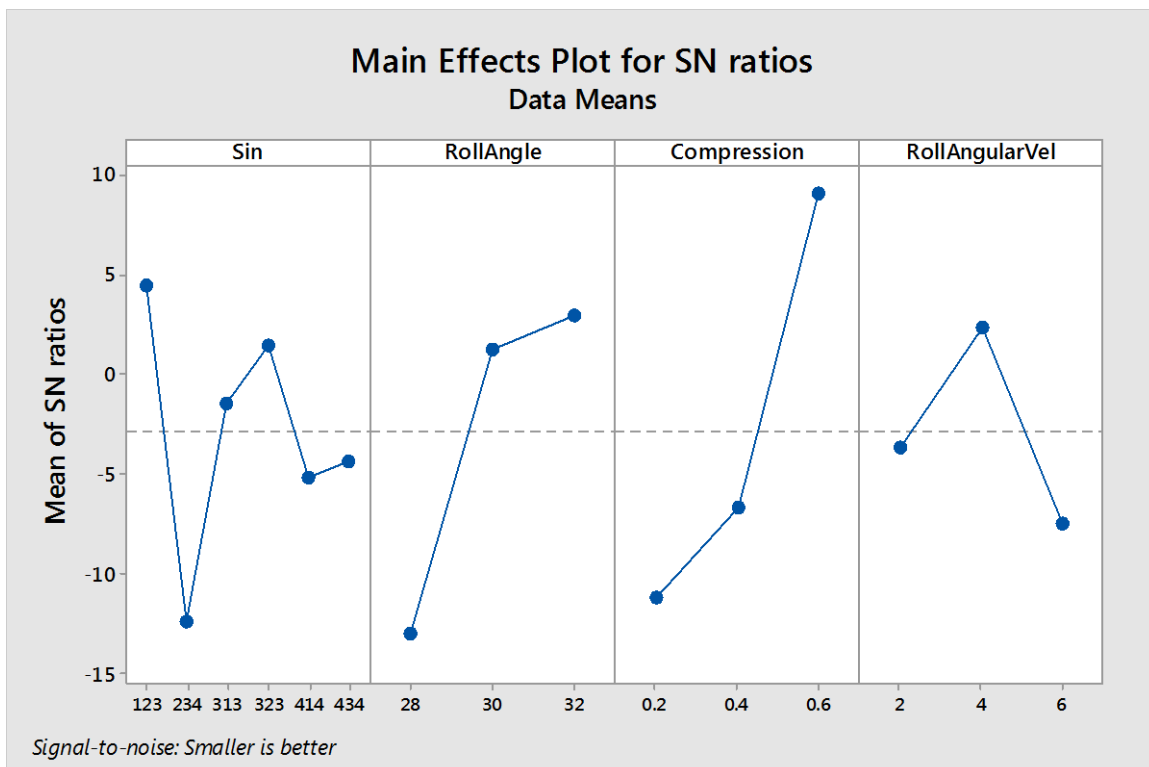
شکل ۲-۱۷: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۱



شکل ۲-۱۸: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۲



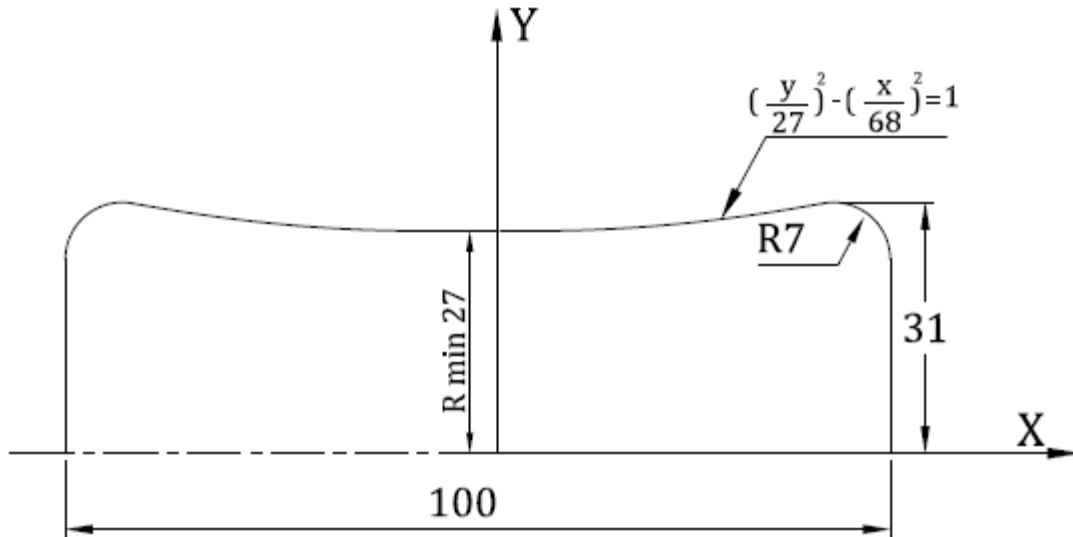
شکل ۲-۱۹: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۳



شکل ۲-۲۰: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون ۴

۴-۲-۲ تعیین پروفیل غلتک

فرم منحنی غلتک‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند، زیرا اثر تماسی زیادی روی غلتک‌ها می‌گذارد. پروفیل یکی از غلتک‌های یدکی دستگاه، با دستگاه اندازه‌گیری CMM^۱ تعیین شد. پروفیل اندازه‌گیری شده به صورت ابر نقاط، وارد نرم‌افزار سالیدورکس^۲ شد. در نرم‌افزار، با فیت کردن بهترین خطی که از تمام نقاط بگذرد، معادله منحنی هایپربولیک^۳ پروفیل به دست آمد. (شکل ۲-۲۱)



شکل ۲-۲۱: معادله منحنی پروفیل و ابعاد غلتک

¹Coordinate Measuring Machine

²SOLIDWORKS

³Hyperbolic

فصل ۳ شبیه سازی المان محدود

یکی از مهمترین موضوعات مورد نظر در این پروژه تحلیل فرآیند شبیه سازی تابگیری لوله‌ها با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزارهای مرتبط می‌باشد. در این قسمت روند شبیه سازی به صورت گام به گام شرح داده می‌شود. چگونگی اندازه‌گیری انحنای لوله‌ها قبل و بعد از عملیات تابگیری، مقدار انحنای قابل قبول برای لوله، انجام آزمایش‌ها و شبیه سازی‌های مختلف، همچنین تغییر در مقدار جابجایی غلتک‌ها و نیروی اعمالی، تغییر در زاویه انحراف غلتک‌ها، مقدار خارج از مرکزی آنها و بررسی نتایج مربوطه، در این قسمت توضیح داده می‌شود.

کلیه این شبیه سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS V14.1 انجام شده و در نهایت نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها عملی با شبیه سازی‌های صورت گرفته مقایسه و بررسی شده‌اند.

۳-۱- نرم‌افزار آباکوس

با پیشرفت روز افزون امکانات نرم‌افزاری و سخت افزاری در چند دهه اخیر، استفاده از نرم‌افزارهای اجزاء محدود در حل مسائل علوم مهندسی پیشرفت قابل توجهی پیدا کرده است. از این میان می‌توان به نرم‌افزارهای ANSYS, NASTRAN, ABAQUS... اشاره کرد.

اولین بار در سال ۱۹۷۸ این نرم‌افزار به دلیل قدرت در تحلیل‌های هم‌زمان خزش و وابسته به دما، پلاستیسیته و تماس، در صنعت هسته‌ای استفاده شد. قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، نسبت به سایر

نرم افزارهای اجزاء محدود مشابه، در داشتن رویه های حل صریح^۱، ضمنی^۲ (خصوصاً صریح)، دارا بودن مدل های رفتاری پیشرفته و متنوع برای مواد مختلف (فلزات، لاستیک، بتن، خاک، سنگ، سیالات و...) امکان ایجاد سریع مدل های با هندسه پیچیده و... می باشد. همچنین این بسته نرم افزاری به خاطر قابلیت گسترده در مدل سازی مواد مختلف و نیز توانایی سفارشی کردن^۳ آن به وسیله برنامه نویسی، در محیط های تحقیقاتی آکادمیک بسیار محبوبیت دارد. به همین خاطر در چند سال گذشته این نرم افزار توجه بسیاری از محققین و صنعتگران را به خود جلب کرده است. این نرم افزار در رشته های مهندسی مکانیک، مهندسی عمران، و مهندسی مواد کاربردهای زیادی دارد [۱۱].

این بسته نرم افزاری دارای سه محصول اصلی می باشد که عبارتست از:

۱. آباکوس استاندارد: که با استفاده از آن می توان گستره وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و... را تحلیل کرد. روش حل مسائل در این قسمت به صورت ضمنی می باشد.

۲. آباکوس صریح: این محصول برای مدل سازی مسائل دینامیکی گذرا مانند برخورد^۴، انفجار، مچالگی^۵ و همچنین مسائل شبه استاتیکی یا مسائل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می کند مانند شکل دهی مناسب تر است. روش حل مسائل در این محصول به صورت صریح می باشد.

۳. آباکوس CAE^۶: این قسمت به عنوان یک رابط گرافیکی برای کاربر تعریف شده است که به کمک آن می تواند یک مدل هندسی را سریعاً و بدون نیاز به نوشتن دستورات بسازد و یا از یک نرم افزار مدل سازی دیگر وارد کند. همچنین به کمک این بخش می توان به سادگی مدل هندسی را گسسته سازی، خواص مواد را تعریف، شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص کرد و نتایج را به صورت کاملاً گرافیکی مشاهده و بررسی کرد [۱۱].

