

[]

السلام عليكم ورحمة الله وبركاته



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

مطالعه تجربی و تحلیل آماری متغیرهای موثر بر دقت ابعادی و زبری سطح نمونه حاصل از شکل دهی انبساطی انتهای لوله با استفاده از فرآیند SPIF

نگارنده:

محمد عیسی پور رودی

استاد راهنما:

دکتر مهدی وحدتی

استاد مشاور:

دکتر محمد جواد میرنیا

اسفند ماه ۱۴۰۰

تقدیم اثر

پروردگارا:

نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت و سربلندی من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای پینه بسته شان که شمره
تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را
در عصای دست بودن شان بگذرانم.

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

باسپاس و تقدیر ویژه از استاد گرامی جناب آقای دکتر مهدی وحدتی که در مراحل مختلف این پژوهش،

راهنمایی‌های ارزنده و سازنده خود را بر من ارزانی داشته و از بیچ کوششی در این زمینه دریغ ننمودند.

همچنین از استاد پر تلاش و زحماتش جناب آقای دکتر محمد جواد میرنیا که با مشاوره و نظارت دقیق بر پژوهش

مرا یاری نمودند، تشکر ویژه دارم.

در پایان بر خود لازم می‌دانم از همکاری جناب مهندس صادقی که در زمینه اجرای آزمون‌های تجربی مرا

یاری کردند صمیمانه تشکر نمایم.

تعمدنامه

اینجانب محمد عیسی‌پور رودی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان- نامه "مطالعه تجربی و تحلیل آماری متغیرهای موثر بر دقت ابعادی و زبری سطح نمونه حاصل از شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله با استفاده از فرآیند SPIF" تحت راهنمایی جناب دکتر مهدی وحدتی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه‌ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله‌های جدار نازک با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF)، در صنایعی همچون: هوا فضا، خودرو سازی و کشتی‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. این فرآیند به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، عدم نیاز به ساخت قالب و کاربرد در حوزه نمونه‌سازی سریع، مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به مطالعات اندکی که در زمینه جوانب کیفی محصولات حاصل از این فرآیند انجام شده است، در این پژوهش، مطالعه تجربی و تحلیل آماری متغیرهای موثر بر دقت ابعادی و زبری سطح نمونه‌های شکل‌دهی شده، مورد توجه قرار گرفت. طراحی آزمایش بر مبنای متدلوژی سطح پاسخ انجام شد. سپس بر اساس آزمون‌های تجربی، تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند SPIF از جمله: قطر ابزار، گام عمودی ابزار، گام زاویه‌ای و نوع روانکار بر قطر انتهای لوله و زبری سطوح داخلی و خارجی انتهای لوله از جنس فولاد زنگ نزن AISI 304، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند. پاسخ‌های خروجی اندازه‌گیری شده، در نرم افزار مینی تب مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل واریانس نشان داد که متغیرهای قطر ابزار، گام عمودی ابزار و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام زاویه‌ای به عنوان موثرترین عبارات بر قطر انتهای لوله هستند. در ادامه، تأثیرات خطی، درجه دوم و تعاملی از متغیرهای ورودی بر زبری سطوح داخلی و خارجی انتهای لوله استخراج شدند. بهینه‌سازی چند هدفه پاسخ‌ها با استفاده از تابع مطلوبیت انجام شد. قطر ابزار 12 mm ، گام زاویه‌ای 4° ، گام عمودی ابزار 0.43 mm و روانکار روغن به عنوان مقادیر بهینه به منظور دستیابی به حداکثر قطر انتهای لوله و حداقل زبری سطوح داخلی و خارجی، تعیین شدند. با بررسی توزیع ضخامت چند نمونه در ناحیه منبسط شده، می‌توان دریافت که با کاهش درصد تغییرات قطر انتهای لوله، نازک شدن بیشتری در انتهای لوله حاصل می‌شود. همچنین استفاده از ابزارهای سرکروی با قطر بالاتر منتج به افزایش قطر دهانه منبسط شده می‌شود و باعث کاهش میزان برگشت

کلمات کلیدی: شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای - متدلوژی سطح پاسخ - زبری سطح - قطر انتهای لوله -

دستاوردهای پژوهش

- ۱- عیسی پور رودی محمد، وحدتی مهدی، قادری سید هادی، (۱۳۹۹) " تحلیل عددی فرآیند شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله آلومینیومی با استفاده از شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای. " هفدهمین همایش ملی و ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید"، ص ۸، تهران.
- ۲- عیسی پور رودی محمد، وحدتی مهدی، میرنیا محمد جواد، (۱۴۰۰) " مطالعه تجربی و مدل‌سازی تأثیر متغیرهای ورودی بر قطر انتهای لوله حاصل از شکل‌دهی انبساطی با استفاده از فرآیند SPIF. " هجدهمین همایش ملی و هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید"، ص ۷، تهران.
- ۳- عیسی پور رودی محمد، وحدتی مهدی، میرنیا محمد جواد، (۱۴۰۰) " تحلیل آماری و بهینه‌سازی متغیرهای موثر بر زبری سطوح داخلی لوله منبسط شده با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی. " هجدهمین همایش ملی و هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی ساخت و تولید"، ص ۶، تهران.

فهرست مطالب

فهرست شکل ها	ک
فهرست جدول ها	ن
فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- روش های شکل دهی لوله جدار نازک	۲
۱-۱-۱- شکل دهی الکترومغناطیس	۲
۱-۱-۲- شکل دهی با استفاده از سنبه و ماتریس	۳
۱-۱-۳- فرآیند شکل دهی چرخشی	۳
۱-۲- فرآیند شکل دهی تدریجی	۴
۱-۲-۱- شکل دهی تدریجی تک نقطه ای	۵
۱-۲-۲- شکل دهی تدریجی دو نقطه ای	۶
۱-۳- مقایسه روش های شکل دهی تدریجی SPIF و TPIF	۷
۱-۴- کاربرد فرآیند شکل دهی تدریجی	۷
۱-۵- فرآیند شکل دهی تدریجی انتهای لوله جدار نازک	۹
۱-۶- کاربرد فرآیند شکل دهی تدریجی انتهای لوله	۱۱
فصل ۲: مروری بر پیشینه پژوهش	۱۳
۲-۱- مقدمه	۱۴
۲-۲- فرآیند شکل دهی تدریجی ورق	۱۴
۲-۳- شکل دهی تدریجی لوله	۱۹
۲-۴- اهداف پژوهش	۲۷
۲-۵- ساختار پایان نامه	۲۷
فصل ۳: مواد و تجهیزات آزمایشگاهی	۲۹
۳-۱- مقدمه	۳۰
۳-۲- قابلیت شکل پذیری مواد	۳۰
۳-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی لوله	۳۳
۳-۴- تجهیزات فرآیند SPIF	۳۴

۳۷	۵-۳-تنظیمات فرآیند.....
۳۷	۳-۵-۱-استراتژی شکل‌دهی.....
۳۸	۳-۵-۲-استخراج مسیر حرکت ابزار.....
۳۹	۳-۶-تجهیزات اندازه‌گیری.....
۴۰	۳-۶-۱-دستگاه پروفایل پروژکتور.....
۴۲	۳-۶-۲-میکروسکوپ نوری.....
۴۵	فصل ۴: طراحی آزمون‌های تجربی.....
۴۶	۴-۱-طراحی آزمون‌های تجربی.....
۴۷	۴-۲-انتخاب طرح آزمایش.....
۴۸	۴-۳-انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات.....
۵۰	۴-۴-اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهای پاسخ.....
۵۱	۴-۴-۱-قطر انتهای منبسط شده لوله.....
۵۶	۴-۴-۲-زبری سطوح داخلی و خارجی.....
۶۳	فصل ۵: نتایج و بحث.....
۶۴	۵-۱-مقدمه.....
۶۴	۵-۲-تجزیه و تحلیل قطر انتهای لوله.....
۶۶	۵-۲-۱-نمودار توزیع نرمال اثرات داده‌ها و پارتو.....
۶۷	۵-۲-۲-نمودار باقیمانده‌ها.....
۶۹	۵-۲-۳-نمودارهای دو بعدی منحنی تراز.....
۷۰	۵-۲-۴-نمودار اثرات خطی و متقابل داده‌ها.....
۷۲	۵-۳-تجزیه و تحلیل زبری سطح داخلی لوله.....
۷۶	۵-۳-۱-نمودار توزیع نرمال اثرات داده‌ها و پارتو.....
۷۸	۵-۳-۲-نمودار باقیمانده‌ها.....
۸۰	۵-۳-۳-نمودارهای دو بعدی منحنی تراز.....
۸۳	۵-۳-۴-نمودار اثرات خطی و متقابل داده‌ها.....
۸۶	۵-۴-تجزیه و تحلیل زبری سطح خارجی لوله.....
۹۰	۵-۴-۱-نمودار توزیع نرمال اثرات داده‌ها و پارتو.....
۹۲	۵-۴-۲-نمودار باقیمانده‌ها.....
۹۴	۵-۴-۳-نمودارهای دو بعدی منحنی تراز.....
۹۸	۵-۴-۴-نمودار اثرات خطی و متقابل داده‌ها.....
۱۰۰	۵-۵-بهینه‌سازی و صحت‌گذاری.....
۱۰۳	۵-۶-بررسی تغییر ضخامت جداره لوله در بخش انبساطی.....

۷-۵- بررسی گام عمودی بر صافی سطح لوله منبسط شده ۱۰۴

فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۰۷

۶-۱- نتیجه گیری ۱۰۸

۶-۲- پیشنهادها ۱۱۰

پیوست ها ۱۱۱

منابع و مآخذ ۱۲۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. شماتیک فرآیند شکل‌دهی الکترو مغناطیس [۱]..... ۲
- شکل ۲-۱. شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله با استفاده از فرآیند سنبه و ماتریس [۲]..... ۳
- شکل ۳-۱. فرآیند شکل‌دهی چرخشی انتهای لوله [۳]..... ۴
- شکل ۴-۱. فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق به روش الف (سرد) [۶] ب) گرم [۷]..... ۵
- شکل ۵-۱. فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF) [۱۱]..... ۶
- شکل ۶-۱. فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ورق..... ۶
- شکل ۷-۱. کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی در صنعت خودرو [۱۱]..... ۸
- شکل ۸-۱. کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی در صنعت هوافضا [۱۳]..... ۸
- شکل ۹-۱. کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی در مهندسی پزشکی الف) پشتیبان غوزک پا [۱۲]..... ۸
- شکل ۱۰-۱. منبسط‌سازی انتهای لوله جدار نازک با استفاده از فرآیند SPIF [۱۵]..... ۹
- شکل ۱۱-۱. شماتیک از معرفی پارامتر در الف) ورق ب) لوله [۱۷ و ۱۸]..... ۱۰
- شکل ۱۲-۱. شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک به صورت الف) فلنج زنی سوراخ ب) شیار زنی..... ۱۱
- شکل ۱۳-۱. نمونه‌ای از کاربرد لوله منبسط شده در اتصالات [۲۲]..... ۱۱
- شکل ۱-۲. مقایسه توزیع ضخامت با استفاده از شکل‌دهی تدریجی به روش سرد و گرم [۳۱]..... ۱۷
- شکل ۲-۲. هندسه ابزارهای مورد استفاده [۳۲]..... ۱۸
- شکل ۳-۲. مراحل ساخت لوله سه‌راهی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای [۳۹]..... ۲۰
- شکل ۴-۲. مراحل ساخت یا تاقان استوانه‌ای مورد استفاده در سیستم تعلیق خودرو..... ۲۰
- شکل ۵-۲. الف) فلنج زنی با استفاده از فرآیند SPIF ب) مقایسه توزیع ضخامت در قطرهای مختلف سوراخ [۴۱]..... ۲۱
- شکل ۶-۲. انواع ابزارهای مورد استفاده برای شکل‌دهی انتهای لوله در فرآیند SPIF [۴۲]..... ۲۲
- شکل ۷-۲. الف) کانتور تنش فون مایز در شکل‌دهی داخلی لوله ب) عیوب حاصل از افزایش فشار محوری [۴۴]..... ۲۳
- شکل ۸-۲. شکل‌دهی انتهای لوله‌های مسی با هندسه مربعی با استفاده از فرآیند SPIF [۴۶]..... ۲۴
- شکل ۹-۲. شکل‌دهی لوله با فرم بشکه‌ای با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم [۴۷]..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲. مراحل ایجاد سه‌راهی بر روی ورق آلومینیومی با استفاده از فرآیند TPIF [۴۹]..... ۲۶
- شکل ۱-۳. شماتیک لوله منبسط شده با نیم زاویه θ و طول شکل‌دهی L ۳۰
- شکل ۲-۳. نحوه اعمال گام زاویه‌ای جهت دستیابی به نیم زاویه مخروطی..... ۳۰
- شکل ۳-۳. الف) نحوه اعمال تدریجی گام زاویه‌ای در حین شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله..... ۳۵
- شکل ۴-۳. مندرل فولادی..... ۳۶
- شکل ۵-۳. ابزار سر کروی با قطرهای الف) ۸ ب) ۱۰ و ج) 12 mm ۳۶

- شکل ۳-۶. نوع روانکار (الف) گریس معمولی (ب) پودر گرافیت و (ج) روغن معمولی ۳۶
- شکل ۳-۷. نمای انفجاری اجزای فرآیند ۳۷
- شکل ۳-۸. مسیر حرکت ابزار به صورت مارپیچ (روش از پایین به بالا) ۳۸
- شکل ۳-۹. روند استخراج مسیر حرکت ابزار ۳۹
- شکل ۳-۱۰. کولیس دیجیتال با دقت 0.01 mm ۳۹
- شکل ۳-۱۱. زبری سنج *Mahr* مدل PS1 ۴۰
- شکل ۳-۱۲. ضخامت سنج کروپلین با دقت 0.01 mm ۴۰
- شکل ۳-۱۳. دستگاه پروفایل پروژکتور مدل *Baty R14* ۴۱
- شکل ۳-۱۴. نحوه قرارگیری لوله منبسط شده در پروفایل پروژکتور مدل *Baty R14* ۴۲
- شکل ۳-۱۵. نحوه اندازه‌گذاری (نقطه‌یابی) با استفاده از نرم افزار پروفایل پروژکتور ۴۲
- شکل ۳-۱۶. دستگاه استریو میکروسکوپ نوری ۴۳
- شکل ۴-۱. روند کلی طراحی آزمایش [۲۵] ۴۶
- شکل ۴-۲. نمایش سطوح در طرح باکس _ بنکن [۵۷] ۴۸
- شکل ۴-۳. نمونه لوله‌های شکل‌دهی شده بر اساس طراحی آزمایش ۵۱
- شکل ۴-۴. مشخصات ابعادی هندسه مخروطی ناقص ۵۱
- شکل ۴-۵. پارامترهای زبری سطح (الف) Ra (ب) Rz و (ج) Rq [۵۸] ۵۷
- شکل ۵-۱. نمودار (الف) احتمال نرمال اثرات (ب) پارتو ۶۷
- شکل ۵-۲. میزان درصد اثرگذاری عبارت‌های موثر بر قطر انتهای لوله ۶۷
- شکل ۵-۳. نمودار باقیمانده‌ها ۶۸
- شکل ۵-۴. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر قطر انتهای لوله به صورت دوجویی ۷۰
- شکل ۵-۵. نمودار (الف) اثرات خطی متغیرهای ورودی (ب) اثر تعاملی متغیرهای ورودی بر حداکثر قطر انتهای لوله ۷۱
- شکل ۵-۶. نمودار احتمال نرمال اثرات و پارتو (الف) $(Ra)i$ (ب) $(Rz)i$ و (ج) $(Rq)i$ ۷۷
- شکل ۵-۷. نمودار درصد اثرگذاری عبارت‌های موثر بر (الف) $(Ra)i$ (ب) $(Rz)i$ و (ج) $(Rq)i$ ۷۸
- شکل ۵-۸. نمودار باقیمانده (الف) $(Ra)i$ (ب) $(Rz)i$ و (ج) $(Rq)i$ ۷۹
- شکل ۵-۹. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Ra)i$ به صورت دوجویی ۸۱
- شکل ۵-۱۰. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rz)i$ به صورت دوجویی ۸۲
- شکل ۵-۱۱. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rq)i$ به صورت دوجویی ۸۳
- شکل ۵-۱۲. نمودار اثرات خطی متغیرهای ورودی بر (الف) $(Ra)i$ (ب) $(Rz)i$ و (ج) $(Rq)i$ ۸۴
- شکل ۵-۱۳. نمودار اثرات متقابل متغیرهای ورودی بر (الف) $(Ra)i$ (ب) $(Rz)i$ و (ج) $(Rq)i$ ۸۵
- شکل ۵-۱۴. نمودار احتمال نرمال اثرات و پارتو (الف) $(Ra)e$ (ب) $(Rz)e$ و (ج) $(Rq)e$ ۹۱
- شکل ۵-۱۵. نمودار درصد اثرگذاری عبارت‌های موثر بر (الف) $(Ra)e$ (ب) $(Rz)e$ و (ج) $(Rq)e$ ۹۲
- شکل ۵-۱۶. نمودار باقیمانده (الف) $(Ra)e$ (ب) $(Rz)e$ و (ج) $(Rq)e$ ۹۴

- شکل ۵-۱۷. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Ra)e$ به صورت دو بعدی..... ۹۵
- شکل ۵-۱۸. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rz)e$ به صورت دو بعدی..... ۹۶
- شکل ۵-۱۹. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rq)e$ به صورت دو بعدی..... ۹۷
- شکل ۵-۲۰. نمودار اثرات خطی متغیرهای ورودی بر الف) $(Ra)e$ ب) $(Rz)e$ و ج) $(Rq)e$ ۹۸
- شکل ۵-۲۱. نمودار اثرات متقابل متغیرهای ورودی بر الف) $(Ra)e$ ب) $(Rz)e$ و ج) $(Rq)e$ ۹۹
- شکل ۵-۲۲. نمودارهای برشی مربوط به رفتار پارامترهای پاسخ و تابع مطلوبیت کلی در نقطه‌ی بهینه..... ۱۰۲
- شکل ۵-۲۳. بررسی توزیع ضخامت الف) نمونه‌های برش خورده ب) تغییرات ضخامت در جداره لوله منبسط شده..... ۱۰۴
- شکل ۵-۲۴. کیفیت سطح با گام عمودی الف) ۰,۲ ب) ۰,۵ و ج) ۰,۸ mm ۱۰۵

فهرست جدول ها

جدول ۳-۱. شکل دهی لوله با ضخامت $mm\ 0,9$	۳۱
جدول ۳-۲. شکل دهی لوله با ضخامت $mm\ 0,8$	۳۲
جدول ۳-۳. شکل دهی لوله با ضخامت $mm\ 0,5$	۳۳
جدول ۳-۴. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 304 [۵۳].....	۳۴
جدول ۳-۵. خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن AISI 304 [۵۳].....	۳۴
جدول ۴-۱. متغیرهای ورودی و سطوح تغییر آن ها.....	۴۹
جدول ۴-۲. طراحی آزمون های تجربی.....	۴۹
جدول ۴-۳. اندازه گیری قطر انتهای لوله منبسط شده.....	۵۳
جدول ۴-۴. اندازه گیری زبری سطوح داخلی لوله.....	۵۸
جدول ۴-۵. اندازه گیری زبری سطوح خارجی لوله.....	۶۰
جدول ۵-۱. تحلیل واریانس پارامتر TED.....	۶۵
جدول ۵-۲. تحلیل واریانس پارامتر $(Ra)_i$	۷۲
جدول ۵-۳. تحلیل واریانس پارامتر $(Rz)_i$	۷۳
جدول ۵-۴. تحلیل واریانس پارامتر $(Rq)_i$	۷۴
جدول ۵-۵. تحلیل واریانس پارامتر $(Ra)_e$	۸۶
جدول ۵-۶. تحلیل واریانس پارامتر $(Rz)_e$	۸۷
جدول ۵-۷. تحلیل واریانس پارامتر $(Rq)_e$	۸۸
جدول ۵-۸. تنظیمات اولیه بهینه سازی.....	۱۰۱
جدول ۵-۹. مقادیر حاصل از فرآیند بهینه سازی.....	۱۰۲
جدول ۵-۱۰. نتایج حاصل از آزمون صحه گذاری.....	۱۰۳

فصل ۱

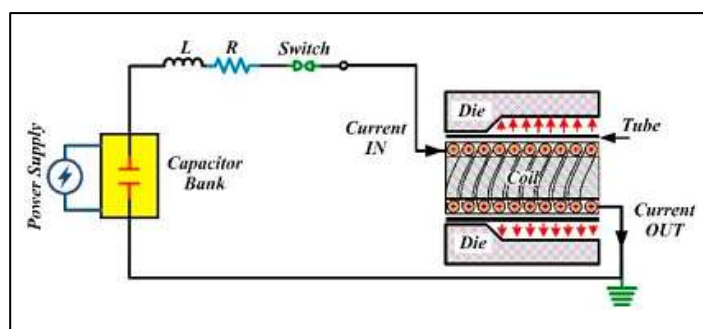
مقدمه

۱-۱- روش‌های شکل‌دهی لوله جدار نازک

شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک با استفاده از روش‌های مختلفی همچون شکل‌دهی الکترومغناطیس، شکل‌دهی سنبه و ماتریس و شکل‌دهی چرخشی انجام می‌شود که در ادامه به تشریح هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۱-۱- شکل‌دهی الکترومغناطیس^۱

(مطابق شکل ۱-۱)، اجزای فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس عبارتند از: منبع ذخیره انرژی، سیم پیچ، کابل، ورق یا لوله فلزی و قالب شکل‌دهی. در این روش، انرژی الکتریکی در یک خازن ذخیره می‌شود. با تخلیه ناگهانی انرژی ذخیره شده، جریان تخلیه شده که وابسته به زمان است، به درون سیم پیچ هدایت می‌شود و یک میدان مغناطیسی بالایی در اطراف آن ایجاد می‌کند. با توجه به قانون القای الکترومغناطیس فارادی، زمانی که قطعه کار فلزی در یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، جریان هادی ایجاد شده بر روی سطح ورق یا لوله، باعث نیروی دافعه بین سیم پیچ و قطعه فلزی می‌شود. این نیروی دافعه مغناطیسی باعث شکل‌دهی قطعه فلزی با نرخ بالای انرژی می‌شود تا اینکه هندسه مورد نظر شکل‌دهی شود [۱].

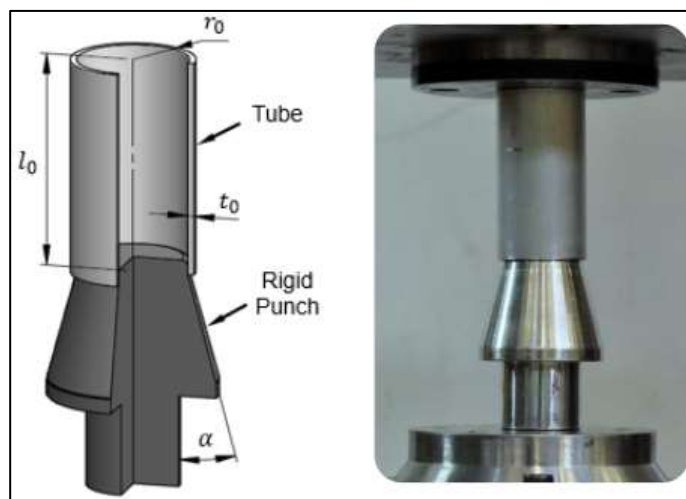


شکل ۱-۱. شماتیک فرآیند شکل‌دهی الکترومغناطیس [۱]

¹ ElectroMagnetic Forming

۱-۱-۲- شکل دهی با استفاده از سنبه و ماتریس

در این فرآیند، لوله یا ورق با استفاده از نگهدارنده‌ها در ماتریس قرار می‌گیرد و سنبه در امتداد محور لوله یا ورق برای اجرای فرآیند شکل دهی پیشروی می‌کند. سنبه لزوماً به شکل مخروطی ناقص نیست بلکه بسته به هندسه نهایی موردنظر می‌تواند مربعی یا مخروطی یا بیضوی باشد. شکل دهی انتهای لوله جدار نازک با استفاده از این فرآیند به عواملی همچون: طول اولیه لوله و میزان زاویه رأس سنبه بر کمانش لوله بستگی دارد. زیرا، با افزایش طول اولیه لوله و زاویه رأس سنبه، کمانش و پارگی در لبه لوله، رخ می‌دهد. همچنین، در حین تغییر شکل به دلیل وجود اصطکاک بین اجزای قالب و قطعه کار، معمولاً از روانکار استفاده می‌شود (مطابق شکل ۱-۲) [۲].



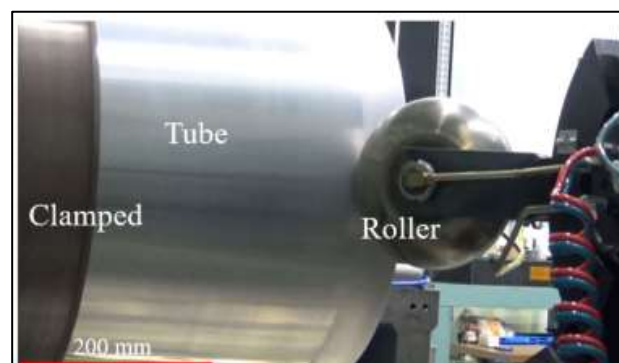
شکل ۱-۲. شکل دهی انبساطی انتهای لوله با استفاده از فرآیند سنبه و ماتریس [۲]

۱-۱-۳- فرآیند شکل دهی چرخشی^۱

شکل دهی چرخشی یکی از قدیمی‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها در تولید محدود و نمونه‌سازی برای ساخت قطعات فلزی با تقارن محوری می‌باشد. در این روش، با استفاده از ترکیب نیرو و چرخش،

^۱ Spinning

هندسه‌هایی با محور تقارن یا صفحه تقارن و بدون درز به صورت گرم یا سرد قابل تولید است. در این فرآیند فلز که به شکل ورق و یا لوله می‌باشد بین مندرل و ابزار شکل‌دهی تحت فشار قرار گرفته و شکل می‌گیرد. با این روش هندسه‌هایی همچون: مخروطی، مخروط ناقص، استوانه، بیضوی و یا ترکیبی از آن‌ها ساخته می‌شود (مطابق شکل ۳-۱) [۳].



شکل ۳-۱. فرآیند شکل‌دهی چرخشی انتهای لوله [۳]

۲-۱- فرآیند شکل‌دهی تدریجی^۱

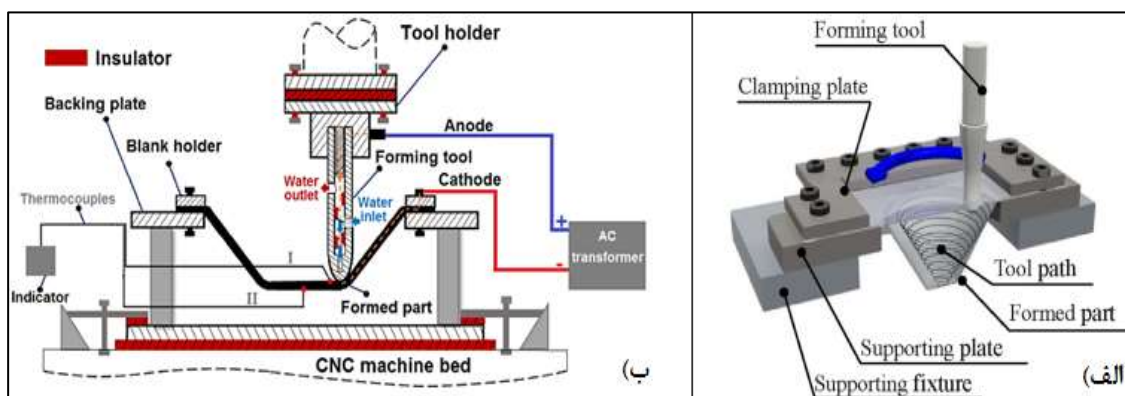
فرآیند شکل‌دهی تدریجی به عنوان یکی از روش‌های پیشرو در حوزه نمونه‌سازی سریع شناخته شده است. از این فرآیند برای شکل‌دهی ورق‌های فلزی و پلیمری در صنایع مختلف همچون: هوافضا، خودروسازی و پزشکی استفاده می‌شود [۴ و ۵]. تغییر شکل ورق در این روش از طریق اعمال کرنش موضعی از سوی ابزار ابزار سرکروی یا سرنیمکروی در یک مسیر پیوسته و با استفاده از ماشین فرز CNC^۲، به صورت سرد یا گرم انجام می‌شود (مطابق شکل ۴-۱) [۶ و ۷]. این روش به دلیل امکان تولید در مقیاس کم یا متوسط، نمونه‌سازی سریع، سادگی و ارزانی ابزار شکل‌دهی و عدم نیاز به

^۱ Incremental Forming (IF)

^۲ Computer Numerical Control (CNC)

ساخت قالب، برای شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله‌های جدار نازک از سوی پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است [۸ و ۹].

از متغیرهای ورودی فرآیند شکل‌دهی تدریجی می‌توان به: قطر ابزار، نرخ پیشروی ابزار، سرعت دورانی ابزار، گام عمودی ابزار، گام زاویه‌ای و نوع روانکار اشاره نمود که هر یک از آن‌ها شاخص‌های کمی و کیفی محصول نهایی همچون: برگشت فنری، زبری سطح، توزیع ضخامت، مقدار نیروی شکل‌دهی و حد شکل‌دهی تأثیر گذارند. از سوی دیگر، با بکارگیری روش‌های تجزیه و تحلیل آماری و تکنیک‌های بهینه‌سازی، می‌توان دریافت که کدام یک از متغیرهای ورودی بر پاسخ‌های خروجی، بیشترین تأثیر را دارد [۱۰].



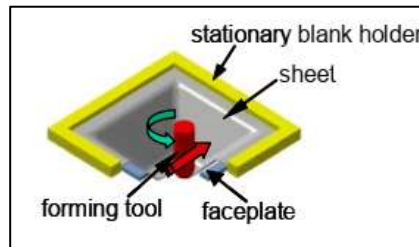
شکل ۱-۴. فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای ورق به روش الف سرد [۶] ب گرم [۷]

۱-۲-۱- شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای^۱

در این فرآیند، تغییر شکل ورق تنها از سمتی که با ابزار در تماس است، انجام می‌شود و هیچ ابزار پشتیبانی در پشت ورق وجود ندارد. در این روش، حد شکل‌دهی بالایی از سوی ورق تجربه شده که به عنوان "شکل‌دهی تدریجی منفی" نیز شناخته می‌شود (مطابق شکل ۱-۵). در پژوهش پیش رو، از این روش به عنوان فرآیند شکل‌دهی، برای منبسط‌سازی انتهای لوله استفاده شده است، که می‌توان از

^۱ Single - point incremental forming (SPIF)

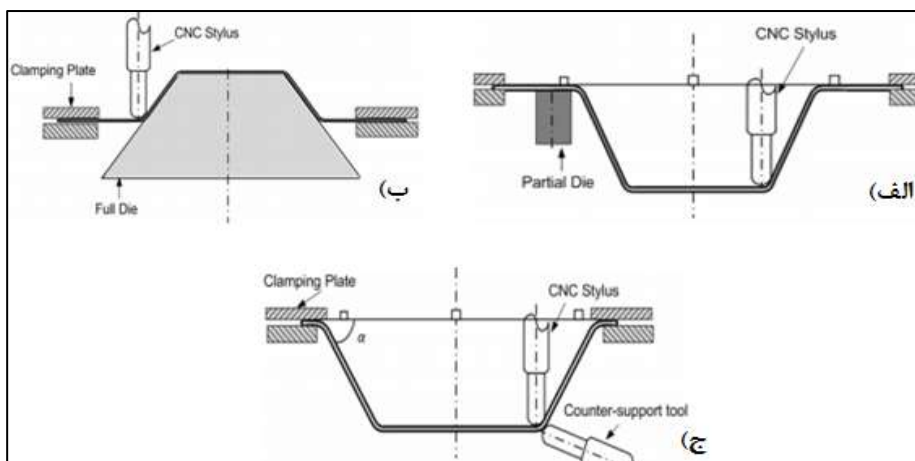
ویژگی‌های برتر این روش به میزان حد شکل‌دهی بالا، عدم نیاز به قالب و همچنین کاهش هدر رفت مواد نسبت به روش شکل‌دهی سنتی اشاره نمود [۱۱].



شکل ۱-۵. فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای (SPIF) [۱۱]

۱-۲-۲- شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای^۱

در این فرآیند، تغییر شکل ورق هم از سمت ابزار و هم از سمت دیگری که با قالب در تماس است، کنترل می‌شود، که به عنوان "شکل‌دهی تدریجی مثبت" نیز شناخته می‌شود. (مطابق شکل ۱-۶) این فرآیند به سه روش انجام می‌شود: (۱) استفاده از بخشی از قالب در زیر ورق (۲) استفاده از قالب کامل در زیر ورق (۳) استفاده از ابزار پشتیبان متحرک در زیر ورق [۱۲].



شکل ۱-۶. فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای ورق (الف) استفاده از بخشی از قالب (ب) استفاده از قالب کامل و (ج) استفاده از ابزار پشتیبان متحرک [۱۲]

¹ Two - Point Incremental Forming (TPIF)

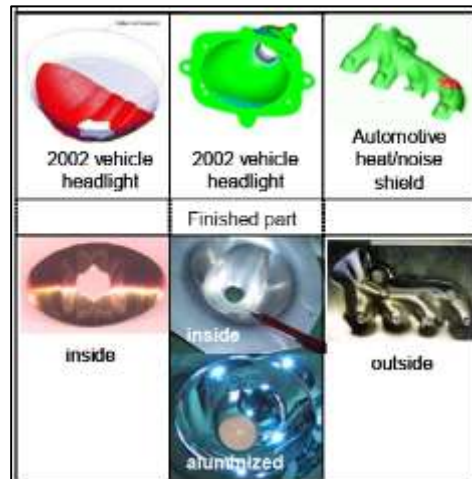
۱-۳- مقایسه روش‌های شکل‌دهی تدریجی SPIF و TPIF

بسته به نوع کاربرد، روش‌های شکل‌دهی تدریجی تکنقطه‌ای و دونقطه‌ای، نسبت به هم مزایا و معایبی دارند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود [۱۰ - ۱۲]:

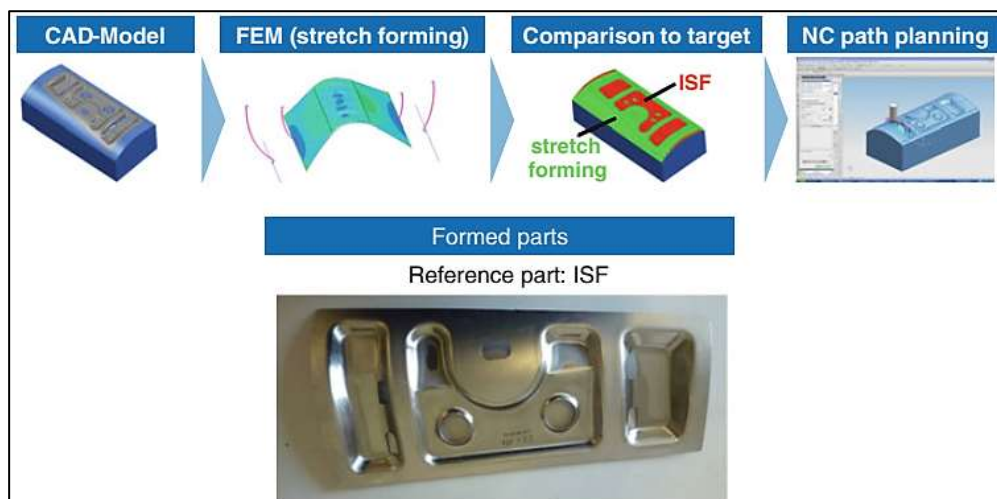
۱. روش SPIF معمولاً برای نمونه‌سازی اولیه مناسب‌تر است.
۲. روش SPIF نسبت به روش TPIF ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر است.
۳. میزان حد شکل‌دهی در روش SPIF نسبت به روش TPIF بسیار بالاتر است.
۴. دقت ابعادی نمونه حاصل از TPIF نسبت به SPIF بالاتر است.
۵. زوایای بزرگ را می‌توان با روش TPIF ایجاد نمود.
۶. کنترل توزیع ضخامت در روش TPIF نسبت به روش SPIF بهتر است.

۱-۴- کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی

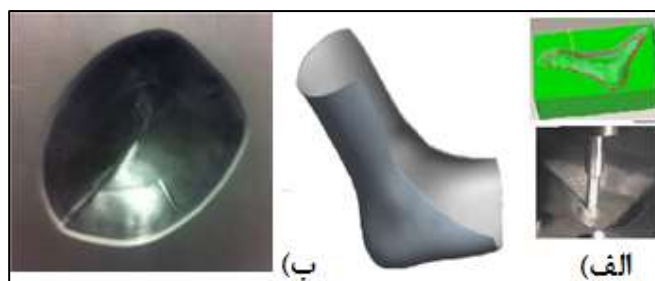
فرآیند شکل‌دهی تدریجی، در زمینه‌ی شکل‌دهی ورق‌ها و لوله‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد. در این راستا، می‌توان به ساخت صفحات بازتابنده چراغ‌های جلو و منی‌فولد آگزوز در صنعت خودروسازی اشاره نمود (شکل ۱-۷). بعدی در صنعت هوافضا برای ساخت درب که در قسمت ورودی بالای هواپیما بکارگیری می‌شود (شکل ۱-۸) و علاوه بر این، برای ساخت و تولید پروتزها و ایمپلنت‌های نظیر پشتیبان غوزک پا و صفحه جمجمه در مهندسی پزشکی مورد توجه قرار گرفته است (شکل ۱-۹) [۱۱ - ۱۴].