به منظور ایجاد یک شبیه سازی کامل لازم است ابتدا قطعات مورد نظر در نرم افزار مدل سازی و ترسیم شوند. سپس خواص مکانیکی قطعات تعیین شوند، و در ادامه قطعات به طور صحیح در موقعیت مناسب خود

1 Explicit

2 Implicit

3 Customize

4 Impact

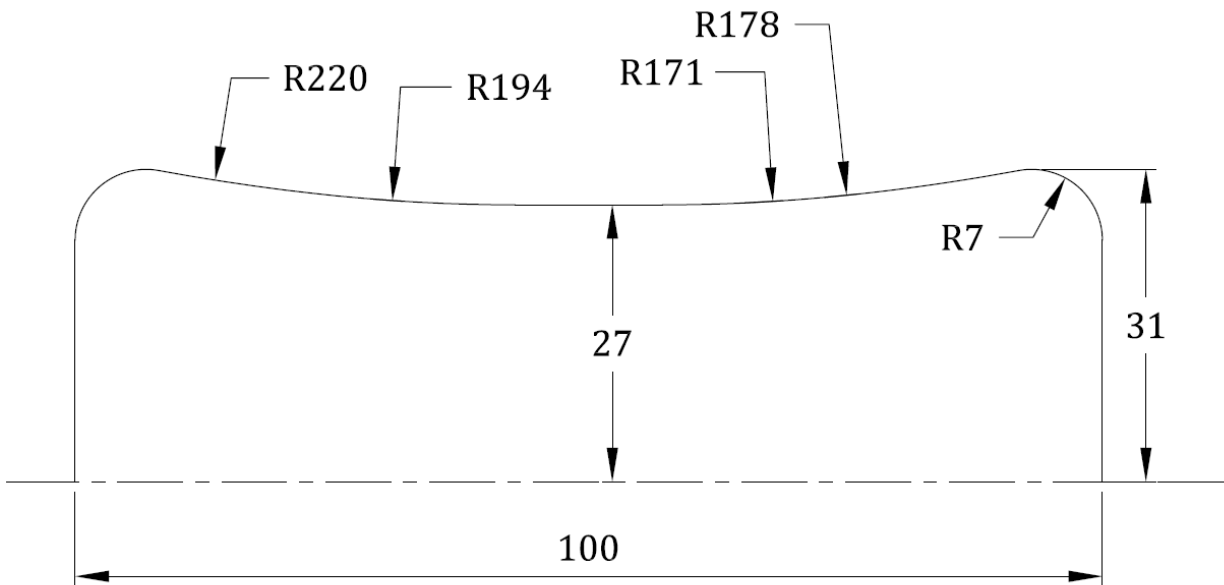
5 Crushing

6 Computer-Aided Engineering

مونتاز شده و به ایجاد شرایط مرزی و بارگذاری مناسب پرداخته شود. برای شروع تحلیل لازم است هندسه به ابعاد کوچکتر تقسیم شده و در نهایت حل مسئله آغاز و نتایج توسط کاربر مشاهده شود.

۳-۲- مدل سازی

به منظور انجام شبیه سازی، قبل از هرکاری لازم است قطعات مورد نیاز در نرم افزار آباکوس مدل سازی شود. مهمترین قطعه‌ای که در این شبیه سازی موثر می‌باشد لوله مورد تحلیل می‌باشد که باید مطابق با نمونه مورد آزمایش عملی مدل سازی شود. این مدل هم می‌تواند به صورت لوله جدار نازک با استفاده از پوسته^۱ و هم به صورت جامد^۲ و لوله با ضخامت مشخص ترسیم شود. پس از آن به مدل سازی غلتک‌ها و لوله‌های راهنما در ورودی و خروجی برای جلوگیری از حرکت اضافی لوله انجام می‌شود. منحنی غلتک به صورت چند شعاع از دایره به دست آمد (شکل ۳-۱). سپس به صورت سطح صلب تحلیلی^۳ مدل سازی شد (شکل ۳-۲).

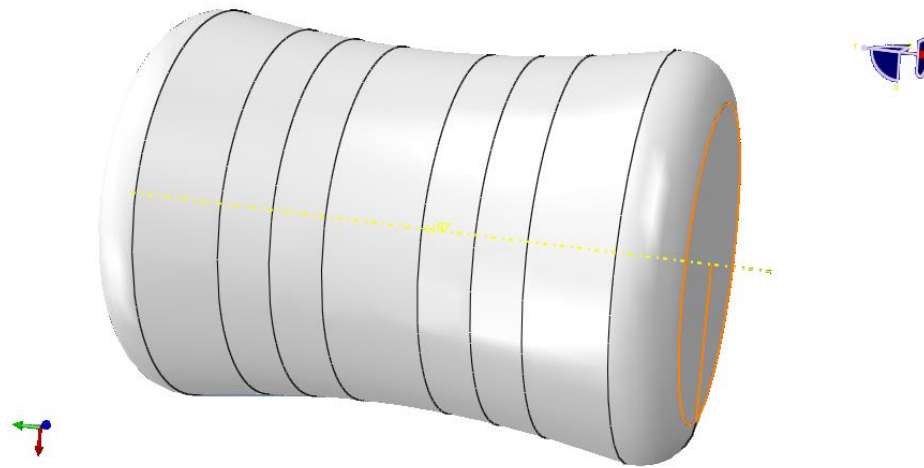


شکل ۳-۱: پروفیل غلتک در نرم افزار آباکوس

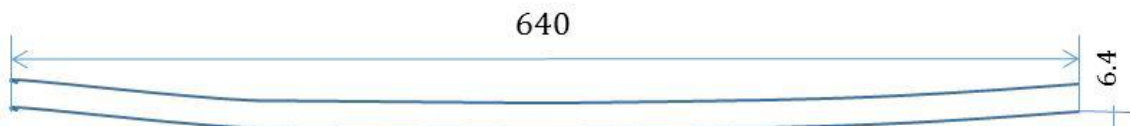
¹ SHELL

² SOLID

³ Analitical Rigid



شکل ۳-۲: مدل غلتک در نرم افزار آباکوس



شکل ۳-۳: طول و میزان غیر مستقیمی لوله در نرم افزار آباکوس

لوله به صورت جدار نازک و سه بعدی در نظر گرفته و به وسیله‌ی المان پوسته تغییر شکل پذیر S4R DEFORMABLE,SHELL,3D با قطر خارجی $9/1$ mm و طول 640 mm در نرم افزار مدل سازی شده است. برای صرفه جویی در حجم محاسبات، طول لوله به اندازه فاصله بین ایستگاه‌های دستگاہ تابگیری که 640 mm است، قرار داده شد. همچنین ضخامت آن به اندازه $0/675$ mm وارد شد. انحنای لوله قبل از تحلیل به اندازه $6/4$ mm در نظر گرفته و مدل سازی شده است. همانطور که گفته شد در ورودی و خروجی دستگاہ دو عدد لوله‌ی تفلونی برای هدایت لوله استفاده شده است. دز مدل سازی دو عدد لوله با سطح صلب تحلیلی طراحی شد.

۳-۳- خواص مکانیکی

قبل از هر شبیه سازی لازم است خواص متریال مورد استفاده به دست آید، زیرا یکی از مهمترین بخش‌های وارد شده در نرم افزار، خواص ماده‌ای است که شبیه سازی روی آن انجام می‌شود. اطلاعات خواص به دست آمده از آزمون کشش را، در نرم افزار ثبت می‌کنیم.

برخورد لوله با غلتک‌ها باعث انتشار موج تنش در ماده می‌شود. به علت اتلاف داخلی، شدت موج تنش با گذشت زمان کاهش می‌یابد. برای اعمال این میرایی و رسیدن به شرایط پایدار در کمینه زمان لازم برای انجام محاسبات، مطابق رابطه‌ی (۱-۳)، برای ماده میرایی متناسب با جرم در نظر گرفته شده‌است [۱۷].

$$C = \alpha M \quad (1-3)$$

در این رابطه C ماتریس میرایی، M ماتریس جرم و α فاکتور میرایی متناسب با جرم است و $\alpha = 2 \xi \omega_0$. ξ نسبت میرایی است و $0 < \xi < 1$ و معمولاً $\xi = 0.5$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ω_0 اولین فرکانس طبیعی سیستم است که از رابطه‌ی (۲-۳) قابل محاسبه می‌باشد. [۱۷]

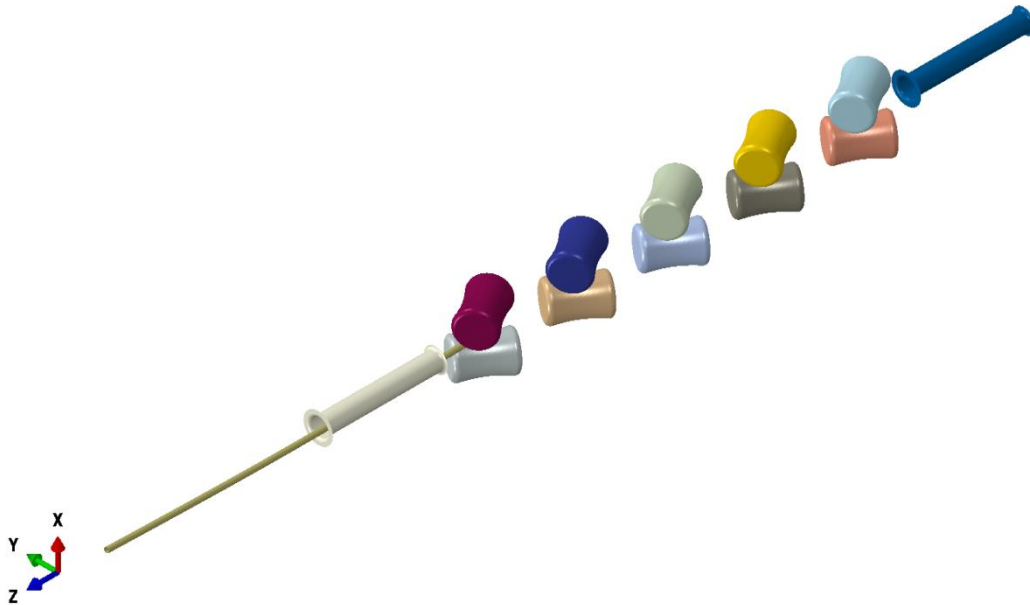
$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\pi}{L} \right]^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (2-3)$$

در رابطه‌ی فوق، E ، L ، I و ρ به ترتیب، مدول یانگ، طول، ممان اینرسی و چگالی می‌باشد. بر اساس روابط فوق، در شبیه‌سازی‌ها برای متریال مورد نظر $\alpha = 1 \times 10^5$ در نظر گرفته‌شد. اصطکاک بین لوله و غلتک 0.35 و بین لوله و سوراخ راهنما 0.05 در نظر گرفته شده‌است.