شکل ۷-۱. کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی در صنعت خودرو [۱۱]



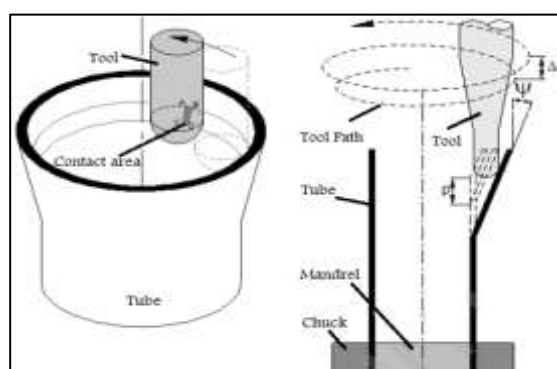
شکل ۸-۱. کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی در صنعت هوافضا [۱۳]



شکل ۹-۱. کاربرد فرآیند شکل‌دهی تدریجی در مهندسی پزشکی الف) پشتیبان غوزک پا [۱۲] ب) صفحه
جمجمه [۱۴]

۱-۵- فرآیند شکل دهی تدریجی انتهای لوله جدار نازک

امروزه، لوله‌های فلزی جدار نازک به صورت قابل ملاحظه‌ای به عنوان سازه‌های سبک و اجزای رابط در صنعت خودروسازی و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. فرآیند شکل‌دهی لوله‌های جدار نازک معمولاً از طریق روش‌های شکل‌دهی چرخشی، شکل‌دهی الکترومغناطیس و قالب‌های مجهز به سنبه و ماتریس انجام می‌شود که غالباً با افزایش هزینه و زمان تولید همراه است. از این رو فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به عنوان یک فناوری انعطاف‌پذیر مبتنی بر اصول ماشین‌کاری کنترل عددی برای شکل‌دهی هندسه‌های پیچیده از جمله لوله‌های جدار نازک بدون استفاده از ابزارهای خاص به صورت موضعی و پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد (مطابق شکل ۱-۱۰) [۱۵]. در گذشته، کشور ژاپن به دلیل توانایی در ساخت و شکل‌دهی ورق‌های فلزی به روش‌های مختلف، توجه زیادی را در این زمینه به خود جلب کرده است و پیشرفت فراوانی نیز داشته است. تاکنون این فناوری برای شکل‌دهی ورق‌های مسطح، در دسته‌های کوچک و متوسط در صنعت هوافضا، خودروسازی و پزشکی به کار گرفته شده است [۱۶].

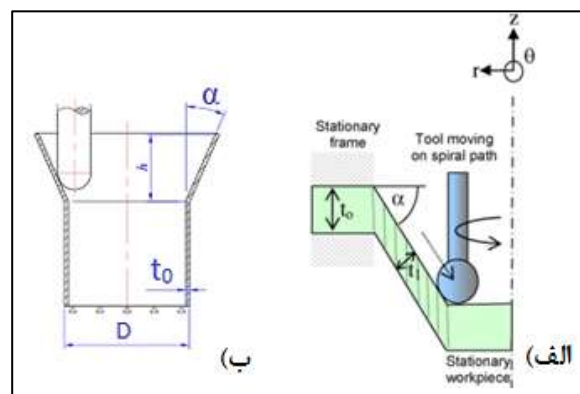


شکل ۱-۱۰. منبسط‌سازی انتهای لوله جدار نازک با استفاده از فرآیند SPIF [۱۵]

مکانیزم اصلی تغییر شکل انتهای لوله، با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی به دلیل کشش مواد در طی فرآیند شبیه به روش شکل‌دهی تدریجی ورق می‌باشد. به همین دلیل توزیع ضخامت ناحیه‌ی

شکل‌دهی شده انتهای لوله، معمولاً از قانون سینوسی مانند معادله (۱-۱) پیروی می‌کند [۱۷ و ۱۸].
(شکل ۱-۱) شماتیک شکل‌دهی ورق و لوله با استفاده از فرآیند SPIF را نشان می‌دهد.

$$t_1 = t_0 \times \sin \alpha \quad (۱-۱)$$



شکل ۱-۱. شماتیکی از معرفی پارامتر در الف) ورق ب) لوله [۱۷ و ۱۸]

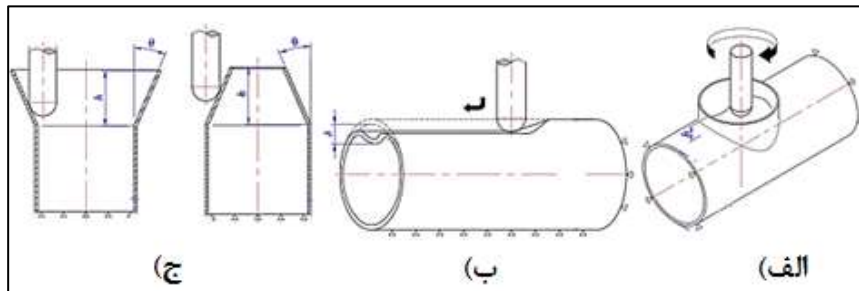
که در آن α زاویه تغییر شکل، t_0 ضخامت اولیه و t_1 ضخامت ثانویه است. لوله‌های شکل‌دهی شده با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی را می‌توان به چند دسته تقسیم نمود. (شکل ۱-۱۲) به برخی از آنها اشاره دارد:

- شکل‌دهی به صورت فلنج زنی سوراخ^۱ (تولید سه راهی)
- شکل‌دهی به صورت شیارزنی دیواره^۲
- شکل‌دهی به صورت انقباضی و انبساطی^۳

^۱ Hole flanging

^۲ Wall grooving

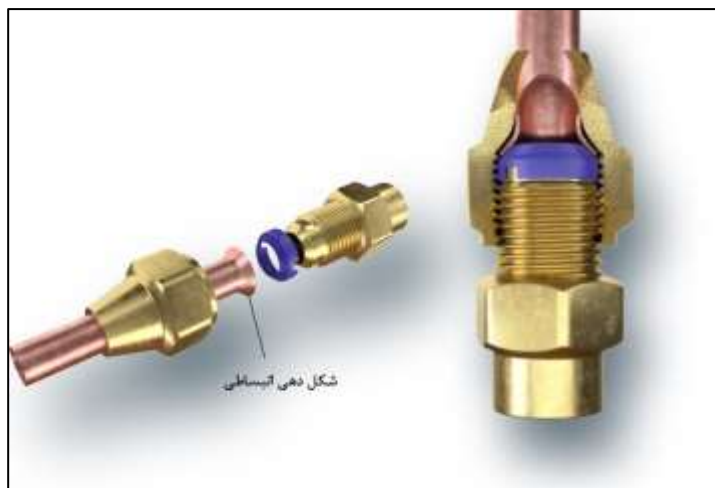
^۳ End expansion and reduction



شکل ۱-۱۲. شکل دهی لوله های جدار نازک به صورت الف) فلنج زنی سوراخ ب) شیار زنی و ج) انقباضی و انبساطی [۱۸]

۱-۶- کاربرد فرآیند شکل دهی تدریجی انتهای لوله

از جمله کاربردهای لوله های انبساطی یا انقباضی می توان به قطعات ورودی و خروجی گازها در موتور مرتبط با صنایع خودرو، هوافضا و کشتی سازی، رابط میان لوله ها با قطرهای مختلف (شکل ۱-۱۳) و همچنین ساخت لوله های چند راهه اشاره نمود [۱۹ - ۲۱].



شکل ۱-۱۳. نمونه ای از کاربرد لوله منبسط شده در اتصالات [۲۲]

فصل ۲

مروری بر پیشینه

۲-۱- مقدمه

در این فصل به پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرآیند شکل‌دهی تدریجی پرداخته می‌شود و مشتمل بر دو بخش اصلی در زمینه‌ی شکل‌دهی ورق و شکل‌دهی لوله می‌باشد. در پایان اهداف پژوهش پیش رو ارائه می‌شود.

۲-۲- فرآیند شکل‌دهی تدریجی ورق

رادو و کریستیا [۲۳] تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای از جمله: قطر ابزار، گام عمودی ابزار، نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل را بر دقت ابعادی و زبری سطح ورق‌های فولاد کربنی، AISI 304 و آلومینیوم AA1050 مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با کاهش قطر ابزار، گام عمودی ابزار و نرخ پیشروی و افزایش سرعت اسپیندل دقت ابعادی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش قطر ابزار، سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی و کاهش گام عمودی ابزار زبری سطح کاهش می‌یابد.

لیو و همکاران [۲۴] تأثیر متغیرهای ورودی از جمله: گام عمودی ابزار، نرخ پیشروی، ضخامت ورق و قطر ابزار را برای شکل‌دهی ورق AA7075-O با هندسه هرمی به منظور مطالعه زبری سطح داخلی و خارجی بررسی نمودند. حداقل زبری سطوح داخلی و خارجی با مقدار گام عمودی ابزار ۰,۳۳ mm، نرخ پیشروی ۵۳۳۳ mm/min، ضخامت ۱,۶ mm و قطر ابزار ۲۵ mm به دست آمد.

وحدتی و همکاران [۲۵] با استفاده از فرآیند SPIF به کمک ارتعاشی فراصوتی، تأثیر متغیرهای ورودی همچون: گام عمودی ابزار، ضخامت ورق، قطر ابزار، زاویه دیواره و نرخ پیشروی را بر برگشت فنی ورق Al1050-O بررسی کردند. مقادیر بهینه جهت دستیابی به حداقل میزان برگشت فنی

عبارتند از: مقدار گام عمودی ابزار ۰,۲۵ mm، ضخامت ۰,۹۱ mm، قطر ابزار ۱۰ mm، زاویه $58,38^\circ$ و نرخ پیشروی ۱۵۰۰ mm/min.

هنیا و همکاران [۲۶] با به کارگیری طراحی آزمایش، تأثیر متغیرهای ورودی شکل دهی تدریجی تک-نقطه‌ای از جمله: زاویه دیواره، قطر ابزار، ضخامت اولیه ورق و گام عمودی را بر نازک شدگی ورق آلومینیومی Al 3003-O با هندسه مخروط ناقص بررسی کردند. آن‌ها با توجه به نتایج دریافتند که زاویه دیواره بیشترین تأثیر را بر نازک شدگی دارد.

خلعتبری و همکاران [۲۷] به منظور دستیابی به حداکثر زاویه، شکل دهی ورق آلومینیومی AA3003-H12 با استفاده از فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر متغیرهای ورودی همچون: قطر ابزار، گام عمودی ابزار، نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و ضخامت اولیه ورق را بر پاسخ خروجی آزمایش نمودند. آن‌ها با توجه به نتایج، بیان نمودند که سرعت اسپیندل با مقدار ۲۴۰۰ rpm، نرخ پیشروی ۵۰۰۰ mm/min، گام عمودی ابزار ۰,۴۹ mm، ضخامت ۱,۶۹ و قطر ابزار ۶ mm (در وضعیت با دوران)، و قطر ابزار ۱۲ mm (در وضعیت بدون دوران) به عنوان مقادیر بهینه متغیرهای ورودی می‌باشند.

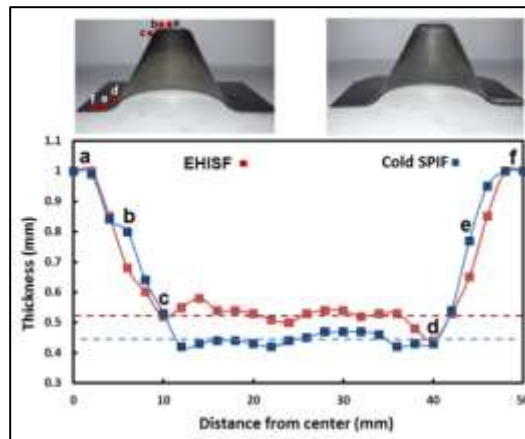
بهارودین و همکاران [۲۸] با استفاده از فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای، تأثیر متغیرهای ورودی همچون: قطر ابزار، گام عمودی ابزار، سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی را بر نیروی شکل دهی ورق از جنس AA6061-T6 مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها دریافتند که می‌توان با قطر ۱۰ mm، گام عمودی ۰,۲ mm، نرخ پیشروی ۵۰۰ mm/min و سرعت اسپیندل ۸۰۰ rpm مقدار نیروی شکل دهی را کاهش داد.

هنرپیشه و همکاران [۲۹] تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای از جمله: قطر ابزار، گام عمودی ابزار، سرعت اسپیندل و جنس ورق (آلومینیومی AA1050 و مس C10100) با

هندسه مخروطی ناقص را بر نازک شدگی و عمق شکست به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج نشان داد که قطر ابزار ۱۶ mm و سرعت دورانی اسپیندل ۶۰۰ rpm به ترتیب باعث کاهش نازک شدگی و افزایش عمق شکست می‌شوند.

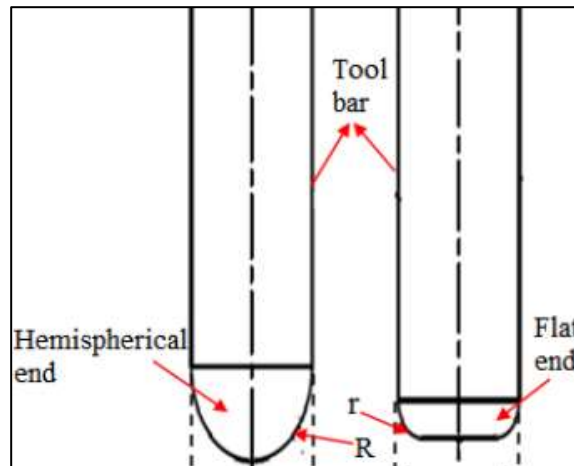
مصطفی‌نژاد و همکاران [۳۰] شکل‌دهی ورق آلومینیومی AA1050 را به صورت هندسه مخروطی و با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای انجام دادند. آنها اثر متغیرهای ورودی فرآیند از جمله: زاویه مخروطی، قطر ابزار، ضخامت ورق و گام عمودی را بر نازک شدگی و حداکثر نیروی شکل‌دهی مورد بررسی قرار دادند. مقادیر بهینه متغیرهای ورودی برابر با استفاده از تابع مطلوبیت با مقدار زاویه 45° ، قطر ابزار ۱۵ mm، ضخامت ۱ mm و گام عمودی ۰,۵ mm به دست آمدند.

وحدانی و همکاران [۳۱] با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تکنقطه‌ای به روش گرم و سرد ورقی از جنس DC01 را به صورت مخروطی شکل‌دهی نمودند. آنها دو روش شکل‌دهی تدریجی به - صورت گرم و سرد را به منظور مطالعه توزیع ضخامت مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که توزیع ضخامت را می‌توان با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی به روش گرم تقریباً ۱۸٪ بهبود بخشید (شکل ۱-۲). همچنین آنها تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند بر عمق شکل‌دهی را بررسی نمودند. با توجه به نتایج حاصله مشخص شد که با جریان ۳۰۰ A، گام عمودی ۰,۲ mm، نرخ پیشروی ۹۰۰ mm/min و استفاده از روانکار گرافیت، می‌توان مقدار عمق شکل‌دهی را افزایش داد.



شکل ۲-۱. مقایسه توزیع ضخامت با استفاده از شکل‌دهی تدریجی به روش سرد و گرم [۳۱]

کومار و گولاتی [۳۲] با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای و به منظور دستیابی به کیفیت سطحی از هندسه مخروطی، ورق از جنس آلومینیومی AA 2014 را شکل‌دهی کردند. در این پژوهش، تأثیر متغیرهای ورودی همچون: ضخامت ورق، قطر ابزار، گام عمودی ابزار، زاویه دیواره، نرخ پیشروی، هندسه ابزار به صورت سرنیمکروی و سرتخت (شکل ۲-۲)، ویسکوزیته روغن و سرعت اسپیندل، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که ورق با ضخامت ۸ mm، قطر ابزار ۰.۸ mm با هندسه نیمکروی، گام عمودی ۰.۲ mm، زاویه دیواره 60° ، نرخ پیشروی ۱۵۰۰ mm/min، ویسکوزیته روغن ۳۲۰ cSt و با سرعت اسپیندل ۱۰۰۰ rpm به عنوان مقادیر بهینه متغیرهای ورودی هستند. همچنین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر زبری سطح به ترتیب: قطر ابزار با سهم ۲۸.۹۵٪، هندسه ابزار ۱۴.۵۶٪، ویسکوزیته روغن ۶.۷۱٪، ضخامت ورق ۶.۲۴٪ و اندازه گام ۵.۷۳٪ حاصل شد.



شکل ۲-۲. هندسه ابزارهای مورد استفاده [۳۲]

آژری و همکاران [۳۳] به صورت تجربی و با در نظر گرفتن هندسه ابزار به شکل سرنیمکروی و سَرکروی، تأثیر نرخ پیشروی ابزار و گام عمودی ابزار بر کاهش زبری سطح ورق آلومینیومی AA 5052 را بررسی نمودند. نتیجه حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از ابزار سَرکروی نسبت به ابزار سرنیمکروی منجر به کاهش زبری سطح می‌شود.

اورائون و همکاران [۳۴] تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند SPIF از جمله: ضخامت ورق، نرخ پیشروی ابزار، زاویه دیواره، سرعت اسپیندل، گام عمودی ابزار و چگالی روانکار را بر حداقل نیروی شکل‌دهی ورق Al-Mg بررسی نمودند. نتایج آزمایشات نشان داد که ضخامت ورق ۰,۲ mm با سهم ۷۴,۷۴٪، نرخ پیشروی ۲۰ mm/min با سهم ۲,۰۲٪، زاویه دیواره ۴۵° با سهم ۸,۳۰٪، گام عمودی ابزار ۰,۱ mm با سهم ۱۲,۳۰٪ و سرعت اسپیندل و چگالی روانکار با سهم ناچیز باعث کاهش نیروی شکل‌دهی می‌شود.

کومار و گولاتی [۳۵] برای شکل‌دهی ورق با هندسه مخروطی و از جنس AA2014 متغیرهای ورودی فرآیند همچون: استراتژی مسیر ابزار، قطر ابزار، ضخامت ورق، گام عمودی ابزار، سرعت اسپیندل، نرخ

پیشروی و روانکار را بر نیروی شکل‌دهی و ضخامت دیواره بررسی نمودند. نتایج نشان داد که ضخامت ورق بیشترین اثر را بر نیروی شکل‌دهی دارد و همچنین قطر ابزار، نرخ پیشروی ابزار، سرعت اسپیندل و ضخامت ورق به عنوان موثرترین متغیرهای ورودی بر کاهش ضخامت دیواره شناخته شدند.