۳-۴- مونتاز قطعات

پس از مدل سازی و تعریف خواص مکانیکی قطعات در مرحله قبل، باید لوله و غلتک‌ها در موقعیت مناسب خود قرار گیرند (شکل ۳-۴). نحوه کار و تنظیم موقعیت غلتک‌ها به صورتی است که غلتک‌ها روی لوله مماس بوده. در این حالت فاصله گپ بین جفت غلتک‌ها دقیقاً برابر قطر خارجی لوله می‌شود. آنگاه برای شروع کار، با حرکت اولیه لوله به جلو و بین جفت غلتک اولیه هدایت شده و پس از آن غلتک‌ها لوله را گرفته و به داخل می‌کشند. به منظور ساده سازی تحلیل و اجتناب از چند مرحله‌ای کردن حل، غلتک‌ها در موقعیت مماسی قرار داده می‌شوند، سپس ابتدای لوله را در زیر جفت غلتک اول قرار داده و نیروی فشاری روی لوله باعث جلو راندن لوله می‌شود.

فاصله بین جفت غلتک‌ها در جهت طولی 160 mm تنظیم شده‌است.



شکل ۳-۴: مونتاژ لوله و غلتک و راهنما

۳-۵- گام و زمان تحلیل

در محیط step، نوع حل، تعداد گام‌های حل و مدت زمان هر گام، تعیین می‌شود. به منظور تحلیل فرآیند فرم دهی تدریجی در نرم‌افزار آباکوس، از حل‌گر دینامیکی صریح^۱ استفاده شده‌است. در این تحلیل مساله در هر بازه‌ی زمانی کوچک، براساس نتایج بخش قبل، محاسبه می‌شود. به منظور حل یک مساله با استفاده از روش صریح، تعداد اجزای زمانی ایجاد شده در هر گام، با استفاده از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$n = T \max \left(\frac{1}{L} \sqrt{\frac{\gamma + 2\mu}{\rho}} \right) \quad (3-3)$$

در این رابطه، پارامتر T بیانگر مدت زمان هر گام می‌باشد. همچنین L طول مشخصه‌ی یک المان و ρ چگالی ماده است. ضرایب لامه نیز با عبارتهای γ و μ نشان داده می‌شوند. از سوی دیگر، مدت زمان حل مساله، ارتباط کاملاً مستقیم، با تعداد اجزای زمانی موجود در هر گام (n) دارد. بنابراین، با کاهش پارامتر n ، می‌توان سرعت حل مسئله را تا حد زیادی افزایش داد. براساس رابطه‌ی فوق، با کاهش مدت زمان هر گام و افزایش چگالی ماده، امکان کاهش پارامتر n فراهم می‌شود. در صورت کاهش مدت زمان هر گام، سرعت بارگذاری

¹ Dynamic, Explicit

اعمال شده به ماده، افزایش می‌یابد. این امر، سبب افزایش نیروهای اینرسی، می‌شود. بنابراین، به دلیل تغییر ساختار مساله و احتمال ایجاد خطا در نتایج، عملاً امکان تغییر این پارامتر، وجود ندارد. از سوی دیگر، با افزایش پارامتر ρ ، تعداد اجزای زمانی ایجاد شده در هر گام (n)، کاهش می‌یابد. این امر، سبب افزایش سرعت حل مسئله، می‌شود. افزایش چگالی ماده در نرم‌افزار آباکوس، اصطلاحاً مقیاس جرم^۱، نامیده می‌شود. از سوی دیگر، افزایش این پارامتر، انرژی جنبشی ایجاد شده در ماده را افزایش می‌دهد. براساس استاندارد بیان شده در راهنمای نرم‌افزار، در صورتی که انرژی جنبشی ماده کمتر از ۵٪ انرژی درونی سیستم باشد؛ می‌توان از خطای ناچیز ایجاد شده، صرف‌نظر نمود.

۳-۶- مش بندی لوله

برای انجام تحلیل المان محدود لازم است، هندسه سازه به ابعاد کوچکتر تقسیم شود. هر قدر اندازه و ابعاد المان‌ها ریزتر باشد نتایج حاصل از تحلیل دقیق‌تر است که البته این امر سبب افزایش زمان حل مسئله می‌شود. لوله با المان S4R با ۵ نقطه انتگرال‌گیری در راستای ضخامت مش‌بندی شد و اجسام صلب تحلیلی نیازی به مش بندی ندارند.

۳-۷- شرایط مرزی

شرایط مرزی وارد شده در شبیه سازی عبارتند از:

غلتک‌های بالا و پایین در کلیه جهات حرکتی کاملاً مقید بوده و تنها حول محور خود با سرعت ثابت دوران می‌کنند.

به پنج غلتک بالا سرعت چرخشی و پنج جفت غلتک پایین نیز دقیقاً همان سرعت ولی در جهت عکس اختصاص داده شد. زاویه غلتک‌ها نسبت به محور لوله بین 28° تا 32° در نظر گرفته شد.

سرعت غلتک‌ها با توجه به زمان انجام عمل تابگیری و خارج شدن کل طول لوله از زیر غلتک‌ها محاسبه می‌شود.

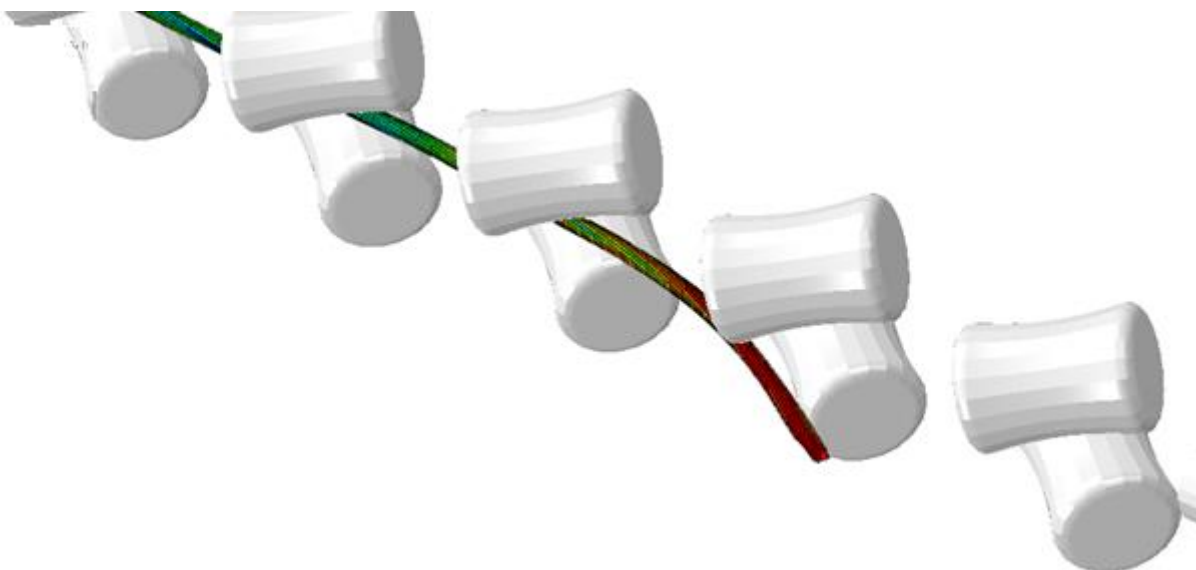
¹ Mass Scale

برای اعمال شرایط مرزی روی لوله، لوله را به سمت جلو حرکت نمی‌دهند و در واقع بر لوله هیچ قیدی اعمال نمی‌شود زیرا لوله هم در حال حرکت کاملاً آزادانه می‌باشد و هم مطابق با چرخش غلتک‌ها به جلو رانده می‌شود. تنها برای غلتک‌ها دوران ذکر شده را اعمال کرده که مسلماً باید لوله را به داخل هدایت کند.

۳-۸- اجرای شبیه سازی

پس از انجام مراحل مقدماتی و آماده سازی شبیه سازی، نوبت به حل مساله می‌رسد. لوله‌ای که قرار است در این پروژه به شبیه سازی آن پرداخته شود، لوله‌ای جدار نازک از جنس آلیاژ زیرکونیوم می‌باشد که مشخصات ابعادی آن قبلاً ذکر شد.

لوله‌ای را که در دستگاه تابگیری وارد می‌شود، در ابتدا دارای یک انحنای اولیه است. انحنای قابل قبول پس از عملیات تابگیری، بستگی به عملیات بعدی که روی لوله قرار است انجام گیرد و به محل مورد استفاده آن دارد. در اینجا انحنای قابل قبول برای لوله کمتر از 0.5mm در یک متر طول می‌باشد. همچنین اگر انحنای لوله بیش از حد مجاز و یا لوله خم باشد، نمی‌توان از دستگاه تابگیری استفاده نمود زیرا در حین این عملیات، لوله به دلیل انحنای زیاد از بین جفت غلتک‌ها خارج شده و یا گیر می‌کند و عملیات ناقص می‌ماند. نتیجه شبیه سازی انجام شده در چنین حالتی در شکل ۳-۵ نشان داده شده‌است و مشاهده می‌شود که انحنای لوله قبل از وارد کردن زیاد بوده است و حین عملیات لوله بین جفت غلتک وسط وارد نشده و عملیات دچار خطا شده‌است.



شکل ۳-۵: انحراف لوله از بین غلتک‌ها لوله

۳-۹- پارامتری کردن متغیرها

پارامتری کردن متغیرها برای سهولت در اعمال تغییرات و وارد کردن داده‌ها انجام می‌شود. موارد قابل تغییر در این تحلیل به شرح زیر می‌باشد.

۱- زاویه غلتک‌ها

۲- فشار وارد بر لوله

۳- خارج از مرکزی غلتک‌های مرکزی

۴- سرعت دورانی غلتک‌ها که منجر به حرکت خطی لوله می‌شود.

فصل ۴ نتایج و بحث

۴-۱- نتایج تجربی

۴-۱-۱ سطوح انتخابی از نتایج چهار طراحی و آزمون‌ها

جدول ۴-۱ نتیجه بررسی چهار طراحی و آزمون اولیه برای سطوح موثر در فاکتور خارج از مرکزی غلتک‌ها را نشان می‌دهد. از هر آزمون دو سطح برای ورودی در آزمون جدید انتخاب شد.