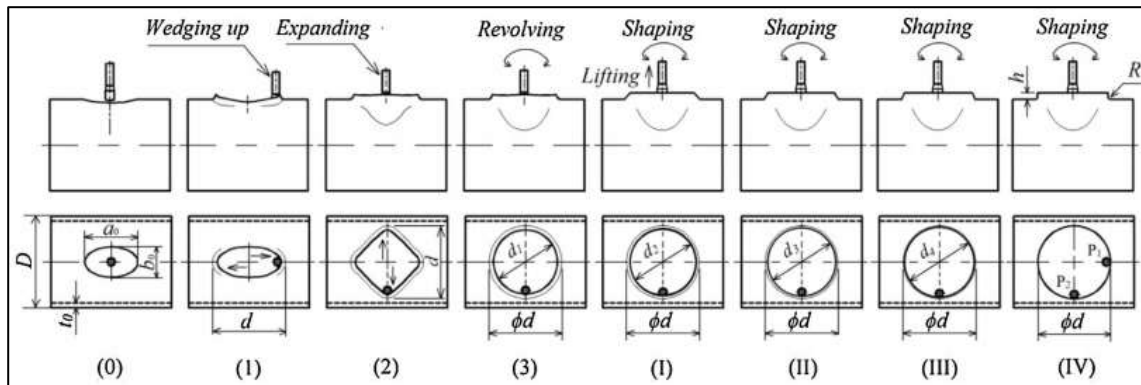
گانش و همکاران [۳۶] به بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند SPIF و موثر بر پاسخ‌های چند هدفه (زبری سطح و زاویه دیواره) ورق آلومینیومی AA ۵۰۵۲ پرداختند. آنها نشان دادند که، سرعت اسپیندل و قطر ابزار به ترتیب بیشترین تأثیر را بر زبری سطح و زاویه دیواره دارند.

شجاعی فرد و همکاران [۳۷] شکل‌دهی ورق فولادی از جنس St12 با استفاده از فرآیند SPIF را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به کمک طراحی آزمایش، تأثیر متغیرهای ورودی از جمله: نرخ پیشروی، قطر ابزار، گام عمودی ابزار و سرعت اسپیندل را بر زبری سطح بررسی نمودند. با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی، قطر ابزار و گام عمودی ابزار به عنوان عوامل موثر شناخته شدند.

۲-۳- شکل‌دهی تدریجی لوله

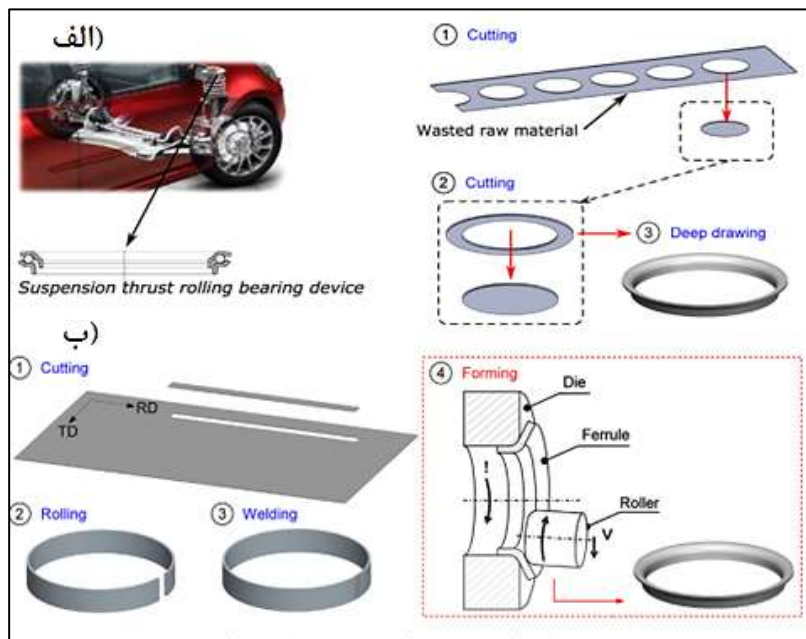
در این بخش به پژوهش‌های انجام انجام شده در حوزه شکل‌دهی انتهای لوله‌های جدار نازک با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی پرداخته شده است. ماتسوبارا [۳۸] در سال ۱۹۹۴ میلادی توانست با استفاده از فرآیند SPIF، هندسه‌های متقارن و چند ضلعی را در انتهای لوله ایجاد کند.

یانگ و همکاران [۳۹] به مطالعه حد شکل‌دهی برای ساخت لوله چند راهه از جنس فولاد زنگ‌نزن سری 316L با استفاده از ماشین فرز CNC پرداختند. آنها با ساخت یک ابزار مخصوص و اجرای مراحل مختلف فرآیند دریافتند که با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی، می‌توان قطعات لوله‌ای خاص را با انعطاف‌پذیری بالا تولید کرد. (شکل ۲-۳) مراحل اجرای ساخت لوله سه‌راهی با استفاده از دستگاه CNC سه محوره را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳. مراحل ساخت لوله سهراهی با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای [۳۹]

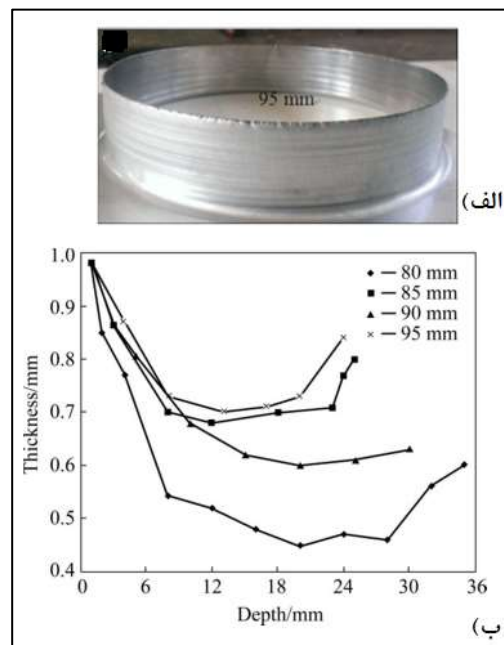
راژول ویل و همکاران [۴۰] با استفاده از فرآیند SPIF یک یاتاقان استوانه‌ای شکل از جنس DC03 مورد استفاده در سیستم تعلیق خودرو را به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که فرآیند SPIF به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و کاهش هدر رفت مواد اولیه و افزایش خواص مکانیکی مواد می‌تواند جایگزین فرآیندهای سنتی شود. (شکل ۲-۴) ترتیب مراحل ساخت و مقایسه روش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴. مراحل ساخت یاتاقان استوانه‌ای مورد استفاده در سیستم تعلیق خودرو با استفاده از فرآیند SPIF (الف) سنتی (ب) [۴۰]

ون و همکاران [۱۸] میزان تغییر شکل انتهای لوله از جنس AA 6061 و 316L را با استفاده از فرآیند SPIF به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با شبیه‌سازی عددی و آزمون تجربی، مقادیر نیرو و حد شکل‌دهی در دیواره لوله را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که تغییر ضخامت دیواره می‌تواند به سه حالت: نازک‌شدگی دیواره در روش انبساطی، ضخیم‌شدگی دیواره در روش انقباضی و عدم تغییر ضخامت دیواره در روش شیارزنی، ظاهر شود.

حاسین و همکاران [۴۱] برای ساخت فلنج بر روی ورق آلومینیومی در چهار مرحله با زاویه 45° الی 90° فرآیند پرسکاری و فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اظهار داشتند که اندازه سوراخ تأثیر بسزایی در توزیع تنش/کرنش در فلنج استوانه‌ای دارد. زیرا، با افزایش قطر سوراخ به دلیل افزایش کرنش محیطی و کاهش تنش فون مایزرز، ضخامت در دیواره فلنج افزایش می‌یابد (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵. الف) فلنج زنی با استفاده از فرآیند SPIF ب) مقایسه توزیع ضخامت در قطرهای مختلف سوراخ [۴۱]

ون و همکاران [۴۲] توانستند با ساخت گروهی از ابزارهای مخصوص و بکارگیری آن به جای ابزار سرکروی، تغییر شکل داخلی و خارجی انتهای لوله و همچنین سه راهی را مورد بررسی قرار دهند. آن‌ها دریافتند که می‌توان با بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند، تغییر در هندسه ابزار و بکارگیری کنترل اتوماتیک، فرآیند را توسعه داد. (شکل ۲-۶) هندسه ابزارهای مخصوص مورد استفاده در فرآیند SPIF را نشان می‌دهد.

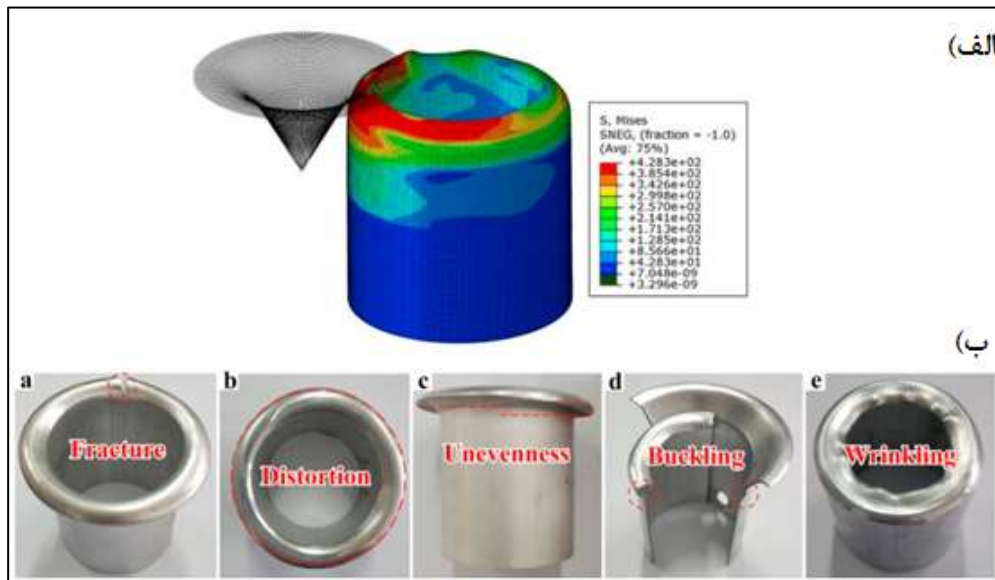


شکل ۲-۶. انواع ابزارهای مورد استفاده برای شکل‌دهی انتهای لوله در فرآیند SPIF [۴۲]

هاشمی و همکاران [۴۳] با آزمون‌های تجربی شکل‌دهی انتهای لوله مسی با هندسه بشکه‌ای را با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر گام عمودی ابزار، سرعت شکل‌دهی فرآیند و عمق شکل‌دهی را بر زبری سطح و توزیع ضخامت مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که گام عمودی ابزار ۰,۲۵ mm، عمق شکل‌دهی ۰,۵ mm و سرعت شکل‌دهی mm/min ۴۰۰ منجر به کاهش زبری سطح لوله می‌شود. همچنین گام عمودی ابزار به عنوان تأثیرگذارترین متغیر بر کاهش ضخامت معرفی شد.

ون و همکاران [۴۴] با ساخت یک ابزار سرمخروطی و بکارگیری آن به جای ابزار سرکروی، تغییر شکل داخلی و خارجی انتهای لوله را به صورت عددی و تجربی و در مقایسه با روش سنبه و ماتریس مورد بررسی قرار دادند. (مطابق شکل ۲-۷-الف) آن‌ها با شبیه‌سازی نشان دادند که برای منقبض-

سازی انتهای لوله، حداکثر تنش در لبه لوله ظاهر می‌شود که مستعد پارگی و شکست می‌باشد. همچنین (مطابق شکل ۷-۲ ب) با افزایش فشار محوری جهت شکل‌دهی لبه‌ها، منجر به ظاهر شدن عیوبی در لبه لوله می‌شود.



شکل ۷-۲. الف) کانتور تنش فون مایز در شکل‌دهی داخلی لوله ب) عیوب حاصل از افزایش فشار محوری [۴۴]

موحدی‌نیا و همکاران [۴۵] شکل‌پذیری انتهای لوله با هندسه مخروط ناقص از جنس آلومینیومی را با استفاده از فرآیند شکل‌دهی تدریجی تکنقطه‌ای و فرآیند پرسکاری به صورت عددی و تجربی، مطالعه و مقایسه نمودند. آن‌ها دریافتند که با حرکت ابزار از "پایین به بالا"، ضخیم‌شدگی کمتری نسبت به حرکت از "بالا به پایین" به وجود می‌آید. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از استراتژی چند مرحله‌ای، با افزایش زاویه مخروطی و اندازه گام عمودی، تغییر شکل بهتری صورت می‌پذیرد، اما از دقت ابعادی و صافی سطح کاسته می‌شود.

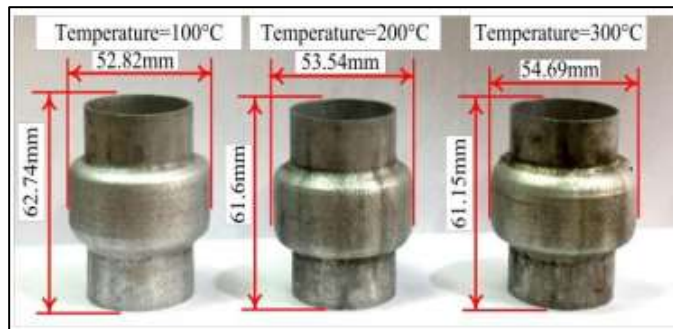
رحمانی و همکاران [۴۶] با بکارگیری فرآیند شکل‌دهی تدریجی تکنقطه‌ای، انتهای لوله مسی جدار نازک را با هندسه مربعی شکل‌دهی نمودند. آن‌ها تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند همچون: سرعت

خطی، اندازه گام عمودی (پیشروی محوری) و اندازه گام افقی (پیشروی شعاعی) را بر نرخ نازک شدگی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج حاصله، سرعت خطی 700 mm/min ، پیشروی محوری 0.75 mm و پیشروی شعاعی 0.3 mm باعث کاهش میزان نازک شدگی در گوشه‌های لوله می‌شود. دلیل این امر آن است که افزایش پیشروی شعاعی منجر به کاهش برگشت فنری و افزایش حد شکل‌دهی (تغییر شکل پلاستیک) می‌شود. (شکل ۲-۸) نمونه‌ای از شکل‌دهی لوله‌های مسی با مقطع مربعی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸. شکل‌دهی انتهای لوله‌های مسی با هندسه مربعی با استفاده از فرآیند SPIF [۴۶]

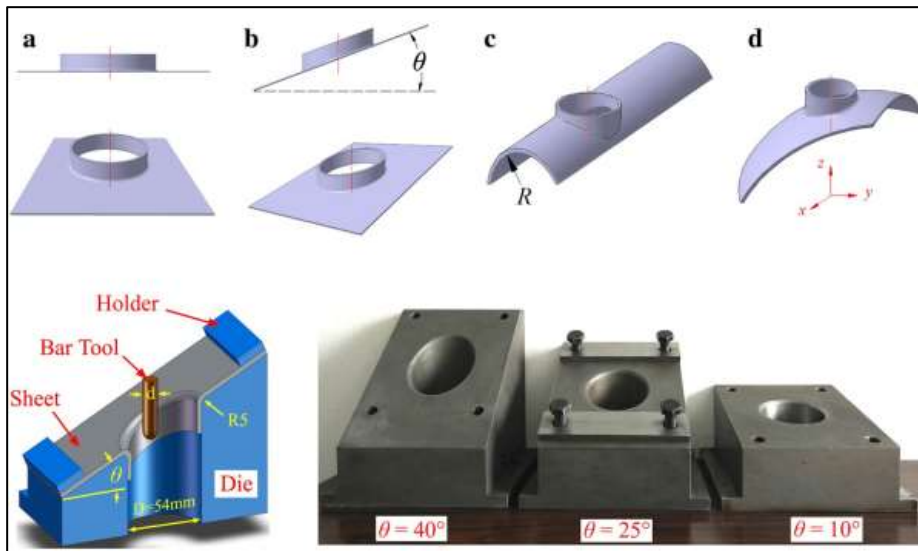
رحمانی و همکاران [۴۷] فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به روش گرم را به منظور شکل‌دهی لوله آلومینیومی AA 6063 به شکل بشکه‌ای و با استفاده از یک ابزار مخصوص، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که اجرای فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم در دمای 100°C سانتی‌گراد با پیشروی محوری و شعاعی 0.5 mm ، منتج به کاهش زبری سطح خواهد شد. (شکل ۲-۹) هندسه بشکه‌ای لوله آلومینیومی حاصل از فرآیند شکل‌دهی تدریجی گرم را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹. شکل دهی لوله با فرم بشکه‌ای با استفاده از فرآیند شکل دهی تدریجی گرم [۴۷]

سیدکاشی و همکاران [۴۸] با استفاده از فرآیند شبیه‌سازی و آزمون تجربی، شکل دهی تدریجی لوله آلومینیومی با فرم بشکه‌ای را با استفاده از فرآیند شکل دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای به روش گرم بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر دما و سرعت شکل دهی فرآیند بر حد شکل دهی که با استفاده از معیارهای شکست نرم به صورت زیر برنامه در شبیه‌سازی تعریف شد، مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به نتایج به دست آمده، در دمای 300°C حد شکل دهی افزایش و با سرعت 800 mm/min ، حد شکل دهی کاهش می‌یابد.

چن و همکاران [۴۹] ایجاد لوله‌های سهراهی بر روی ورق‌های AA6061 و فولادی 304 را با استفاده از فرآیند شکل دهی تدریجی دو نقطه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تأثیر میزان قطر ابزار، اندازه گام عمودی ابزار و زاویه شیب سطح قالب را بر برگشت فنری بررسی نمودند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، میزان برگشت فنری با افزایش قطر ابزار، اندازه گام عمودی ابزار و زاویه شیب سطح قالب، افزایش یافت. (شکل ۲-۱۰) مراحل ایجاد لوله سهراهی را بر روی ورق آلومینیومی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰. مراحل ایجاد سه‌راهی بر روی ورق آلومینیومی با استفاده از فرآیند TPIF [۴۹]

کریستینو و همکاران [۵۰] میزان حد شکل‌دهی انتهای لوله AA6063-T6 را به صورت عددی و تجربی در دو روش پرسکاری و شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای مقایسه نمودند. آن‌ها با توجه به نتایج دریافتند که مقدار حد شکل‌دهی در فرآیند شکل‌دهی تدریجی به مراتب بالاتر از فرآیند پرسکاری است. همچنین نتایج نشان داد که مقدار نازک شدگی دیواره لوله در روش شکل‌دهی تدریجی بیشتر از روش معمولی می‌باشد.

آقایی و همکاران [۵۱] به شبیه‌سازی و تحلیل تجربی فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک‌نقطه‌ای انتهای لوله تیتانیومی پرداختند. آن‌ها متغیرهایی همچون: گام زاویه‌ای ۵ و ۱۰°، طول شکل‌دهی ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۳ mm را در دمای اتاق و ۴۰۰°C، بر حد شکل‌دهی انتهای لوله مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج مشخص شد که حد شکل‌دهی با استفاده از گام زاویه‌ای ۱۰° در طول‌های شکل‌دهی بیان شده، به ترتیب ۲۰٪، ۸۰٪، ۱۰۰٪ و ۷۵٪ نسبت به گام زاویه‌ای ۵° افزایش یافت. همچنین افزایش دما از دمای اتاق به دمای ۴۰۰°C با گام زاویه‌ای ۵° در طول شکل‌دهی ۲۵ و ۳۳ mm، باعث بهبود حد شکل‌دهی به ترتیب به مقدار ۶۰٪ و ۸۷٫۵٪ گردید. همچنین نتایج نشان داد، با افزایش گام زاویه‌ای و دمای شکل‌دهی، به ترتیب باعث کاهش عیوب سطحی، افزایش کیفیت سطح و دقت ابعادی می‌شود.

۲-۴- اهداف پژوهش

با توجه به قابلیت فرآیند SPIF و مزایای آن در مقایسه با فرآیندهای شکل‌دهی سنتی متداول (قابلیت شکل‌پذیری بالاتر ماده و هزینه کمتر تجهیزات) و با توجه به مطالعات اندکی که در زمینه جوانب کیفی نمونه حاصل از شکل‌دهی انتهای لوله جدار نازک با استفاده از این فرآیند، انجام شده است، در این پژوهش، متغیرهای موثر بر دقت ابعادی و زبری سطح نمونه حاصل از شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله با استفاده از فرآیند SPIF، مورد مطالعه و بررسی قرار خواهند گرفت. از جمله جوانب نوآوری پژوهش پیشرو می‌توان به: مطالعه و بررسی تأثیر گام زاویه‌ای ابزار به همراه سایر متغیرهای ورودی بر پارامترهای پاسخ، طراحی آزمون‌های تجربی مبتنی بر اصول طراحی آزمایش به منظور مطالعه تأثیرات مستقل و وابسته متغیرهای موثر بر دقت ابعادی و زبری سطح نمونه‌های شکل‌دهی‌شده با استفاده از متدلوژی سطح پاسخ، استخراج توابع ریاضی و معادلات رگرسیون به منظور پیش‌بینی پارامترهای پاسخ (دقت ابعادی و زبری سطح نمونه‌های شکل‌دهی‌شده) و بهینه‌سازی متغیرهای موثر بر دقت ابعادی و زبری سطح نمونه‌های شکل‌دهی‌شده با استفاده از تابع مطلوبیت، اشاره نمود.

۲-۵- ساختار پایان‌نامه

در این پژوهش، در فصل سوم، مواد و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده به منظور شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله و سیستم‌های اندازه‌گیری تشریح می‌شود. سپس، در فصل چهارم به معرفی اصول و روش طراحی آزمایش‌ها و پاسخ‌های خروجی اندازه‌گیری و محاسبه شده پرداخته می‌شوند. در ادامه و در فصل پنجم نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری و بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ با استفاده از نرم افزار مینی‌تب [۵۲] بررسی می‌شود. در پایان، نتیجه‌گیری و پیشنهادهای محققان پایان‌نامه پیش رو، در فصل ششم ارائه خواهد شد.

فصل ۲

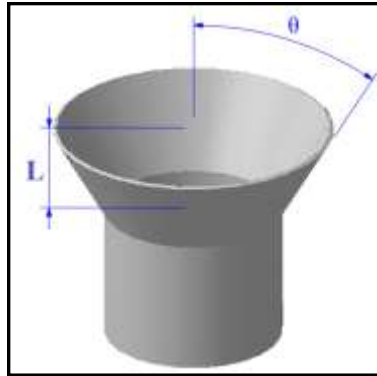
مواد و تجهیزات

۳-۱- مقدمه

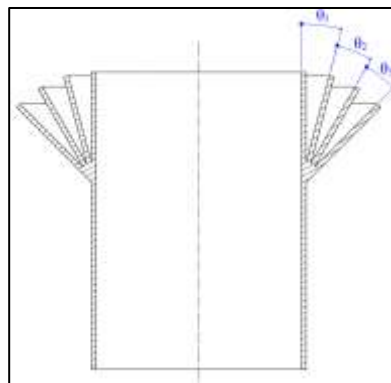
در این فصل به تشریح جنس مواد و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده برای شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله به کمک فرآیند SPIF پرداخته می‌شود. همچنین در ادامه، نحوه اندازه‌گیری پاسخ‌های خروجی مورد نظر شرح داده می‌شود.

۳-۲- قابلیت شکل‌پذیری مواد

در این پژوهش با استفاده از فرآیند SPIF انتهای لوله به قطر خارجی ۳۸ mm با هندسه مخروطی با نیم زاویه θ و طول شکل‌دهی L (مطابق شکل ۳-۱) منبسط می‌شود. برای دستیابی به حداکثر نیم زاویه مخروطی از گام زاویه‌ای مانند (شکل ۳-۲) استفاده شد.



شکل ۳-۱. شماتیک لوله منبسط شده با نیم زاویه θ و طول شکل‌دهی L



شکل ۳-۲. نحوه اعمال گام زاویه‌ای جهت دستیابی به نیم زاویه مخروطی

در این پژوهش، لوله از جنس فولاد زنگ نزن AISI 304 با قطر خارجی ۳۸ mm برای شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله در نظر گرفته شد. از آنجایی که این جنس لوله در پژوهش‌های پیشین، مورد استفاده قرار نگرفته بود، از این رو برای بررسی قابلیت شکل‌پذیری لوله فوق‌الذکر، آزمون‌های تجربی اولیه انجام شد. بنابراین برای بررسی قابلیت شکل‌پذیری لوله، نمونه لوله با ضخامت‌های ۰,۸، ۰,۹ و ۰,۵ mm تهیه شد و آزمون نمونه در گام‌های زاویه‌ای ۵° جهت رسیدن به نیم زاویه ۳۰° با طول شکل‌دهی ۱۰ و ۲۰ mm و استراتژی "بالا به پایین"^۱ و "پایین به بالا"^۲ با ابزار به قطر ۱۲ mm انجام شد که نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده در (جدول ۳-۱ الی ۳-۳) شرح داده شده است.

جدول ۳-۱. شکل‌دهی لوله با ضخامت ۰,۹ mm

گريد	توليد كننده	استراتژی شكل‌دهی	نتیجه حاصل از شكل‌دهی
۳۰۴	داخلی	پایین به بالا	

شکل‌دهی نمونه فوق با استفاده از لوله‌ای به ضخامت ۰,۹ mm در طول شکل‌دهی ۲۰ mm و با گام زاویه‌ای ۵° انجام شد که در گام زاویه‌ای دوم یعنی ۱۰° از ناحیه درز جوش دچار پارگی شد.

^۱ Top to Bottom movement (TB)

^۲ Bottom to Top movement (BT)

جدول ۳-۲. شکل دهی لوله با ضخامت ۰,۸ mm

گريد	توليد كننده	استراتژي شكل دهی	نتيجه حاصل از شكل دهی
۳۰۴ Sumwin	خارجی	پایین به بالا	
		بالا به پایین	

شكل دهی نمونه فوق با استفاده از لوله ای به ضخامت ۰,۸ mm در طول شكل دهی ۱۰ mm و با گام زاویه ای 5° انجام شد که در گام زاویه ای ششم یعنی 30° در لبه های لوله پارگی ظاهر شدند. همچنین نمونه آزمون در طول ۲۰ mm با گام زاویه ای فوق و استراتژی پایین به بالا شكل دهی شد که در گام زاویه ای چهارم یعنی 20° لبه های لوله دچار پارگی شد.

جدول ۳-۳. شکل دهی لوله با ضخامت ۰,۵ mm

گرید	تولید کننده	استراتژی شکل دهی	نتیجه حاصل از شکل دهی
۳۰۴ Sumwin	خارجی	پایین به بالا	

شکل دهی نمونه فوق با استفاده از لوله ای به ضخامت ۰,۵ mm در طول شکل دهی ۲۰ mm و با گام زاویه ای ۵° انجام شد که در گام زاویه ای پنجم یعنی ۲۵° از لبه لوله پارگی آغاز شد و در گام زاویه ای ۳۰° پارگی در لبه ها رفته رفته افزایش یافت. لذا، لبه های لوله در نیم زاویه ۲۰° بدون پارگی تغییر شکل یافت. بنابراین با توجه به نتایج آزمون های اولیه، برای این پژوهش لوله با ضخامت ۰,۵ mm، طول شکل دهی ۲۰ mm و نیم زاویه ۲۰° انتخاب شد. همچنین لازم به ذکر است که برای برشکاری لوله در طول های مشخص جهت اجرای آزمون های تجربی از دستگاه برش دیسکی استفاد گردید. سپس لبه های لوله برش زده شده با دستگاه پولیش کاری METCO پولیش شدند.

۳-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی لوله

ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 304 به شرح جدول (۳-۴) می باشد. همچنین خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن گرید ۳۰۴ مطابق جدول (۳-۵) می باشند.

جدول ۴۳- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 304 [۵۳]

گرماد	وزنی درصد	کربن	منگنز	سیلیسیم	فسفر	گوگرد	کروم	نیکل	نیتروژن
۳۰۴	حداقل	-	-	-	-	-	۱۸	۸	-
	حداکثر	۰,۰۸	۲	۰,۷۵	۰,۰۴۵	۰,۰۳	۲۰	۱۰,۵	۰,۱

جدول ۳-۵. خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن AISI 304 [۵۳]

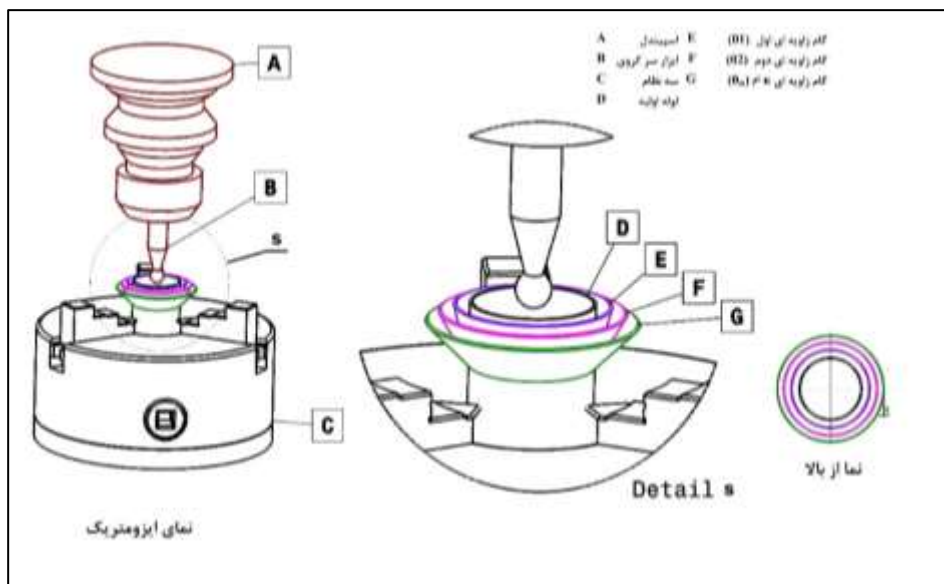
خاصیت	نماد	مقدار	واحد
چگالی	ρ	۸۰۰۰	Kg/m ³
مدول یانگ	E	۱۹۳	GPa
ضریب پواسون	ν	۰,۲۹	-
تنش تسلیم (۰,۲ درصد)	σ_y	۲۰۵	MPa
تنش نهایی	σ_u	۵۱۵	MPa
درصد ازدیاد طول		۴۰	-

۳-۴- تجهیزات فرآیند SPIF

فرآیند شکل دهی با استفاده از ماشین فرز سی ان سی مستقر در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شد. برای تثبیت لوله از یک سه نظام که توسط گیره بر روی میز ماشین فرز بسته شده است، استفاده شد. (شکل ۳-۳) دستگاه فرز سه محوره به همراه سایر اجزا را نشان می دهد. از آنجایی که لوله مورد نظر توخالی و ضخامت آن کم می باشد، برای جلوگیری از تغییر شکل پلاستیک لوله بین فک های سه نظام از یک مندرل^۳ استفاده شد (شکل ۳-۴). شکل دهی انتهای لوله با ابزارهای سرکروی به قطرهای

^۳ Mandrel

۸، ۱۰ و ۱۲ mm از جنس فولاد سرد کار با نرخ پیشروی ۸۰۰ mm/min بدون چرخش و در یک مسیر مارپیچی با مقادیر متفاوتی از گام، گام زاویه‌ای و روانکار انجام شد. (شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶) به ترتیب ابزارها و روانکارهای استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. (شکل ۳-۷) نمای انفجاری ستاپ فرآیند را نشان می‌دهد. نقشه مهندسی تجهیزات در پیوست الف ارائه شده‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳. الف) نحوه اعمال تدریجی گام زاویه‌ای در حین شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله (ب) نمایی از ماشین فرز سی ان سی با کنترلر فانوک



شکل ۳-۴. مندرل فولادی



شکل ۳-۵. ابزار سر کروی با قطرهای (الف) ۸ (ب) ۱۰ و (ج) ۱۲ mm



شکل ۳-۶. نوع روانکار (الف) گریس معمولی (ب) پودر گرافیت و (ج) روغن معمولی

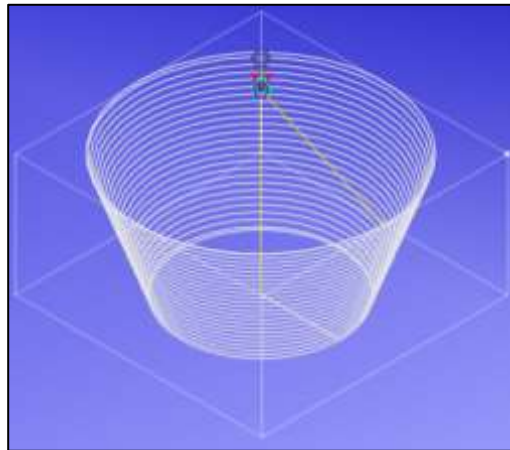


شکل ۳-۷. نمای انفجاری اجزای فرآیند

۳-۵- تنظیمات فرآیند

۳-۵-۱- استراتژی شکل‌دهی

مکانیزم تغییر شکل انتهای لوله با مکانیزم تغییر شکل ورق کاملاً متفاوت است. همچنین، با توجه به این که در استراتژی حرکت ابزار از "بالا به پایین"، به دلیل اینکه در زوایای بزرگ و محدودیت میزان زاویه شکل‌دهی، حداکثر تغییر شکل در لبه‌های لوله اتفاق می‌افتد، لبه‌های لوله مستعد پارگی خواهد بود. به همین علت در این پژوهش از استراتژی با روش شکل‌دهی "پایین به بالا" استفاده شد. به عبارتی حرکت ابزار از داخل لوله در یک مسیر مخروطی به سمت بالا حرکت می‌کند. این روش شکل-دهی به عنوان روش BT نامگذاری شده است. (شکل ۳-۸) روش شکل‌دهی از پایین به بالا را نشان می‌دهد.



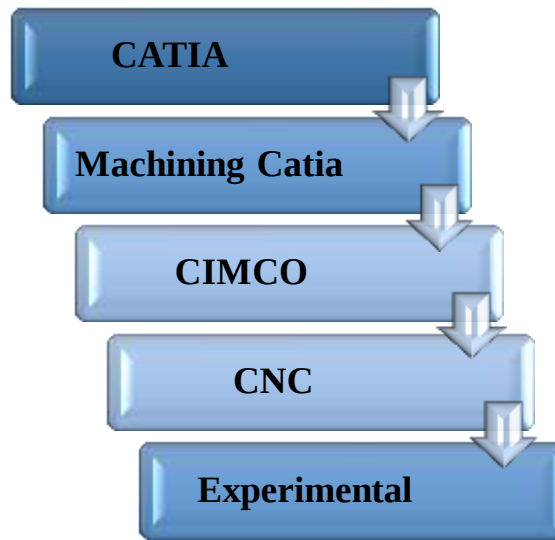
شکل ۳-۸. مسیر حرکت ابزار به صورت مارپیچ (روش از پایین به بالا)

۳-۵-۲- استخراج مسیر حرکت ابزار

برای استخراج مسیر حرکت ابزار ابتدا مدل مورد نظر در یکی از نرم افزارهای CAD طراحی می شود و سپس با استفاده از نرم افزارهای CAM مسیر حرکت مورد نیاز استخراج می شود. در پژوهش پیش رو، برای استخراج مسیر حرکت ابزار در یک مسیر مخروطی، ابتدا هندسه مورد نظر در نرم افزار کتیا^۴ [۵۴] مدل شد و با استفاده از بخش ماشینکاری نرم افزار کتیا، با تنظیم پارامترهای اولیه همچون: نوع مسیر حرکت ابزار (مارپیچ)، گام عمودی ابزار و قطر ابزار جی کدهای مد نظر استخراج شد. سپس جی-کدهای به دست آمده متناسب با کنترلر ماشین فرز مورد استفاده در کارگاه در نرم افزار سیمکو^۵ [۵۵] ویرایش شدند و از طریق کامپیوتر به دستگاه فرز برای انجام آزمون های تجربی ارسال شد. (شکل ۳-۹) روند استخراج جی کد را نشان می دهد.

^۴ Catia V5R21

^۵ Cimco 8.08.10



شکل ۳-۹. روند استخراج مسیر حرکت ابزار

۳-۶- تجهیزات اندازه گیری

برای اندازه گیری ابعاد لوله از جمله: قطر، ضخامت و طول اولیه از کولیس دیجیتال گوانگلو^۶ با دقت 0.01 mm و همچنین برای اندازه گیری مقدار زبری سطوح، توزیع ضخامت و دقت ابعادی لوله به ترتیب از دستگاه: زبری سنج ماهر^۷، کروپلین^۸ و پروفایل پروژکتور استفاده شد. (شکل های ۳-۱۰ الی ۳-۱۲) به ترتیب وسایل اندازه گیری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهند.