جدول ۴-۱- سطوح انتخابی آزمون‌ها مؤثر در فاکتور خارج از مرکزی غلتک‌ها

| آزمون ۱ | آزمون ۲ | آزمون ۳ | آزمون ۴ |
|---------|---------|---------|---------|
| ۲۰۲ | ۳۰۲ | ۴۲۱ | ۳۱۳ |
| ۳۱۲ | ۳۰۳ | ۴۱۳ | ۳۲۳ |

فرآیند تجربی نشان داد که:

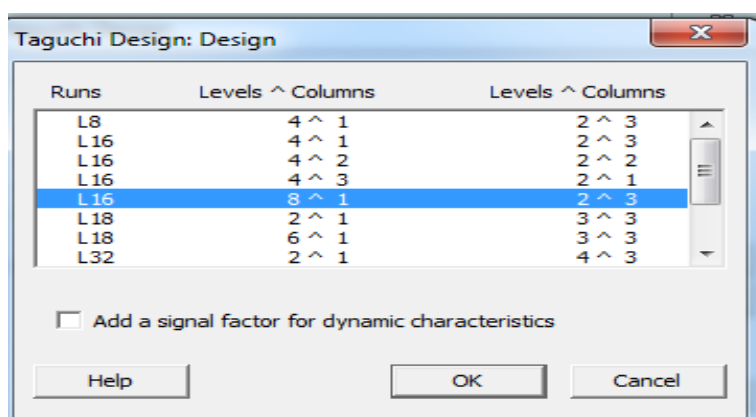
- (۱) بیشترین برخورد لوله با غلتک‌ها، در زاویه تنظیمی 28° بود که باعث آسیب به لوله و سطح غلتک‌ها شد. نتیجه آن شد که برای ورودی آزمون جدید، زاویه 28° از سطوح فاکتور زاویه غلتک حذف شد.
- (۲) در فاکتور فشار، فشردگی $0/2$ mm وارد بر غلتک‌ها تاثیر کمتری در بهبود تاب خروجی داشت. نتیجه آن شد که برای ورودی آزمون جدید، فشردگی $0/2$ mm حذف شد.

۳) وقتی سرعت تنظیمی بر روی پتانسیومتر روی ۶ تنظیم شد، کیفیت تاب خروجی کم و برخورد با غلتک زیاد و همچنین نیاز به هدایت لوله بین غلتک‌ها توسط اپراتور بیشتر شد، برای همین سطح تنظیمی ۶ که دارای سرعت خطی بالاتری برای لوله بود، برای ورودی آزمون جدید حذف شد. پس از بررسی و حذف سطوح غیر ضروری آزمون چهارگانه، سطوح باقیمانده به شرح جدول ۴-۲ به دست آمد.

جدول ۴-۲- پارامترهای ورودی و سطوح مربوطه

| پارامترهای فرآیند | واحد | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ | سطح ۴ | سطح ۵ | سطح ۶ | سطح ۷ | سطح ۸ |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| خارج از مرکزی (سینوس) | mm | ۲۰۲ | ۳۰۲ | ۳۰۳ | ۳۱۲ | ۳۱۳ | ۳۲۳ | ۴۱۳ | ۴۲۱ |
| زاویه غلتک | درجه | ۳۰ | ۳۲ | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| فشار غلتک | mm | ۰/۴ | ۰/۶ | .... | .... | .... | .... | .... | .... |
| سرعت تنظیمی | ..... | ۲ | ۴ | .... | .... | .... | .... | .... | .... |

پس از آن طراحی آزمایش در نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد و ۱۶ آزمایش مجدد باید انجام گیرد (شکل ۴-۱).



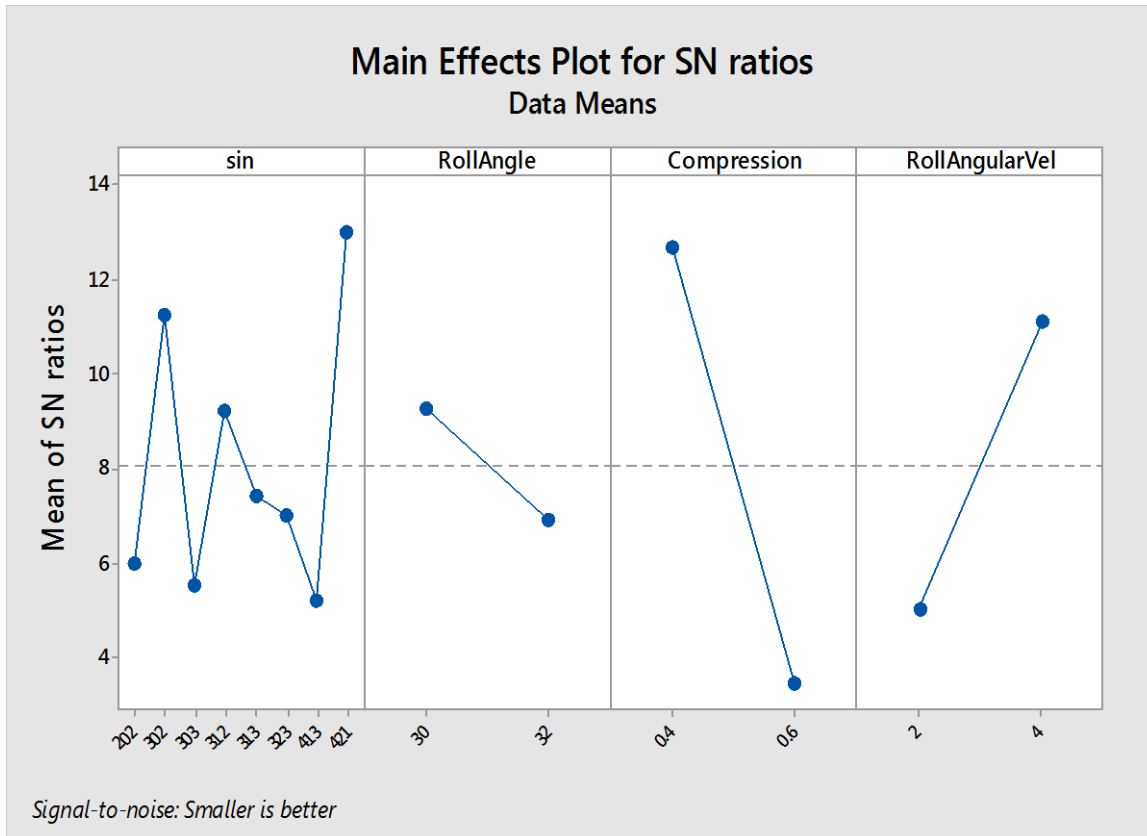
شکل ۴-۱: طراحی سه ستون دو سطحی و یک ستون هشت سطحی

آزمایش‌های پیشنهادی و انجام آزمون مجدد بر روی ۱۶ نمونه دیگر انجام شد و نتایج در جدول ۴-۳ نشان داده شده‌است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، میزان مستقیمی در آزمایش‌های انجام شده بهینه‌تر شده‌است و برخورد لوله با غلتک‌های دستگاه کمتر می‌باشد. در ستون توضیحات، میزان تاب در سر و ته لوله و چگونگی برخورد لوله با غلتک‌ها نوشته شده‌است.

جدول ۴-۳- جدول ثبت نتایج آزمون مجدد

| ردیف | Sin | RollAngle | Compression | RollAngularVel | پاسخ | توضیحات |
|------|-----|-----------|-------------|----------------|------|----------------------------------|
| ۱ | ۲۰۲ | ۳۰ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۵ | برخورد آرام به ورودی ۴ (ته لوله) |
| ۲ | ۲۰۲ | ۳۲ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۵ | (سر لوله) |
| ۳ | ۳۱۲ | ۳۰ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۲ | برخورد آرام به ورودی ۳ (سر لوله) |
| ۴ | ۳۱۲ | ۳۲ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۶ | (ته لوله) |
| ۵ | ۳۰۲ | ۳۰ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۰۵ | برخورد آرام به ورودی ۳ |
| ۶ | ۳۰۲ | ۳۲ | ۰/۶ | ۲ | ۱/۵ | برخورد آرام به ورودی ۳ (سر لوله) |
| ۷ | ۳۰۳ | ۳۰ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۳۵ | برخورد به ورودی ۳ (ته لوله) |
| ۸ | ۳۰۳ | ۳۲ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۸ | برخورد به ورودی ۳ (سر لوله) |
| ۹ | ۴۲۱ | ۳۰ | ۰/۶ | ۲ | ۰/۵ | برخورد به ورودی ۳ (ته لوله) |
| ۱۰ | ۴۲۱ | ۳۲ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۱ | |
| ۱۱ | ۴۱۳ | ۳۰ | ۰/۶ | ۲ | ۱ | برخورد شدید به ورودی ۳ (ته لوله) |
| ۱۲ | ۴۱۳ | ۳۲ | ۰/۴ | ۴ | ۰/۳ | برخورد به ورودی ۳ (سر لوله) |
| ۱۳ | ۳۱۳ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۹ | برخورد شدید به ورودی ۳ (سر لوله) |
| ۱۴ | ۳۱۳ | ۳۲ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۲ | برخورد به ورودی ۳ (ته لوله) |
| ۱۵ | ۳۲۳ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ | ۰/۲۵ | برخورد به ورودی ۳ (ته لوله) |
| ۱۶ | ۳۲۳ | ۳۲ | ۰/۴ | ۲ | ۰/۸ | برخورد به ورودی ۳ (سر لوله) |

مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون جدید در شکل ۴-۲ آمده است. با استفاده از خروجی نرم افزار مینی تب مقادیر عددی در جدول ۴-۴ مشخص است.



شکل ۴-۲: مقادیر مربوط به سیگنال به نویز متوسط برای سطوح مختلف پارامترها در آزمون جدید

جدول ۴-۴- مقادیر سیگنال به نویز میانگین برای سطوح مختلف

| پارامترهای فرآیند | خارج از مرکزی (سینوس) | زاویه غلتک | فشار غلتک | سرعت تنظیمی |
|-------------------|-----------------------|------------|-----------|-------------|
| سطح ۱ | ۶/۰۲۱ | ۹/۲۶۵ | ۱۲/۶۸۹ | ۵/۰۴۴ |
| سطح ۲ | ۱۱/۲۴۹ | ۶/۹۰۶ | ۳/۴۸۱ | ۱۱/۱۲۶ |
| سطح ۳ | ۵/۵۲۸ | .... | .... | .... |
| سطح ۴ | ۹/۲۰۸ | .... | .... | .... |
| سطح ۵ | ۷/۴۴۷ | .... | .... | .... |
| سطح ۶ | ۶/۹۹۰ | .... | .... | .... |
| سطح ۷ | ۵/۲۲۹ | .... | .... | .... |
| سطح ۸ | ۱۳/۰۱۰ | .... | .... | .... |

با توجه به مقادیر ماکزیمم سیگنال به نویز، حالت بهینه فرآیند به شرح جدول ۴-۵ می باشد.

جدول ۴-۵- حالت بهینه فرآیند

| خارج از مرکزی (سینوس) | زاویه غلتک | فشار غلتک | سرعت تنظیمی |
|-----------------------|------------|-----------|-------------|
| ۴۲۱ | ۳۰ | ۰/۶ | ۴ |

۴-۱-۲ آنالیز واریانس

برای پیدا کردن اهمیت نسبی پارامترها بر روی هر کدام از خروجی‌ها از تکنیک آماری آنالیز واریانس^۱ استفاده شده‌است. در جدول ۴-۶ آنالیز واریانس، آزمون F نشان دهنده تاثیرگذاری یا عدم تاثیر گذاری پارامترهای مورد آزمایش در سطح اطمینان^۲ مورد نظر می‌باشد. برای پارامترهای با درصد توزیع بالا، تغییراتی هر چند کوچک باعث تاثیر زیادی بر خروجی می‌شود. P value نشان دهنده‌ی ارزش احتمال^۳ می‌باشد.

جدول ۴-۶- نتایج آنالیز واریانس داده‌ها

| P-Value | توزیع نسبی (F) | میانگین مربعات (MS) | مجموع مربعات (SS) | درجه آزادی (DF) | پارامترهای فرآیند |
|---------|----------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| ۰/۹۳۰ | ۰/۲۹ | ۰/۰۴۲۱۲ | ۰/۲۹۴۸ | ۷ | خارج از مرکزی (سینوس) |
| ۰/۵۲۰ | ۰/۴۸ | ۰/۰۶۸۹ | ۰/۰۶۸۹ | ۱ | زاویه غلتک |
| ۰/۰۶۷ | ۵/۴۵ | ۰/۷۸۷۶۶ | ۰/۷۸۷۶۶ | ۱ | فشار غلتک |
| ۰/۱۶۸ | ۲/۶۰ | ۰/۳۷۵۱۶ | ۰/۳۷۵۱۶ | ۱ | سرعت تنظیمی |
| | | ۰/۱۴۴۴۱ | ۰/۷۲۲۰۳ | ۵ | خطا |
| | | | ۲/۲۴۸۵۹ | ۱۵ | مجموع |

نتایج نوشته شده در جدول ۴-۶ خروجی نرم‌افزار مینی‌تب می‌باشد.

¹ ANOVA

² Confidence level

³ Probability Value

۴-۱-۳ انجام آزمایش تاییدی

آخرین مرحله از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی، انجام آزمایش تاییدی است. هدف از آزمایش تاییدی اعتبار بخشیدن به نتایج و بحث‌های انجام شده می‌باشد. به این منظور معمولاً یک آزمون با استفاده از ترکیب حالت بهینه انجام می‌شود (جدول ۴-۷)

جدول ۴-۷- نتایج بر مبنای حالت بهینه فرآیند

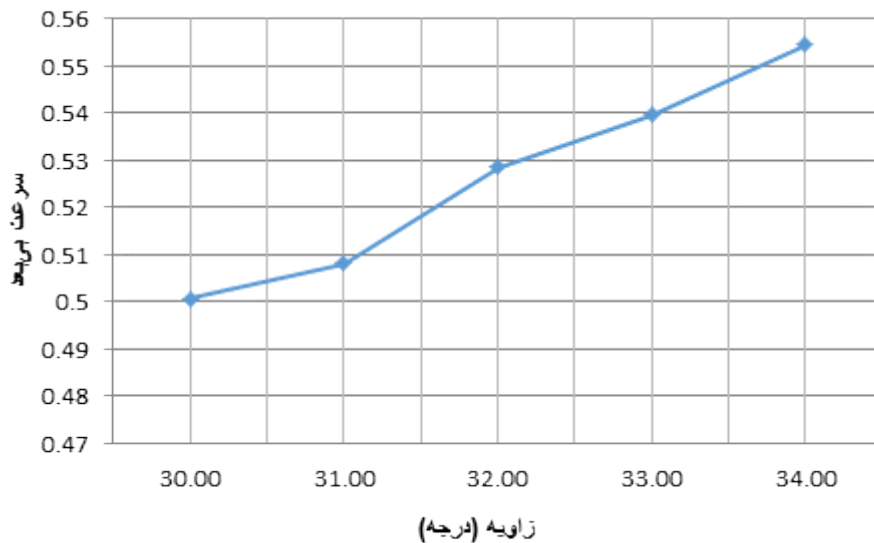
| نتیجه | پیش بینی | آزمایش |
|-------|-----------|--------|
| پاسخ | -۰/۱۴۰۶۲۵ | ۰/۳ |

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی

فرضیه‌ای که در شبیه‌سازی و تجربی باید در نظر گرفت این است که آنالیز جنس لوله ثابت است و عملیات حرارتی قبل از فرآیند در خواص مکانیکی تغییری ایجاد نمی‌کند.

۴-۲-۱ تغییرات سرعت نسبت به زوایای مختلف

برای آنکه مشخص شود، تغییرات زاویه غلتک‌ها، چه تاثیری بر سرعت لوله دارد، باید جابجایی لوله در راستای طول را برای زوایای مختلف اندازه‌گیری نمود. برای به‌دست آوردن سرعت، باید جابجایی لوله را تقسیم بر زمان تحلیل کنیم. برای بی‌بعد کردن سرعت به‌دست آمده، آن را تقسیم بر شعاع حداقل غلتک در دور غلتک می‌کنیم. نتیجه، نمودار به‌دست آمده در شکل ۴-۳ است.

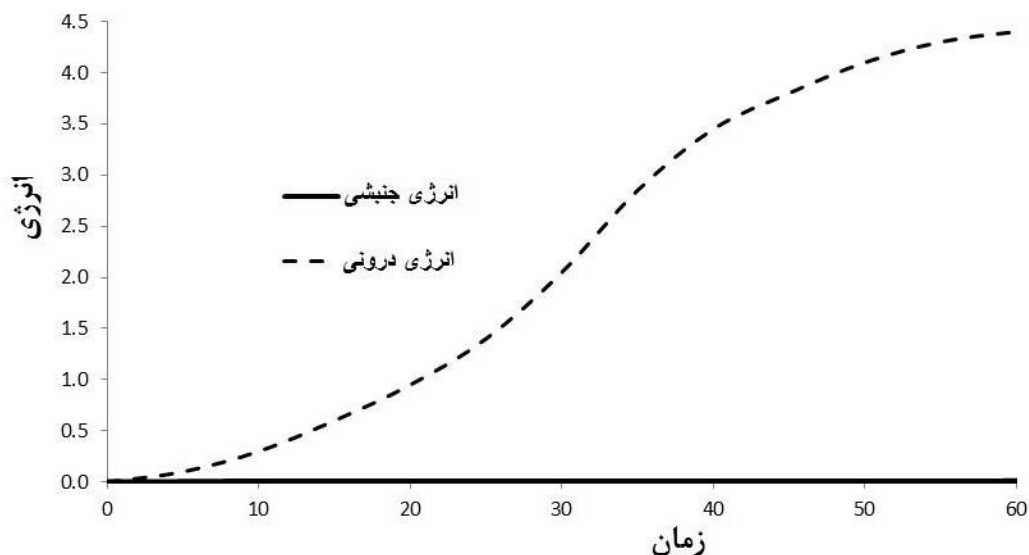


شکل ۴-۳: نمودار تغییرات سرعت نسبت به زوایای مختلف غلتک

منحنی به دست آمده نشان می‌دهد، با افزایش زاویه غلتک سرعت خطی کمی افزایش می‌یابد و تغییرات زاویه غلتک‌ها تاثیر کمی بر سرعت لوله دارد.

۴-۳- عدم وابستگی نتایج به اندازه جرم

در بخش قبلی به طور کامل درباره اندازه جرم و چگونگی تاثیر آن در حل مساله توضیحاتی داده شد و عنوان شد که برای این تحلیل در بعضی موارد اندازه جرم در حدود ۱۶ الی ۱۰۰ در نظر گرفته شد. همانطور که در بخش راهنمای نرم‌افزار آباکوس بیان شده است اگر انرژی جنبشی^۱ ماده کمتر از ۵ درصد انرژی درونی^۲ سیستم باشد؛ می‌توان از خطای ناچیز ایجاد شده، صرف‌نظر نمود. شکل ۴-۴ میزان انرژی جنبشی و انرژی داخلی را بر حسب زمان نشان می‌دهد. مقیاس جرم در شبیه‌سازی‌ها ۱۶ قرار داده شد.



شکل ۴-۴: مقایسه انرژی درونی و انرژی جنبشی

۴-۴- میزان تاب خروجی فرآیند شبیه‌سازی

تعدادی از تنظیمات انجام شده و نتیجه بهینه به دست آمده از طراحی آزمایش تاگوچی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. برای اندازه‌گیری تاب خروجی، گزارش لوله خروجی را با پسوند RPT. وارد نرم‌افزار متلب^۳

¹ ALLKE

² ALLIE

³³ MATLAB

کرده و با محاسبه میانگین مقادیر در نرم افزار، اعداد خروجی در نرم افزار اکسل^۱ به صورت نمودار نشان داده می شود.