شکل ۳-۱۰. کولیس دیجیتال با دقت 0.01 mm

⁶ Guanglu - China

⁷ Mahr ps1 (7061) - Germany

⁸ Kroepline - Germany



شکل ۳-۱۱. زبری سنج Mahr مدل PS1



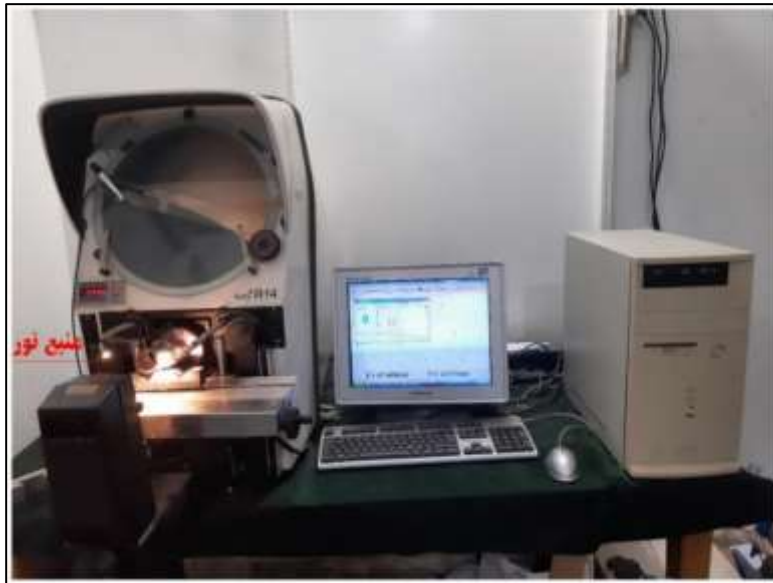
شکل ۳-۱۲. ضخامت سنج کروپلین با دقت 0.01 mm

۳-۶-۱- دستگاه پروفایل پروژکتور^۹

امروزه به دلیل بررسی دقت و اندازه‌گیری قطعات تولیدی در صنعت از نظر: ابعادی، کنترل زوایا و گام پیچ، استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بخش کنترل کیفیت از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو، دستگاه پروفایل پروژکتور به عنوان یکی از سیستم‌های پیشرفته اندازه‌گیری دقیق قطعات صنعتی می‌باشد که در مدل‌های مختلف در صنعت موجود است. این دستگاه از طریق نور عبوری و انعکاسی توسط لنز و عدسی، امکان اندازه‌گیری قطعات را بدون این که نیرویی به آنها وارد کند بر روی صفحه نمایش فراهم می‌کند. میز دستگاه در جهات X, Y حرکت خطی دارد که توسط ریز سنچ‌ها با دقت 0.005 mm کنترل می‌شود [۵۶]. با قرار دادن قطعه بر روی میز دستگاه و عبور نور از

^۹ Profile Projector Baty R14

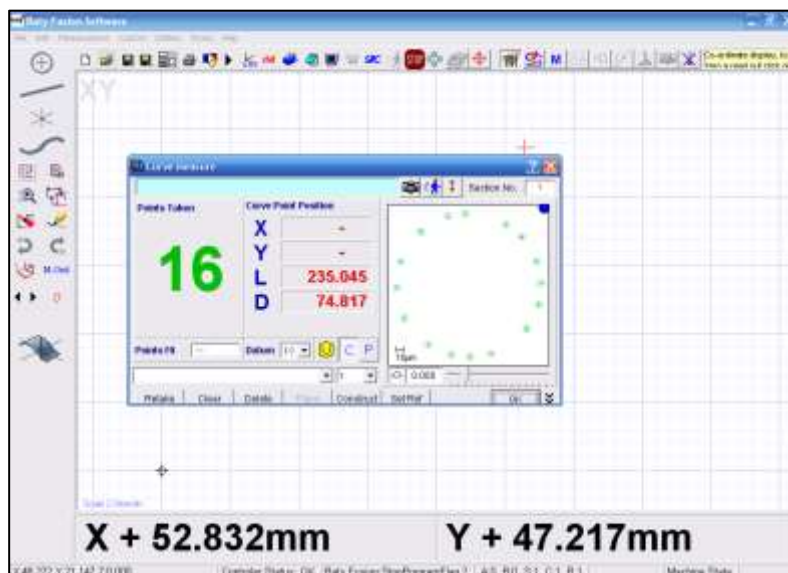
آن با تصویر منعکس شده در صفحه نمایش که توسط سنسورهای دیجیتالی که به سیستم کامپیوتری متصل می‌باشد با بزرگنمایی ۵ تا ۱۰۰ برابر با دقت ابعادی 0.001 mm نمایش داده و اندازه‌گیری می‌کند. در این پژوهش از دستگاه پروفایل پروژکتور افقی مدل Baty R14 با نقطه‌یابی از لبه لوله‌های شکل‌دهی شده و تبدیل به فایل خروجی DXF، اندازه‌گیری قطر دهانه لوله‌ها انجام شد. (شکل‌های ۱۳-۳ الی ۱۵-۳) دستگاه اندازه‌گیری پروفایل پروژکتور مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳-۳. دستگاه پروفایل پروژکتور مدل Baty R14



شکل ۳-۱۴. نحوه قرارگیری لوله منبسط شده در پروفایل پروژکتور مدل Baty R14



شکل ۳-۱۵. نحوه اندازه گذاری (نقطه یابی) با استفاده از نرم افزار پروفایل پروژکتور

۳-۶-۲- میکروسکوپ نوری

میکروسکوپ نوری یکی از انواع ریزنماهای نوری می باشد که در آزمایشگاه های متالوگرافی برای بررسی و تشخیص ساختار مواد اعم از: مرزدانه ها، خراش های سطحی، پارگی ها و جابه جایی مواد با استفاده از نور مرئی کاربرد دارد و دارای سیستمی مجهز به چند لنز برای بزرگنمایی اجسام و ساختار

موادی که با چشم قابل بررسی نیستند، می‌باشد. میکروسکوپ نوری در انواع مختلفی وجود دارد که می‌توان به استریو میکروسکوپ^{۱۰} یا استریوسکوپ اشاره نمود.

استریو میکروسکوپ یک نوع میکروسکوپ چشمی است که برای مشاهده نمونه در حالات سه بعدی با بزرگنمایی اندک (۸ الی ۵۰ برابر) به کار گرفته می‌شود که معمولاً از یک نور منعکس شده در بالا و پایین سطح نمونه استفاده می‌شود. (شکل ۳-۱۶) دستگاه استریو میکروسکوپ نوری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۶. دستگاه استریو میکروسکوپ نوری

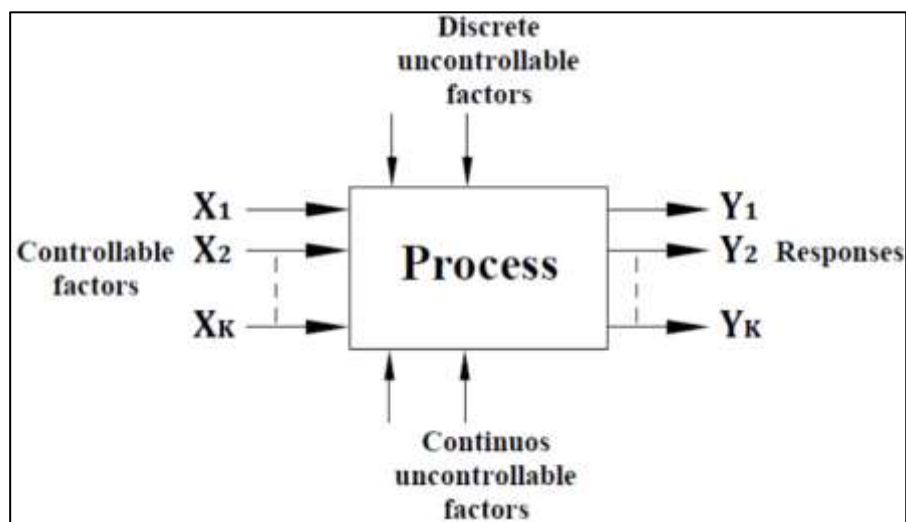
¹⁰ Stereo microscope - Germany

فصل ۴

طراحی آزمون های

۴-۱- طراحی آزمون‌های تجربی

طراحی آزمایش^۱ (DOE) یک روش آماری کارآمد برای تجزیه و تحلیل عوامل مستقل (X_k) بر پاسخ-های فرآیند (Y_k) است که حداقل تعداد اجرای آزمایش را با افزایش بازدهی محصول و کاهش هزینه فراهم می‌کند. هدف از طراحی آزمایش، شناسایی و تحلیل متغیرهای موثر بر پاسخ‌های خروجی با کمترین تعداد آزمایش است که نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، عمدتاً به نحوه جمع‌آوری داده‌ها بستگی دارد. (شکل ۴-۱) روند کلی طراحی آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱. روند کلی طراحی آزمایش [۲۵]

¹ Design of experiments (DOE)

۴-۲- انتخاب طرح آزمایش

متدلوژی سطح پاسخ یا به اختصار $(RSM)^2$ به عنوان یک روش طراحی آزمایش برای بررسی تأثیر متغیرهای قابل تنظیم یک فرآیند بر محصول نهایی می باشد. این روش، مجموعه ای از تکنیک های آماری و ریاضی برای ساخت مدل های تجربی است. هدف از متدلوژی سطح پاسخ، مدل سازی ریاضی- آماری بین گروهی از متغیرهای مستقل (x_k) که قابل اندازه گیری و کنترل هستند با یک خطای ناچیز (ε) به منظور استخراج تابع پاسخ خروجی (y) می باشد [۵۷] که این رابطه را می توان به شکل زیر بیان نمود:

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_k) + \varepsilon \quad (۱-۴)$$

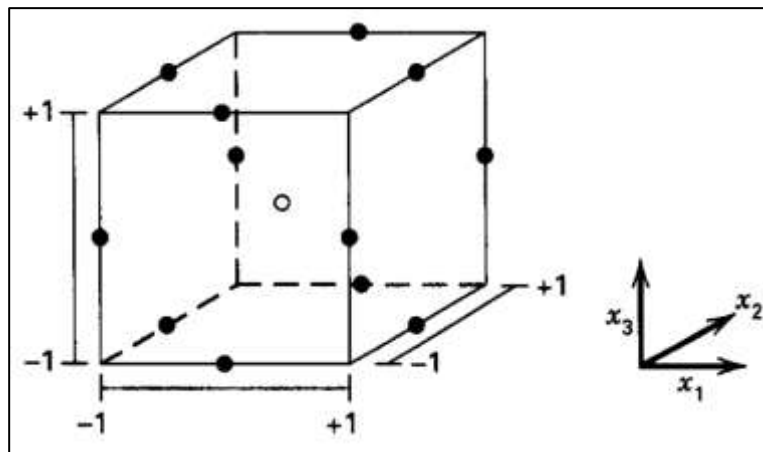
بنابراین روش RSM، با استفاده از مدل های رگرسیونی و بر اساس توابع چند جمله ای درجه دوم (به عنوان تابع هدف) مدل سازی داده ها را انجام داده و مقدار بهینه و تأثیر هر یک از متغیرها را بر پاسخ نشان می دهد که به صورت زیر بیان می شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۲-۴)$$

که در آن β_0 ضریب ثابت رگرسیون، β_i ضرایب خطی، β_{ii} ضرایب درجه دوم و β_{ij} ضرایب تعاملی، x_i متغیرهای مستقل، k تعداد متغیرهای مستقل و ε میزان خطا یا نویز موجود در مسئله می باشند.

² Response Surface Methodology (RSM)

در پژوهش پیش رو، برای طراحی آزمون‌ها از طرح باکس _ بنکن^۳ استفاده شد. روش BBD به عنوان متداول‌ترین روش برای طراحی آزمایش در سه سطح و با تعداد آزمایش کمتر و دارای کارایی بالاتری می‌باشد. همچنین می‌تواند رابطه غیر خطی را به خوبی مدل‌سازی نماید. (شکل ۴-۲) روند سطح بندی در طرح باکس_بنکن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲. نمایش سطوح در طرح باکس _ بنکن [۵۷]

۴-۳- انتخاب عوامل آزمایش و سطوح تغییرات

در پژوهش پیش رو، متغیرهای ورودی فرآیند SPIF مطابق (جدول ۴-۱) در سه سطح تنظیم و انتخاب شدند. آزمون‌ها بر اساس متدلوژی سطح پاسخ با استفاده از طرح BBD به کمک نرم افزار Minitab19 (مطابق جدول ۴-۲) با تعداد ۲۷ اجرای آزمایش به صورت تصادفی و با تکرارپذیری در نقطه مرکزی (سطح صفر) طراحی گردید.

³ Box-Behnken design (BBD)

جدول ۱۴- متغیرهای ورودی و سطوح تغییر آنها

ردیف	متغیرهای ورودی	نماد	سطح	
			۰	۱
۱	قطر ابزار (mm)	D	۸	۱۰
۲	گام زاویه ای (°)	A	۴	۷
۳	گام عمودی (mm)	V	۰,۲	۰,۵
۴	روانکار	L	روغن	گریس
				گرافیت

جدول ۲۴- طراحی آزمون های تجربی

ردیف	قطر ابزار (D) (mm)	گام زاویه ای (A) (Degree)	گام عمودی (V) (mm)	روانکار (L)
۱	۱۲	۴	۰,۸	گرافیت
۲	۱۲	۱۰	۰,۲	گرافیت
۳	۸	۱۰	۰,۲	گرافیت
۴	۸	۴	۰,۲	گرافیت
۵	۱۰	۷	۰,۵	روغن
۶	۱۰	۷	۰,۲	گریس
۷	۱۲	۴	۰,۲	روغن
۸	۱۰	۷	۰,۵	گریس
۹	۱۰	۴	۰,۵	گریس
۱۰	۸	۱۰	۰,۲	روغن
۱۱	۸	۱۰	۰,۸	روغن
۱۲	۱۰	۷	۰,۵	گرافیت
۱۳	۱۲	۱۰	۰,۸	روغن

روغن	۰,۲	۴	۸	۱۴
گریس	۰,۵	۷	۱۲	۱۵
گریس	۰,۸	۷	۱۰	۱۶
روغن	۰,۸	۴	۱۲	۱۷
گرافیت	۰,۸	۱۰	۸	۱۸
روغن	۰,۲	۱۰	۱۲	۱۹
گریس	۰,۵	۷	۱۰	۲۰
گریس	۰,۵	۱۰	۱۰	۲۱
گرافیت	۰,۸	۴	۸	۲۲
گرافیت	۰,۸	۱۰	۱۲	۲۳
گرافیت	۰,۲	۴	۱۲	۲۴
گریس	۰,۵	۷	۸	۲۵
روغن	۰,۸	۴	۸	۲۶
گریس	۰,۵	۷	۱۰	۲۷

۴-۴- اندازه گیری و محاسبه پارامترهای پاسخ

در این بخش، بر اساس آزمون های طراحی شده، آزمون های تجربی برای شکل دهی انبساطی انتهای لوله فولادی زنگ نزن AISI 304 انجام شد (مطابق جدول ۴-۲). سپس قطر انتهای لوله^۴ و زبری سطوح داخلی و خارجی^۵ انتهای لوله به عنوان پارامترهای پاسخ در نظر گرفته شدند. از این رو، پاسخ-های مورد نظر با استفاده از دستگاه های اندازه گیری معرفی شده در فصل ۳ بخش (۳-۶) اندازه گیری و استخراج شدند.

^۴ Tube end diameter (TED)

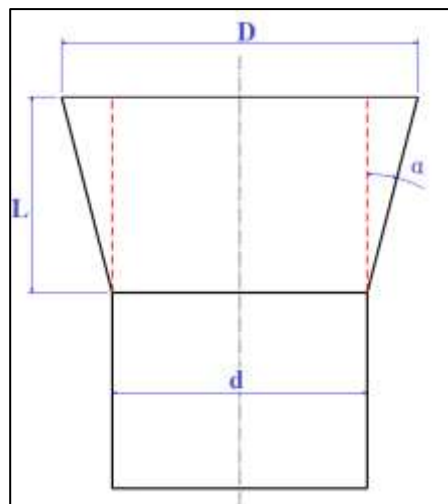
^۵ Inner and external surface roughness

۴-۴-۱- قطر انتهایی منبسط شده لوله

ابتدا، با دستگاه پروفایل پروژکتور مقدار قطر انتهایی لوله منبسط شده (D) با نقطه‌یابی بر روی تک تک لوله‌ها اندازه‌گیری شد. نقاط اندازه‌گیری شده در نرم افزار کتیا با فرمت DXF پیاده‌سازی و اندازه مورد نظر استخراج گردید. سپس با استفاده از اندازه قطر انتهایی لوله به دست آمده پاسخ‌هایی همچون: زاویه تغییر شکل بر حسب رادیان، درصد تغییرات قطر انتهایی لوله نسبت به قطر نامی و درصد تغییرات زاویه نسبت به زاویه نامی محاسبه گردید (جدول ۴-۳). (شکل‌های ۴-۳ و ۴-۴) به ترتیب نمونه لوله‌های شکل‌دهی شده و معرفی ابعاد نمونه منبسط شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳. نمونه لوله‌های شکل‌دهی شده بر اساس طراحی آزمایش



شکل ۴-۴. مشخصات ابعادی هندسه مخروطی ناقص

برای محاسبه زاویه تغییر شکل (α)، درصد تغییرات زاویه (Spring-back) و درصد تغییرات قطر انتهای لوله (ΔD) از روابط زیر استفاده شد:

$$\tan \alpha = \frac{(D - d) / 2}{L} \quad (۱-۴)$$

$$\text{Spring - back} = \frac{\theta - \alpha}{\theta} \times 100 \quad (۲-۴)$$

$$\Delta D = \frac{D_0 - D}{D_0} \times 100 \quad (۳-۴)$$

در روابط فوق، D مقدار قطر انتهای لوله اندازه گیری شده، d قطر اولیه لوله برابر با 38 mm ، L طول شکل دهی برابر با 20 mm ، α نیم زاویه تغییر شکل محاسبه شده، θ نیم زاویه نامی برابر با 20° و D_0 مقدار قطر انتهای لوله نامی برابر با $52,559 \text{ mm}$ را نشان می دهند.