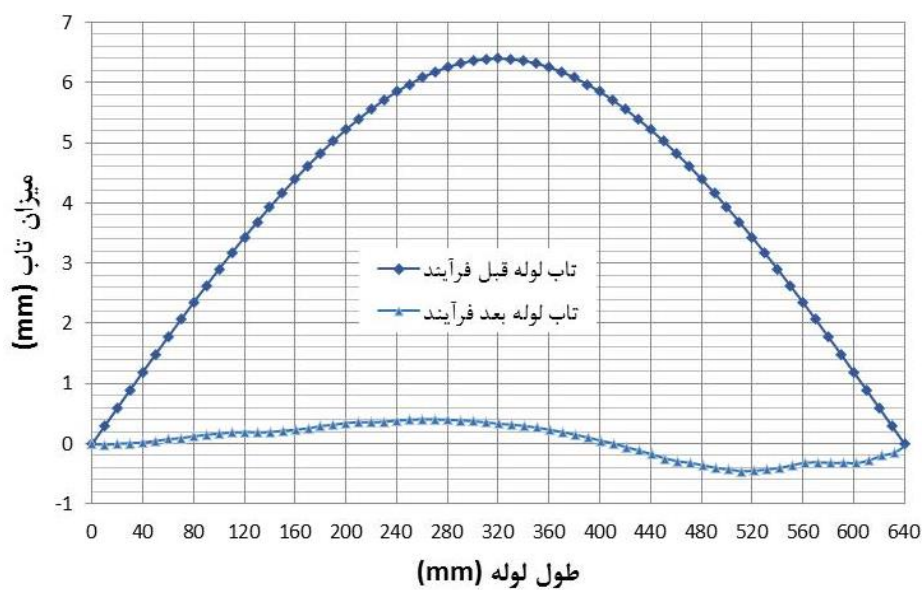
شبیه سازی با تنظیم مقادیر جدول ۴-۸ انجام می شود.

جدول ۴-۸- مقادیر تنظیمی شبیه سازی

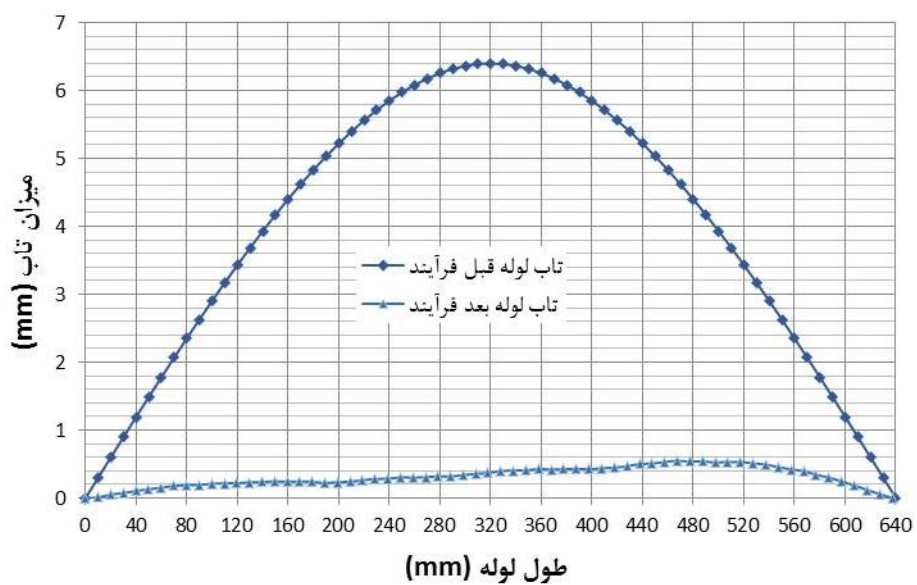
| شماره | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| زاویه غلتک (درجه) | ۳۰ | ۳۲ | ۳۱ | ۳۳ | ۳۲ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۴ |
| خارج از مرکزی غلتکها (mm) | ۴۲۱ | ۳۰۳ | ۳۰۳ | ۴۰۴ | ۴۲۱ | ۲۰۲ | ۳۰۳ | ۴۰۴ | ۴۰۴ |
| لپیدگی غلتکها (mm) | ۰/۶ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ |
| سرعت خطی لوله (m/min) | ۱/۲ | ۵/۵ | ۵/۳ | ۵/۷ | ۱/۳ | ۵/۲ | ۵/۳ | ۵/۲ | ۵/۸ |

نمودار تاب خروجی لوله در ۹ آزمایش شبیه سازی در شکل های زیر مشخص است.

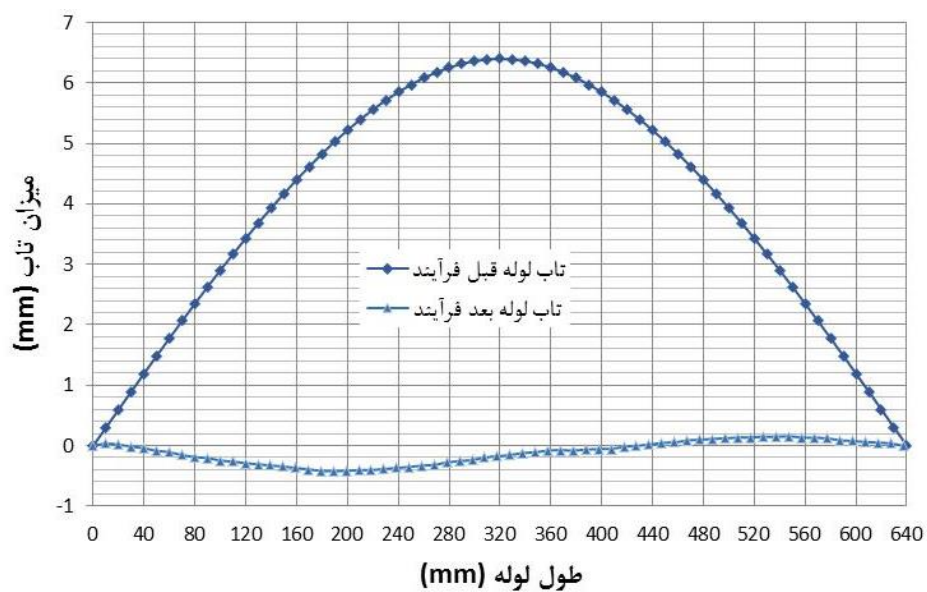
¹ Excel



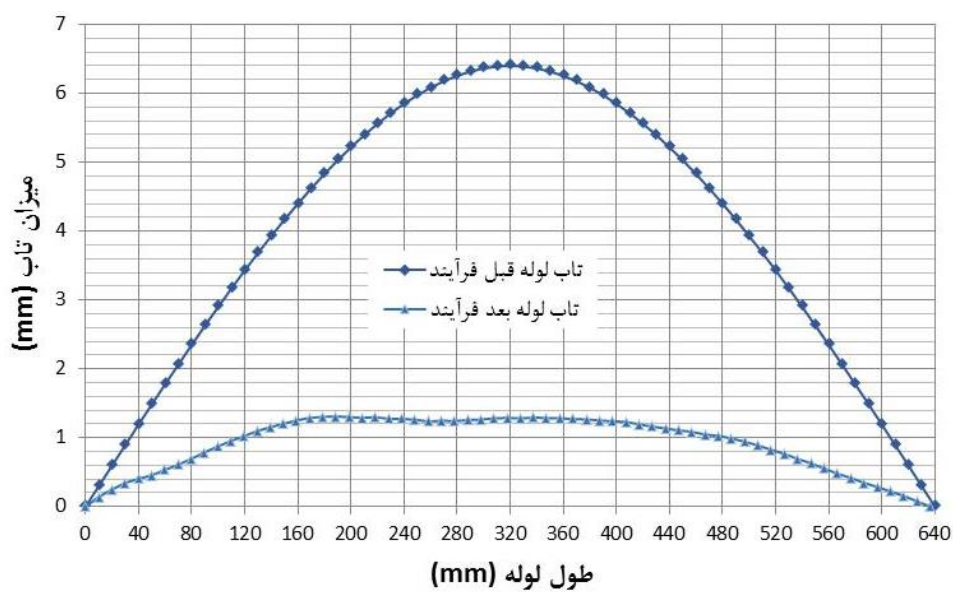
شکل ۴-۵: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۱ (تنظیم حالت بهینه)



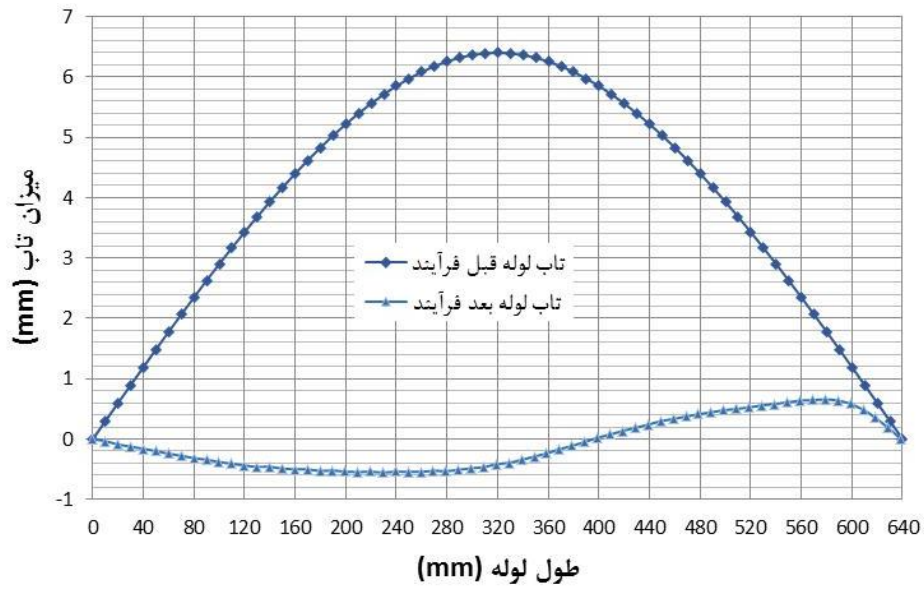
شکل ۴-۶: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۲



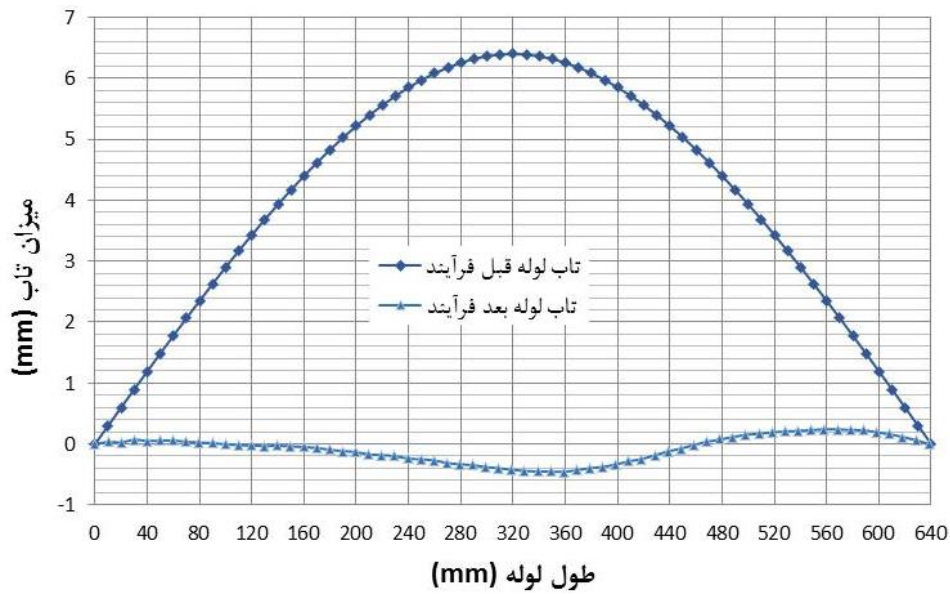
شکل ۴-۷: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۳



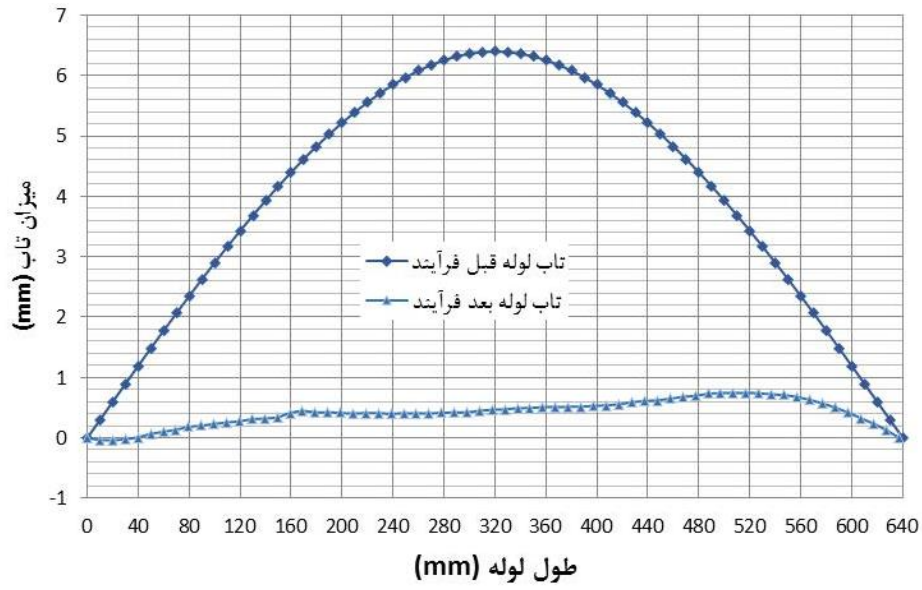
شکل ۴-۸: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۴



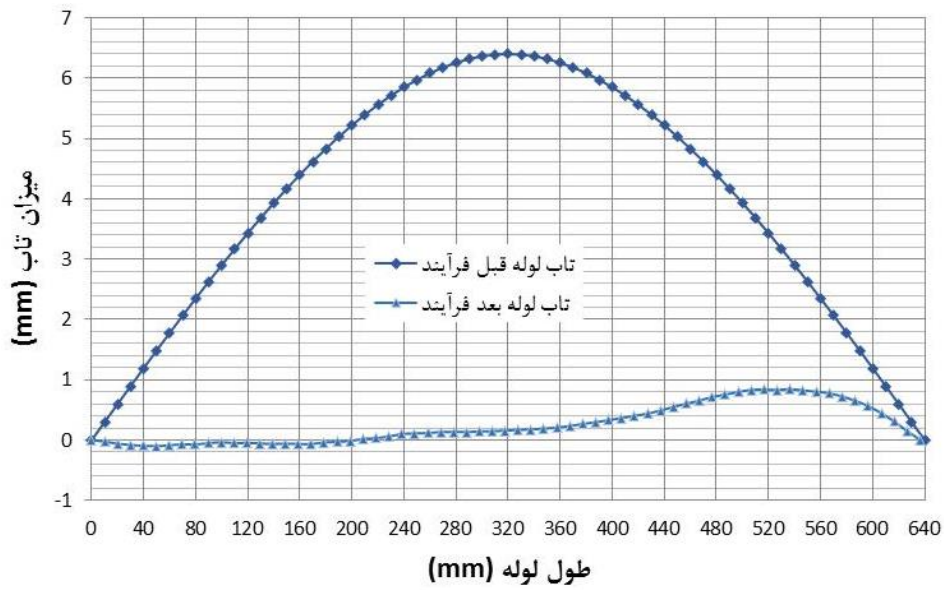
شکل ۴-۹: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۵



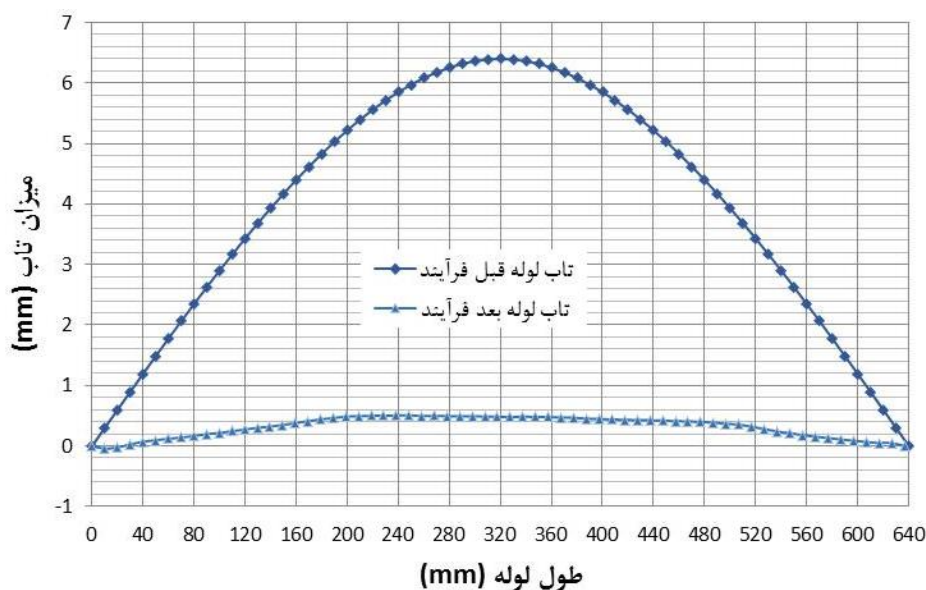
شکل ۴-۱۰: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۶



شکل ۴-۱۱: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۷



شکل ۴-۱۲: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۸



شکل ۴-۱۳: نمودار خروجی تاب لوله برای آزمایش ۹

بیشترین تاب خروجی لوله در مرحله‌ی شبیه‌سازی استخراج و با نتایج تجربی مقایسه گردید. (جدول ۴-۹)

جدول ۴-۹- مقایسه نتایج تاب خروجی لوله در شبیه‌سازی و تجربی

| شماره | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| شبیه‌سازی (mm) | ۰/۴ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۱/۳ | ۰/۶ | ۰/۴ | ۰/۶ | ۰/۸ | ۰/۵ |
| تجربی (mm) | ۰/۳ | ۰/۸ | ۰/۵ | ۱/۸ | ۰/۱ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۱/۱۵ | ۱/۹ |

اعداد به‌دست آمده در شبیه‌سازی، روند بهبود تاب خروجی را نشان می‌دهد. تنها تفاوتی که در پارامترهای تنظیمی بین فرآیند شبیه‌سازی و تجربی وجود دارد، سرعت خطی لوله در شبیه‌سازی به غیر از آزمایش ۱ و ۵ در جدول ۴-۹ بالاتر از حالت تجربی قرار داده شد. این عمل، برای بالا بردن سرعت تحلیل و صرفه‌جویی در زمان انجام شد.

نتایج ذکر شده در مرحله‌ی عددی، حاصل تعداد زیادی تغییر پارامتر، سعی و خطا و اصلاح روند شبیه‌سازی می‌باشد. انحنای لوله در شبیه‌سازی بیشتر ته و سر لوله می‌باشد که این نتایج در روش تجربی هم مشاهده

می‌شود. در آزمایش‌های شبیه‌سازی، هنگام خروج لوله از دستگاه و در برخورد با لوله‌ی راهنما، تاب لوله مقداری افزایش می‌یابد و این مسئله ناشی از سرعت بالای خروج لوله می‌باشد.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه و ترکیب می‌شوند و نتایج حاصل از هر کدام به صورت یکپارچه ارائه خواهند شد. همچنین به بررسی نتایج آزمایش‌ها و تست‌های عملی پرداخته می‌شود و دلایل بروز اختلاف‌هایی که باعث به‌وجود آمدن خطا در فرآیندها می‌شود بررسی شده و در نهایت پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار توسط علاقه‌مندان ارائه شده‌است.

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، به مطالعه‌ی فرآیند تاب‌گیری لوله‌های بدون درز فلزی از طریق تجربی و شبیه‌سازی عددی پرداخته شد. همانطور که در فصول قبل مشاهده شد، پارامترهایی که در نتایج خروجی و انحنای باقیمانده در فرآیند تاثیر دارند، هر کدام مقدار بهینه‌ای دارند و اضافه یا کم شدن مقدار آنها منجر به بهبودی و یا بدتر شدن نتایج می‌شوند.