جدول ۳۴- اندازه گیری قطر انتهایی لوله منبسط شده

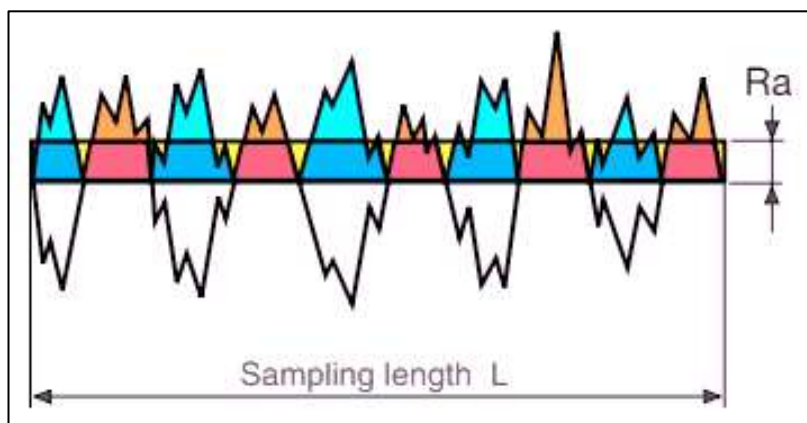
ردیف	متغیرهای ورودی				قطر انتهایی لوله اندازه گیری شده	زاویه محاسبه شده	درصد تغییر قطر انتهایی لوله	درصد تغییر زاویه
	L (lubricant)	V (mm)	A (degree)	D (mm)	D	α (Rad)	$(D_0-D)/D_0$ (%)	$(\theta-\alpha)/\theta$ (%)
۱	گرافیت	۰.۸	۴	۱۲	۴۹.۴۵۴	۰.۲۷۸۹	۵.۹۰۸	۲۰.۰۹۰
۲	گرافیت	۰.۲	۱۰	۱۲	۴۹.۷۰۹	۰.۲۸۴۸	۵.۴۲۲	۱۸.۴۰۴
۳	گرافیت	۰.۲	۱۰	۸	۵۰.۲۳۷	۰.۲۹۶۹	۴.۴۱۸	۱۴.۹۳۳
۴	گرافیت	۰.۲	۴	۸	۴۷.۲۹۶	۰.۲۲۸۳	۱۰.۰۱۴	۳۴.۵۷۱
۵	روغن	۰.۵	۷	۱۰	۴۹.۹۳۸	۰.۲۹۰۰	۴.۹۸۷	۱۶.۸۹۶
۶	گریس	۰.۲	۷	۱۰	۴۸.۱۱۴	۰.۲۴۷۷	۸.۴۵۷	۲۹.۰۳۷
۷	روغن	۰.۲	۴	۱۲	۵۰.۲۴۴	۰.۲۹۷۰	۴.۴۰۵	۱۴.۸۸۷
۸	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۴۸.۶۲۱	۰.۲۵۹۵	۷.۴۹۳	۲۵.۶۳۴

۲۹.۵۸۳	۸.۶۱۱	۰.۲۴۵۸	۴۸.۰۳۳	گریس	۰.۵	۴	۱۰	۹
۲۹.۷۹۹	۸.۶۷۲	۰.۲۴۵۰	۴۸.۰۰۱	روغن	۰.۲	۱۰	۸	۱۰
۳۶.۳۴۱	۱۰.۵۰۸	۰.۲۲۲۲	۴۷.۰۳۶	روغن	۰.۸	۱۰	۸	۱۱
۳۲.۱۳۶	۹.۳۳۰	۰.۲۳۶۸	۴۷.۶۵۵	گرافیت	۰.۵	۷	۱۰	۱۲
۳۰.۳۲۵	۸.۸۲۱	۰.۲۴۳۲	۴۷.۹۲۳	روغن	۰.۸	۱۰	۱۲	۱۳
۲۷.۶۹۹	۸.۰۷۹	۰.۲۵۲۳	۴۸.۳۱۳	روغن	۰.۲	۴	۸	۱۴
۳۳.۹۲۶	۹.۸۳۳	۰.۲۳۰۶	۴۷.۳۹۱	گریس	۰.۵	۷	۱۲	۱۵
۳۴.۵۱۰	۹.۹۹۶	۰.۲۲۸۶	۴۷.۳۰۵	گریس	۰.۸	۷	۱۰	۱۶
۲۰.۱۵۶	۵.۹۲۷	۰.۲۷۸۷	۴۹.۴۴۴	روغن	۰.۸	۴	۱۲	۱۷
۳۴.۴۰۸	۹.۹۶۸	۰.۲۲۸۹	۴۷.۳۲	گرافیت	۰.۸	۱۰	۸	۱۸
۲۸.۶۴۷	۸.۳۴۷	۰.۲۴۹۰	۴۸.۱۷۲	روغن	۰.۲	۱۰	۱۲	۱۹

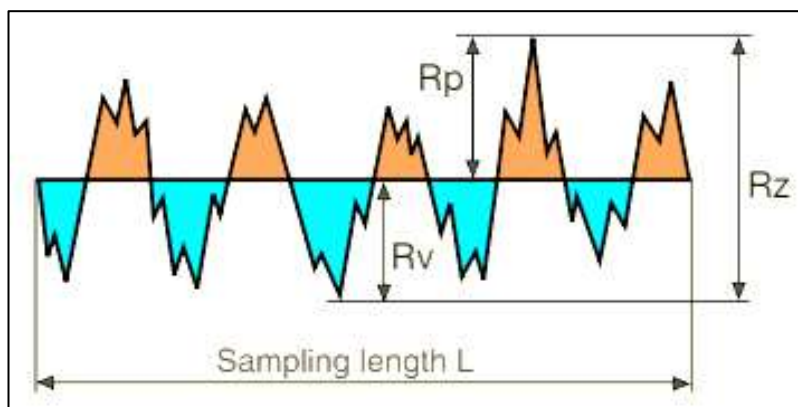
۲۰	۱۰	۷	۰.۵	گریس	۴۸.۴۰۶	۰.۲۵۴۵	۷.۹۰۲	۲۷.۰۷۵
۲۱	۱۰	۱۰	۰.۵	گریس	۴۹.۱۵۸	۰.۲۷۲۰	۶.۴۷۱	۲۲.۰۵۳
۲۲	۸	۴	۰.۸	گرافیت	۴۷.۱۶۹	۰.۲۲۵۳	۱۰.۲۵۵	۳۵.۴۳۵
۲۳	۱۲	۱۰	۰.۸	گرافیت	۴۷.۲۹۷	۰.۲۲۸۴	۱۰.۰۱۲	۳۴.۵۶۴
۲۴	۱۲	۴	۰.۲	گرافیت	۵۰.۲۴۴	۰.۲۹۷۰	۴.۴۰۵	۱۴.۸۸۷
۲۵	۸	۷	۰.۵	گریس	۴۷.۶۹۶	۰.۲۳۷۸	۹.۲۵۲	۳۱.۸۵۹
۲۶	۸	۴	۰.۸	روغن	۴۷.۰۱۸	۰.۲۲۱۷	۱۰.۵۴۲	۳۶.۴۶۳
۲۷	۱۰	۷	۰.۵	گریس	۴۷.۸۳۸	۰.۲۴۱۲	۸.۹۸۲	۳۰.۸۹۹

۴-۴-۲- زبری سطوح داخلی و خارجی

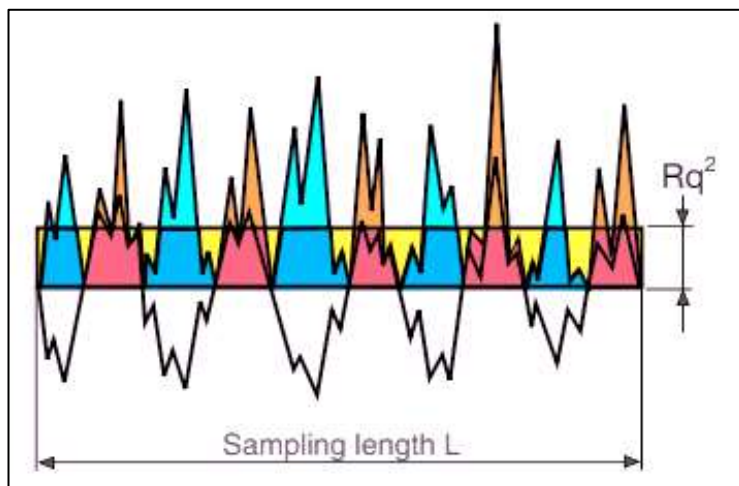
با استفاده از دستگاه زبری سنج Mahr، زبری سطوح داخلی و خارجی از ناحیه منبسط شده انتهای لوله در سه قسمت تحت زاویه تقریباً 120° اندازه‌گیری شدند (جداول ۴-۴ و ۵-۴). پارامترهای تنظیم شده بر روی زبری سنج عبارتند از: میانگین حسابی مقادیر مطلق ارتفاع پروفیل سطح (R_a) (شکل ۴-۴-۵ الف)، مقدار متوسط مقادیر مطلق ارتفاع پنج قله و ارتفاع پنج دره از پروفیل سطح (R_z) (شکل ۴-۴-۵ ب) و ریشه میانگین مربع ارتفاع پروفیل سطح (R_q) (شکل ۴-۴-۵ ج). معادلات (۴-۴) الی (۴-۶) به ترتیب نحوه محاسبه پارامترهای زبری سطوح را نشان می‌دهند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴-۵. پارامترهای زبری سطح (الف) R_a (ب) R_z و (ج) R_q [۵۸]

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (۴-۴)$$

$$R_z = R_p + R_v \quad (۵-۴)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2(x) dx} \quad (۶-۴)$$

که در روابط فوق: L مقدار طول اندازه‌گیری و Z تابع پروفیل زبری سطح می‌باشند.

جدول ۴۴- اندازه‌گیری زبری سطوح داخلی لوله

Rq (μm)				Rz (μm)				Ra (μm)				متغیرهای ورودی				ردیف
Average Rq(μm)	Rq (μm)			Average Rz (μm)	Rz (μm)			Average Ra (μm)	Ra (μm)			L (lubricant)	V (mm)	A (degree)	D (mm)	
۰.۹۱۲	۱.۰۹۷	۰.۷۵۵	۰.۸۸۵	۳.۹۲۷	۴.۹۲	۳.۰۱	۳.۸۵	۰.۷۳۵	۰.۷۱۸	۰.۶۰۴	۰.۸۸۲	گرافیت	۰.۸	۴	۱۲	۱
۰.۶۶۸	۰.۷۵۷	۰.۵۲۲	۰.۷۲۶	۳.۲۴۳	۳.۳۹	۳.۲۸	۳.۰۶	۰.۵۰۸	۰.۵۷۴	۰.۴۱۲	۰.۵۳۹	گرافیت	۰.۲	۱۰	۱۲	۲
۰.۹۸۸	۰.۸۹	۱.۱۵۶	۰.۹۱۹	۴.۹۰۷	۴.۴۸	۵.۶۵	۴.۵۹	۰.۷۷۱	۰.۷۱۹	۰.۸۸۹	۰.۷۰۴	گرافیت	۰.۲	۱۰	۸	۳
۰.۹۴۳	۰.۸۶۲	۰.۹۶۹	۰.۹۹۹	۴.۶۸۷	۴.۳۹	۴.۶۵	۵.۰۲	۰.۷۵۸	۰.۶۹۳	۰.۷۸	۰.۸۰۱	گرافیت	۰.۲	۴	۸	۴
۰.۹۰۹	۰.۸۳	۰.۷۳	۱.۱۶۶	۴.۲۷۷	۴.۱۴	۳.۸۵	۴.۸۴	۰.۷۱۹	۰.۶۷۳	۰.۵۵۴	۰.۹۲۹	روغن	۰.۵	۷	۱۰	۵
۰.۳۳۳	۰.۴۸۳	۰.۱۵۴	۰.۳۶۱	۱.۸۵۰	۲.۷۶	۰.۷۹	۲	۰.۲۶۱	۰.۳۷۵	۰.۱۲۵	۰.۲۸۳	گریس	۰.۲	۷	۱۰	۶
۰.۴۴۵	۰.۴۰۶	۰.۴۳۲	۰.۴۹۷	۲.۷۱۷	۲.۳۹	۲.۲۹	۳.۴۷	۰.۳۴۴	۰.۳۲۷	۰.۳۴۹	۰.۳۵۵	روغن	۰.۲	۴	۱۲	۷
۰.۷۵۹	۰.۶۵۵	۰.۸۳۸	۰.۷۸۵	۳.۴۰۰	۲.۸۲	۳.۹۲	۳.۴۶	۰.۶۱۵	۰.۵۴۱	۰.۶۳۹	۰.۶۶۶	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۸
۱.۴۹۸	۱.۹۷۴	۱.۲۹۲	۱.۲۲۷	۴.۹۷۳	۶.۷۲	۳.۹۵	۴.۲۵	۱.۱۵۵	۱.۶۸۳	۰.۹۲۹	۰.۸۵۲	گریس	۰.۵	۴	۱۰	۹
۰.۴۸۷	۰.۵۲۶	۰.۴۳۶	۰.۴۹۹	۲.۳۲۳	۲.۲۷	۱.۶۳	۳.۰۷	۰.۳۹۵	۰.۴۲۷	۰.۳۶۶	۰.۳۹۳	روغن	۰.۲	۱۰	۸	۱۰
۱.۵۰۳	۱.۰۸۷	۱.۹۷۸	۱.۴۴۵	۶.۶۸۳	۴.۲	۸.۹۵	۶.۹	۱.۴۰۲	۱.۶۲۱	۱.۵۱۱	۱.۰۷۳	روغن	۰.۸	۱۰	۸	۱۱
۱.۰۱۵	۰.۹۸۹	۰.۹۰۶	۱.۱۴۹	۳.۱۶۰	۲.۳۹	۳.۴۷	۳.۶۲	۰.۵۵۹	۰.۴۰۷	۰.۶۲۶	۰.۶۴۵	گرافیت	۰.۵	۷	۱۰	۱۲

۰.۹۹۰	۱.۲۸۵	۰.۸۲۳	۰.۸۶۲	۴.۵۳۰	۵.۶	۳.۵۹	۴.۴	۰.۷۷۶	۱.۰۰۳	۰.۶۳۴	۰.۶۹	روغن	۰.۸	۱۰	۱۲	۱۳
۰.۵۲۴	۰.۴۰۳	۰.۶۳۴	۰.۵۳۵	۲.۷۷۳	۱.۳۶	۳.۴۲	۳.۵۴	۰.۳۴۸	۰.۲۳۸	۰.۴۵	۰.۳۵۶	روغن	۰.۲	۴	۸	۱۴
۰.۳۹۴	۰.۳۷	۰.۳۱۵	۰.۴۹۸	۲.۰۲۳	۱.۸۴	۱.۹۲	۲.۳۱	۰.۳۰۴	۰.۲۹۲	۰.۲۳۳	۰.۳۸۷	گریس	۰.۵	۷	۱۲	۱۵
۱.۲۶۸	۱.۲۳۲	۱.۲۸۳	۱.۲۹	۵.۴۲۰	۴.۹۴	۶.۴۷	۴.۸۵	۱.۰۱۳	۱.۰۰۲	۱.۰۳۱	۱.۰۰۶	گریس	۰.۸	۷	۱۰	۱۶
۰.۵۱۹	۰.۵۰۵	۰.۶۱۵	۰.۴۳۸	۲.۲۰۰	۱.۸۸	۲.۶۷	۲.۰۵	۰.۴۰۶	۰.۳۷	۰.۴۹۲	۰.۳۵۶	روغن	۰.۸	۴	۱۲	۱۷
۱.۱۰۲	۰.۷۷۵	۱.۴۷۶	۱.۰۵۵	۶.۲۶۰	۴.۰۷	۸.۴۲	۶.۲۹	۰.۸۳۹	۰.۶۳۴	۱.۰۹	۰.۷۹۳	گرافیت	۰.۸	۱۰	۸	۱۸
۰.۴۸۸	۰.۴۳	۰.۲۸۸	۰.۷۴۵	۲.۴۴۷	۱.۶۳	۱.۷۶	۳.۹۵	۰.۳۶۵	۰.۳۳۸	۰.۲۲۶	۰.۵۳۲	روغن	۰.۲	۱۰	۱۲	۱۹
۰.۸۰۰	۰.۷۴۸	۰.۸۶۷	۰.۷۸۵	۳.۶۳۰	۳.۸۴	۳.۵۹	۳.۴۶	۰.۶۵۸	۰.۵۷۷	۰.۷۳۱	۰.۶۶۶	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۲۰
۱.۲۸۷	۱.۹	۰.۹۴	۱.۰۲۲	۴.۴۶۳	۴.۳۶	۳.۹۹	۵.۰۴	۰.۸۲۳	۰.۸۶۴	۰.۷۶۵	۰.۸۴	گریس	۰.۵	۱۰	۱۰	۲۱
۱.۳۵۲	۱.۲۵۵	۱.۲۰۱	۱.۵۹۹	۶.۵۴۷	۷.۲۸	۵.۶۹	۶.۶۷	۱.۰۰۷	۰.۹۴۱	۰.۹۷۳	۱.۱۰۸	گرافیت	۰.۸	۴	۸	۲۲
۱.۴۵۲	۱.۱۲۱	۱.۴۴۵	۱.۷۹۱	۵.۶۹۳	۴.۳۵	۶.۲۸	۶.۴۵	۱.۰۱۱	۰.۸۲۹	۱.۰۱۲	۱.۱۹۱	گرافیت	۰.۸	۱۰	۱۲	۲۳
۰.۶۴۴	۰.۱۳۴	۱.۰۱۷	۰.۷۸	۲.۹۸۷	۰.۷	۳.۶۷	۴.۵۹	۰.۴۶۶	۰.۱۱	۰.۷۱۳	۰.۵۷۴	گرافیت	۰.۲	۴	۱۲	۲۴
۰.۷۰۰	۰.۶۶۲	۰.۶۲۷	۰.۸۱	۳.۰۸۳	۳.۵۷	۲.۶۶	۳.۰۲	۰.۵۵۸	۰.۵۰۶	۰.۵۰۷	۰.۶۶۱	گریس	۰.۵	۷	۸	۲۵
۰.۹۱۴	۰.۸۱۷	۱	۰.۹۲۶	۴.۰۷۰	۴.۱۱	۴.۲	۳.۹	۰.۷۳۹	۰.۶۴۴	۰.۸۰۶	۰.۷۶۷	روغن	۰.۸	۴	۸	۲۶
۰.۷۶۵	۰.۶۸۲	۰.۸۵۲	۰.۷۶۲	۳.۶۰۰	۳.۰۲	۴.۷	۳.۰۸	۰.۶۲۷	۰.۵۱۷	۰.۷۱۷	۰.۶۴۸	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۲۷