در آزمایش تجربی، تاب‌گیری بر روی ۸۹ نمونه لوله انجام شد و چهار فاکتور موثر در مستقیمی لوله مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌گیری از هر فاکتور به شرح زیر می‌باشد:

(۱) فشردگی غلتک: بیشترین تاثیر در تاب خروجی لوله را فشردگی غلتک دارد. اگر مقدار آن کم باشد، تاب خروجی کم و اگر مقدار آن زیاد باشد، باعث ترک در لوله می‌شود. با نگاهی به مقدار بهینه به‌دست آمده از روش تاگوچی و مشاهده‌ی نتایج و با توجه به سایز لوله، در لوله‌های جدار نازک، به

اندازه‌ی ۰.۶٪ قطر خارجی فشردگی بر روی لوله مناسب می‌باشد. البته این نتیجه‌گیری نیاز به بررسی بیشتر دارد.

(۲) سرعت خطی لوله: دومین تاثیر در تاب خروجی لوله را سرعت لوله بین غلتک‌ها دارد. همانطور که مشاهده شد، سرعت زیاد باعث آسیب به لوله، تجهیز و تاب‌دار شدن لوله می‌شود. هر چه سرعت کم باشد، تاب خروجی بهتر می‌باشد. البته زمان و هزینه تولید را باید در نظر گرفت.

(۳) زاویه‌ی غلتک: سومین تاثیر در تاب خروجی لوله را زاویه‌ی غلتک دارد. اگر زاویه نسبت به راستای لوله زیاد انتخاب شود، تماس نقطه‌ای بین لوله و غلتک ایجاد و لوله موجدار می‌شود. اگر زاویه کم انتخاب شود، لوله به لبه‌ی غلتک برخورد می‌کند و احتمال خروج لوله از بین غلتک‌ها وجود دارد.

(۴) خارج از مرکزی غلتک: چهارمین تاثیر در تاب خروجی لوله را خارج از مرکزی غلتک‌ها دارد. در تنظیمات سه ایستگاه غلتک مرکزی این نکته مهم می‌باشد که خمش وارد بر لوله از زیاد به کم است. اگر این خمش زیاد باشد، لوله دارای تاب پیچشی می‌شود و اگر کم باشد، تابگیری مناسب انجام نمی‌شود. پس از بررسی و مشاهده‌های تجربی، اندازه مناسب خارج از مرکزی ایستگاه دوم بین ۳ mm تا ۴ mm، ایستگاه سوم بین ۰ تا ۲ mm و ایستگاه سوم ۱ mm تا ۲ mm می‌باشد.

نتایج حاصل شبیه‌سازی نشان داد که سیر اصلاح مستقیمی لوله با فاکتورهای در نظر گرفته شده و تغییرات آزمایش تجربی صحیح است. همان نتایجی که از فرآیند تجربی به دست آمد با کمی تغییر، شبیه فرآیند شبیه‌سازی است.

اختلاف نتایج شبیه‌سازی با تجربی می‌تواند به دلایل زیر باشد.

(۱) سرعت در نظر گرفته شده در تحلیل عددی بالاتر از فرآیند تجربی بود. و این به این دلیل بود که با همین سرعت بین ۱۰ تا ۲۴ ساعت برای حل فرآیند شبیه‌سازی طول می‌کشید. تعداد زیادی شبیه‌سازی، با تغییرات مختلف برای حل به سیستم یارانه ارسال شد و این زمان طولانی را صرف می‌کند.

(۲) اپراتور دستگاه در فرآیند تجربی تابگیری موثر می‌باشد. چون نحوه ورود لوله و هدایتی که انجام می‌دهد تا لوله وارد دستگاه شود در همه‌ی موارد یکسان نمی‌باشد.

۳) تاب اولیه لوله‌های فرآیند تجربی یکسان نیست و می‌تواند هر کدام شرایط متفاوتی را داشته باشد و این مغایرت و عدم امکان اعمال این تغییرها در شبیه‌سازی می‌تواند باعث بروز اختلاف در نتایج شود.

۴) تماس غلتک با لوله در فرآیند تجربی به دقت اپراتور بستگی دارد و اگر این تماس اختلافی در حد $0/1 \text{ mm}$ باشد می‌تواند در تفاوت خروجی تاب موثر باشد.

۵) در دستگاه تابگیری که فرآیند تجربی انجام شد، تنظیم خارج از مرکزی و فشردگی غلتک به صورت اعمال دستی و مکانیکی انجام می‌شود و چون تجهیزات مکانیکی دارای لقی‌های مجازی می‌باشند، این لقی‌ها می‌تواند باعث خطای آنچه که دیده و آنچه که اعمال می‌شود، بشوند.

۶) اندازه‌گیری میزان تاب لوله در فرآیند تجربی و شبیه‌سازی دارای تفاوت ماهیتی می‌باشد و یکی از اختلاف‌های صورت‌گرفته در تاب خروجی ناشی از همین امر است.

۷) تاثیر تغییر خواص مکانیکی لوله به واسطه تغییر در آنالیز لوله و عملیات حرارتی قبل آن در شبیه‌سازی ثابت است ولی در روش تجربی ثابت نمی‌باشد.

۵-۲- پیشنهادها

به منظور ادامه این کار برای علاقه‌مندان تحقیق در خصوص موضوع تابگیری، موارد ذیل توصیه می‌شود:

- ۱) انجام فرآیند تابگیری با میزان تاب اولیه و بررسی تاثیر آن بر خروجی.
- ۲) انجام فرآیند با جنس‌های مختلف و بررسی تاثیر فاکتورهای موثر جنس لوله بر خروجی.
- ۳) بررسی جامع بر روی پرفیل غلتک‌های تابگیری و اثر تماس آن با لوله.
- ۴) بررسی تنش‌های پسماند پس از انجام این فرآیند و امکان ایجاد و رشد ترک در لوله.

منبع‌ها

1. Steel pipes. www.madehow.com, [Online]
2. Li, Ke-Yang, and Shyue-Cheng Yang. "Profile determination of a tube-straightening roller by envelope theory." *Journal of Materials Processing Technology* 94, No. 2 (1999): 157-166.
3. تویسرکانی، ح، شکل دادن فلزات، سال نشر.
4. Talukder, N.K.Das, Johnson.W , "On The Arrangment of Rolls In Cross-Roll Straighteners", *Int. J. Mechanic Science* V.23,pp. 213-220, 1981.
5. Rotary straighteners for tube and pipe. September 25, 2009. www.thefabricator.com. [Online].
6. Mutrux. A, Brisha. B, Hochholdinger. B, Hora. P, "Numerical Modeling of Cross Roll Straightening", *Metallumfomung*1, pp. 33-40,2008
7. "Operator & maintenance training courses" , www. Tunermachineco.com.
8. Turner Mashine Company, " Rolls for tube straightening machines" , www.tubenet.com. [Online].
9. X.F.Ma, H.S.Ui, " Confirm the method of conjugate surface and its aplications", *Mechanical Engineering Press*, 1986.
10. Karasevich.P.P, Savchenko. Yu.V, Rasin.V.I, " High Accuracy Straightening of Tubes", *Steel in the USSR*, pp. 392-393, 1986.
11. خلخالی، ا، " تحلیل اجزای محدود به کمک آباکوس"، انتشارات دیباگران تهران، ۱۳۸۹
12. R.K. Roy, "A Primer on the Taguchi Method", 2nd ed., 2010, Society of Manufacturing Engineers.
13. Huang, Hua Gui, Huan Ping Zheng, Feng Shan Du, and Wen Zhang Wang. "Numerical Simulation Analysis on the Ten Cross Rolls Straightening Process of the Heavy Calibre Seamless Steel Tube." *In Advanced Materials Research*, vol. 421, pp. 56-59. 2012.
14. Zi-Qian Zhang, Yun-Hui Yan, Hui-Lin Yang. "A New Stress Mathematical Model of Deformation Zone While Straightening Thin-walled Tube." *In Advanced Materials Research*, vol. 652-4, pp. 1488-93. 2013.
15. Huh, Hoon, Jin Hyuck Heo, and Hyoung Wook Lee. "Optimization of a roller levelling process for Al7001T9 pipes with finite element analysis and Taguchi method." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, no. 4 (2003): 345-350.
16. Kato, Masakazu, Atsushi Hasegawa, Shoji Sugyo, Hiroshi Nakamura, Masanori Kobayashi, and Yoshio Morimoto. "Straightening Technology of Round Bars Using 2-roll Rotary Straightener." *Procedia Engineering* 81 (2014): 233-238.
17. T. kim, H. Lee, H. C. Hyun, and S. Jung, "A simple but effective 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.

Abstract

Precision seamless metal tubes produced through rolling process are not perfectly straight due to application of asymmetric forming loads and presence of residual stresses. Since they have a three dimensional wavy axis, straightening of these tubes are problematic. Therefore, it is necessary to straighten them through a combined spinning and alternating bending process. This is usually done in a straitening machine which consists of multiple pairs of hyperbolic rolls. However, the straightening operation of the thin-walled tube depends mainly on the experience of operators and on the results of trials at present. This leads to a considerable waste and decrease in production efficiency. This dissertation deals with the experimental and numerical study on the important parameters involved in thin walled tube straitening process. For a given straightening machine, these parameters roll velocity, roll eccentricity, roll angle and roll compression. The experiments were designed based Taguchi method in MINITAB software. The experiments were conducted in two stages. The first set included four designs and the other consisted of one design. First design included 24 experiments and second design included 16 experiments. The second sets of experiments were designed based on the results obtained from the first stage. Finally, some experiments were designed to verify the suggestions of the Taguchi model. In the numerical analysis, the explicit solver of Abaqus finite element package was used. In order to change the process parameters in the simulations, the parametric input file was developed and used. Parameters similar to the experimental ones were used in the simulations. The optimum conditions suggested by the experiments and simulations were compared. The experimental results show that the parameters which have the most influence on the final straightness of the tube in order of importance are roll compression, velocity, angle and eccentricity, respectively. The simulation results predict similar trend.

Keywords: Tube straightening, Experimental design, Finite element method, Optimization



**Shahrood University of Technology
Kharazmi Department**

**Experimental and Numerical Study on Straightening Process of Seamless Metal
Tubes**

Presented for Master of Science in Mechanical Engineering

**Written by
Hamid Ghandhari**

**Supervisor
Dr. Seyed Hadi Ghaderi**

**Advisor
Hadi Shanazari**

February 2016