جدول ۵۴- اندازه گیری زبری سطوح خارجی لوله

Rq (μm)				Rz (μm)				Ra (μm)				متغیرهای ورودی				ردیف
Average Rq (μm)	Rq (μm)			Average Rz (μm)	Rz (μm)			Average Ra (μm)	Ra (μm)			L (lubricant)	V (mm)	A (degree)	D (mm)	
۰.۲۱۳	۰.۱۳۱	۰.۲۱۶	۰.۲۹۳	۰.۹۶۳	۰.۶۸	۰.۹۴	۱.۲۷	۰.۱۳۸	۰.۱۰۶	۰.۱۳۳	۰.۱۷۴	گرافیت	۰.۸	۴	۱۲	۱
۰.۱۰۰	۰.۱۲۴	۰.۰۸۸	۰.۰۸۷	۰.۵۳۳	۰.۷۶	۰.۴۴	۰.۴	۰.۰۷۸	۰.۰۹۷	۰.۰۶۹	۰.۰۶۸	گرافیت	۰.۲	۱۰	۱۲	۲
۰.۱۱۲	۰.۱۷۷	۰.۰۶۲	۰.۰۹۷	۰.۶۱۳	۰.۹۴	۰.۳۳	۰.۵۷	۰.۰۸۸	۰.۱۳۸	۰.۰۵	۰.۰۷۶	گرافیت	۰.۲	۱۰	۸	۳
۰.۴۶۰	۰.۱۰۸	۰.۵۲۱	۰.۷۵	۰.۳۵۳	۰.۵۶	۰.۱۰۹	۰.۳۹	۰.۱۰۴	۰.۰۸۳	۰.۱۶۹	۰.۰۶	گرافیت	۰.۲	۴	۸	۴
۰.۵۰۰	۰.۶۰۴	۰.۸۰۳	۰.۰۹۲	۲.۰۴۷	۲.۸۶	۲.۸	۰.۴۸	۰.۳۵۷	۰.۴۷۵	۰.۵۲۵	۰.۰۷۲	روغن	۰.۵	۷	۱۰	۵
۰.۲۶۳	۰.۱۱۶	۰.۱۲۶	۰.۵۴۶	۱.۴۱۷	۰.۵۹	۰.۶۱	۳.۰۵	۰.۱۸۷	۰.۰۹۳	۰.۰۹۹	۰.۳۶۹	گریس	۰.۲	۷	۱۰	۶
۰.۳۴۸	۰.۴۸۹	۰.۴۹۹	۰.۰۵۶	۱.۵۴۰	۲.۲۷	۲.۰۵	۰.۳	۰.۲۷۶	۰.۳۸۷	۰.۳۹۷	۰.۰۴۵	روغن	۰.۲	۴	۱۲	۷
۰.۳۵۴	۰.۴۷۱	۰.۰۹۵	۰.۴۹۶	۱.۵۵۰	۲.۳۶	۰.۴۹	۱.۸	۰.۱۷۸	۰.۳۱۷	۰.۰۷۳	۰.۱۴۴	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۸
۰.۰۹۷	۰.۰۸۷	۰.۱۱۲	۰.۰۹۲	۰.۵۴۰	۰.۴۳	۰.۶۴	۰.۵۵	۰.۰۷۵	۰.۰۷۱	۰.۰۸۴	۰.۰۷	گریس	۰.۵	۴	۱۰	۹
۰.۳۶۶	۰.۴۷۴	۰.۵۲۷	۰.۰۹۶	۱.۶۴۳	۲.۵۲	۱.۸۶	۰.۵۵	۰.۲۵۳	۰.۳۷۶	۰.۳۱۸	۰.۰۶۴	روغن	۰.۲	۱۰	۸	۱۰
۰.۸۴۹	۰.۹۰۶	۰.۸۰۸	۰.۸۳۳	۳.۶۲۳	۳.۹۹	۴.۶۷	۲.۲۱	۰.۵۶۷	۰.۶۹۸	۰.۵۱۲	۰.۴۹۲	روغن	۰.۸	۱۰	۸	۱۱
۰.۳۶۱	۰.۷۴	۰.۱۴۵	۰.۱۹۸	۱.۷۹۰	۳.۲۴	۰.۹۹	۱.۱۴	۰.۲۸۳	۰.۶۱۱	۰.۰۹۹	۰.۱۳۸	گرافیت	۰.۵	۷	۱۰	۱۲

۰.۵۲۶	۰.۷۱۳	۰.۲۷۸	۰.۵۸۷	۲.۵۸۷	۳.۶۲	۱.۷۹	۲.۳۵	۰.۳۱۵	۰.۵۳۴	۰.۱۴۴	۰.۲۶۷	روغن	۰.۸	۱۰	۱۲	۱۳
۰.۱۴۹	۰.۰۷۹	۰.۰۰۸	۰.۲۸۷	۱.۰۵۷	۰.۴۱	۰.۴۳	۲.۳۳	۰.۰۹۳	۰.۰۶۳	۰.۰۶۳	۰.۱۵۴	روغن	۰.۲	۴	۸	۱۴
۰.۲۹۴	۰.۳۷	۰.۰۶۹	۰.۴۴۳	۱.۳۴۳	۱.۴۵	۰.۴	۲.۱۸	۰.۲۰۷	۰.۲۰۶	۰.۰۵۵	۰.۳۵۹	گریس	۰.۵	۷	۱۲	۱۵
۰.۸۸۹	۰.۸۹۹	۰.۹۶۱	۰.۸۰۶	۳.۴۰۷	۳.۴۶	۳.۴۱	۳.۳۵	۰.۶۳۹	۰.۷۱	۰.۵۴۳	۰.۶۶۵	گریس	۰.۸	۷	۱۰	۱۶
۰.۴۵۷	۰.۴۶۴	۰.۰۹۷	۰.۸۰۹	۱.۳۵۰	۱.۴۶	۰.۴	۲.۱۹	۰.۱۸۳	۰.۱۸۹	۰.۰۵۱	۰.۳۰۹	روغن	۰.۸	۴	۱۲	۱۷
۱.۱۵۴	۰.۹۸۴	۱.۰۱۸	۱.۴۶	۳.۲۶۳	۳.۰۴	۴.۰۱	۲.۷۴	۰.۵۹۹	۰.۴۵۷	۰.۷۲۷	۰.۶۱۴	گرافیت	۰.۸	۱۰	۸	۱۸
۰.۳۲۹	۰.۲۷۹	۰.۳۴۷	۰.۳۶	۱.۴۳۳	۰.۹۱	۱.۴۵	۱.۹۴	۰.۱۹۱	۰.۱۴۲	۰.۱۸۲	۰.۲۵	روغن	۰.۲	۱۰	۱۲	۱۹
۰.۳۶۸	۰.۵۶۸	۰.۳۰۳	۰.۲۳۴	۱.۸۷۷	۳.۴	۰.۹۴	۱.۲۹	۰.۲۳۱	۰.۴۲۷	۰.۰۸۴	۰.۱۸۲	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۲۰
۰.۳۰۲	۰.۶۹۲	۰.۱۴۵	۰.۰۷	۱.۰۸۰	۲.۱	۰.۷۶	۰.۳۸	۰.۱۷۷	۰.۳۷۲	۰.۱۰۳	۰.۰۵۷	گریس	۰.۵	۱۰	۱۰	۲۱
۱.۳۰۰	۱.۵۹۲	۰.۸۴۵	۱.۴۶۴	۳.۳۲۰	۴.۴۹	۲.۳۲	۳.۱۵	۰.۵۸۴	۰.۷۱۸	۰.۳۵۵	۰.۶۷۸	گرافیت	۰.۸	۴	۸	۲۲
۰.۵۲۱	۰.۴۳۸	۰.۴۹۷	۰.۶۲۸	۲.۳۸۷	۲.۱۲	۲.۵۴	۲.۵	۰.۴۱۳	۰.۳۴۴	۰.۳۹۱	۰.۵۰۵	گرافیت	۰.۸	۱۰	۱۲	۲۳
۰.۳۳۶	۰.۴۱	۰.۱۲۳	۰.۴۷۶	۱.۸۰۷	۲.۱۷	۰.۷۱	۲.۵۴	۰.۲۶۶	۰.۳۲	۰.۰۹۸	۰.۳۷۹	گرافیت	۰.۲	۴	۱۲	۲۴
۰.۳۱۵	۰.۰۸۷	۰.۳۶	۰.۴۹۸	۱.۳۴۷	۰.۵۲	۱.۱۷	۲.۳۵	۰.۲۲۲	۰.۰۶۷	۰.۱۹۴	۰.۴۰۴	گریس	۰.۵	۷	۸	۲۵
۰.۶۰۸	۰.۸۲۹	۰.۴۰۷	۰.۵۸۷	۳.۳۳۷	۴.۹۲	۱.۹۷	۳.۱۲	۰.۴۵۱	۰.۵۷۶	۰.۳۰۶	۰.۴۷۱	روغن	۰.۸	۴	۸	۲۶
۰.۳۰۳	۰.۴۹۶	۰.۱۱۱	۰.۳۰۳	۱.۰۹۳	۱.۸	۰.۵۴	۰.۹۴	۰.۱۷۵	۰.۲۹۴	۰.۰۹۲	۰.۱۳۸	گریس	۰.۵	۷	۱۰	۲۷

فصل ۵

نتایج و بحث

۵-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری پاسخ‌های اندازه‌گیری شده و ارائه شده در فصل چهارم، پرداخته می‌شود و مدل‌سازی پارامترهای پاسخ به همراه نمودارهای آماری و فرآیند بهینه‌سازی متغیرهای ورودی جهت دستیابی به اهداف از پیش تعیین شده، تشریح می‌شود.

۵-۲- تجزیه و تحلیل قطر انتهایی لوله

تحلیل واریانس^۱ پارامترهای پاسخ به کمک نرم افزار مینی‌تب (مطابق جدول ۵-۱) انجام شد. تحلیل واریانس ابزاری قدرتمند برای بررسی اهمیت یک عبارت و تشخیص معنی‌دار بودن اثر آن، می‌باشد. همچنین به منظور ایجاد توابع ریاضی میان پارامترهای پاسخ و متغیرهای موثر در فرآیند، تحلیل رگرسیون به کار گرفته می‌شود. متغیرهای فرآیند SPIF در این پژوهش از جمله: قطر ابزار D، گام زاویه‌ای A، گام عمودی ابزار V و روانکار L بر قطر انتهایی لوله با سطح اطمینان $\alpha = 0.05$ (مطابق جدول ۵-۱) مورد آنالیز قرار گرفتند. لذا مدل نهایی می‌تواند داده‌ها را با خطای کمتر از ۵٪ پیش‌بینی کند. با توجه به تحلیل واریانس می‌توان دریافت که عباراتی که با مقدار $P\text{-Value} \leq \alpha$ و $P\text{-Value} \geq \alpha$ می‌باشند به ترتیب به عنوان عبارات موثر^۲ و غیر موثر^۳ شناخته می‌شوند. لذا عبارات موثر بر TED با $P\text{-Value} \leq 0.05$ به ترتیب: قطر ابزار D، گام عمودی ابزار V و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام زاویه‌ای DA حاصل شدند. همچنین با تأیید عدم معنی‌دار بودن آزمون عدم برازش $P_{\text{Lack of fit}} > \alpha$ می‌توان دریافت که مدل رگرسیونی به خوبی توانسته بر داده‌ها برازش شود. در نتیجه مدل رگرسیون

¹ Analysis of Variance (ANOVA)

² Significant

³ InSignificant

به منظور پیش‌بینی قطر انتهایی لوله به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده و غیرکدگذاری شده به ترتیب مطابق روابط (۵-۱) و (۵-۲) استخراج شد:

جدول ۱۵- تحلیل واریانس پارامتر TED

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۲۱.۹۹۹۲	۱.۵۷۱۳۷	۲.۳۳	۰.۰۷۵
Linear	۴	۱۱.۶۰۸۹	۲.۹۰۲۲۲	۴.۳۰	۰.۰۲۲
D	۱	۵.۳۲۶۸	۵.۳۲۶۸۵	۷.۸۹	۰.۰۱۶
A	۱	۰.۳۰۹۹	۰.۳۰۹۹۵	۰.۴۶	۰.۵۱۱
V	۱	۵.۹۶۷۴	۵.۹۶۷۳۶	۸.۸۴	۰.۰۱۲
L	۱	۰.۰۰۴۷	۰.۰۰۴۷۴	۰.۰۱	۰.۹۳۵
Square	۴	۲.۶۶۴۱	۰.۶۶۶۰۲	۰.۹۹	۰.۴۵۱
D²	۱	۰.۷۸۴۴	۰.۷۸۴۳۷	۱.۱۶	۰.۳۰۲
A²	۱	۰.۶۴۲۱	۰.۶۴۲۱۰	۰.۹۵	۰.۳۴۹
V²	۱	۰.۳۸۳۷	۰.۳۸۳۷۲	۰.۵۷	۰.۴۶۵
L²	۱	۱.۲۶۲۵	۱.۲۶۲۵۳	۱.۸۷	۰.۱۹۶
۲-Way Interaction	۶	۷.۷۲۶۲	۱.۲۸۷۷۰	۱.۹۱	۰.۱۶۰
DA	۱	۵.۱۵۶۳	۵.۱۵۶۳۱	۷.۶۴	۰.۰۱۷
DV	۱	۰.۰۶۹۳	۰.۰۶۹۳۰	۰.۱۰	۰.۷۵۴
DL	۱	۰.۰۳۳۶	۰.۰۳۳۵۸	۰.۰۵	۰.۸۲۷
AV	۱	۰.۷۷۹۲	۰.۷۷۹۲۵	۱.۱۵	۰.۳۰۴
AL	۱	۱.۱۴۸۶	۱.۱۴۸۶۵	۱.۷۰	۰.۲۱۶
VL	۱	۰.۵۳۹۱	۰.۵۳۹۱۲	۰.۸۰	۰.۳۸۹
خطای مانده	۱۲	۸.۰۹۷۵	۰.۶۷۴۷۹		
عدم برازش	۱۰	۷.۷۷۰۲	۰.۷۷۷۰۲	۴.۷۵	۰.۱۸۶
خطای خالص	۲	۰.۳۲۷۳	۰.۱۶۳۶۶		
مجموع	۲۶	۳۰.۰۹۶۷			

R-sq(adj) ۴۱.۷۱٪

R-sq ۷۳.۱۰٪

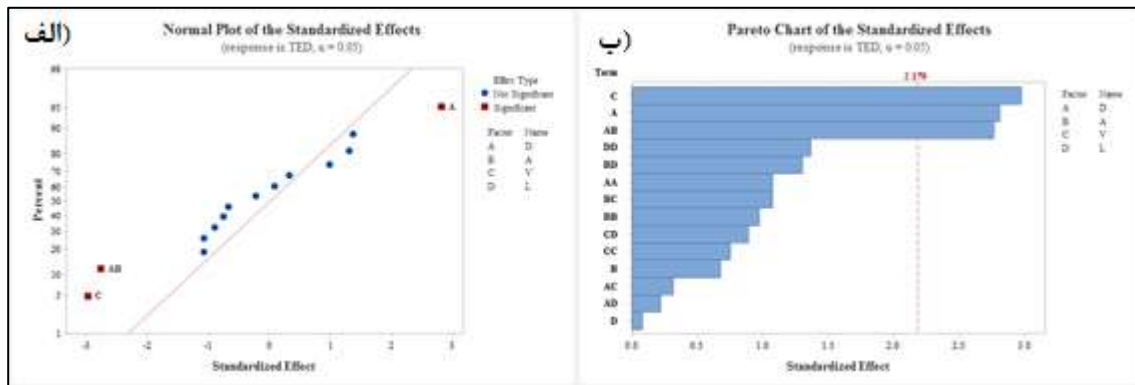
$$\begin{aligned} \text{TED} = & 48.16 + 0.544 D - 0.131 A - 0.576 V + 0.016 L - 0.552 D^2 \\ & + 0.5 A^2 - 0.386 V^2 + 0.701 L^2 - 0.568 DA + 0.066 DV - \\ & 0.046 DL - 0.221 AV + 0.268 AL - 0.184 VL \end{aligned} \quad (۱-۵)$$

$$\begin{aligned} \text{TED} = & 27.6 + 3.64 D + 0.248 A + 2.99 V - 0.07 L - 0.138 D^2 \\ & + 0.0555 A^2 - 4.29 V^2 + 0.701 L^2 - 0.0946 DA + 0.110 DV - \\ & 0.023 DL - 0.245 AV + 0.0893 AL - 0.612 VL \end{aligned} \quad (۲-۵)$$

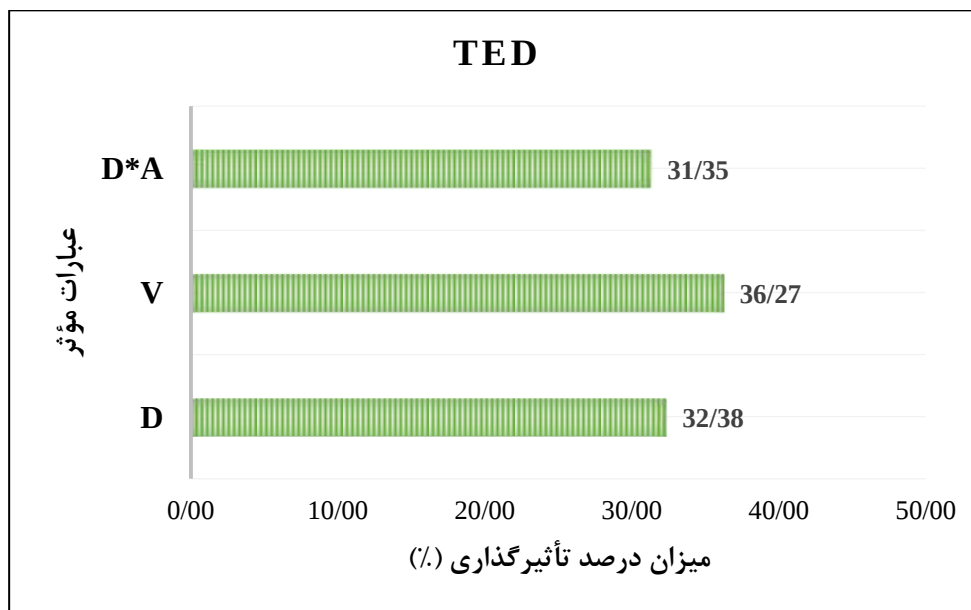
۵-۲-۱- نمودار توزیع نرمال اثرات داده‌ها و پارتو^۴

به منظور برآورد اثرات اصلی و متقابل عوامل، از نمودار احتمال نرمال اثرات و دیاگرام ستونی اثرات (پارتو) استفاده می‌شود (شکل ۵-۱). نمودار احتمال نرمال در واقع نمودار توزیع تجمعی اثرات روی کاغذ احتمال نرمال است، یعنی کاغذ نموداری که محور عرض آن به گونه‌ای درجه بندی شده است که توزیع تجمعی نرمال را به صورت یک خط مستقیم در می‌آورد. از این رو می‌توان دریافت که متغیرهای: قطر ابزار، گام عمودی ابزار و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام زاویه‌ای نسبت به خط توزیع، به عنوان عبارات موثر شناخته شدند. چرا که اثرات آن‌ها نسبت به بقیه بسیار بزرگتر است. سایر عبارات به صورت عوامل غیر موثر بر مدل شناخته شدند. چنین اثری را اغلب دور افتاده می‌گویند. همچنین (شکل ۵-۲) میزان درصد اثرگذاری عبارات موثر بر قطر انتهایی لوله را نشان می‌دهد.

⁴ Pareto



شکل ۵-۱. نمودار (الف) احتمال نرمال اثرات (ب) پارتو



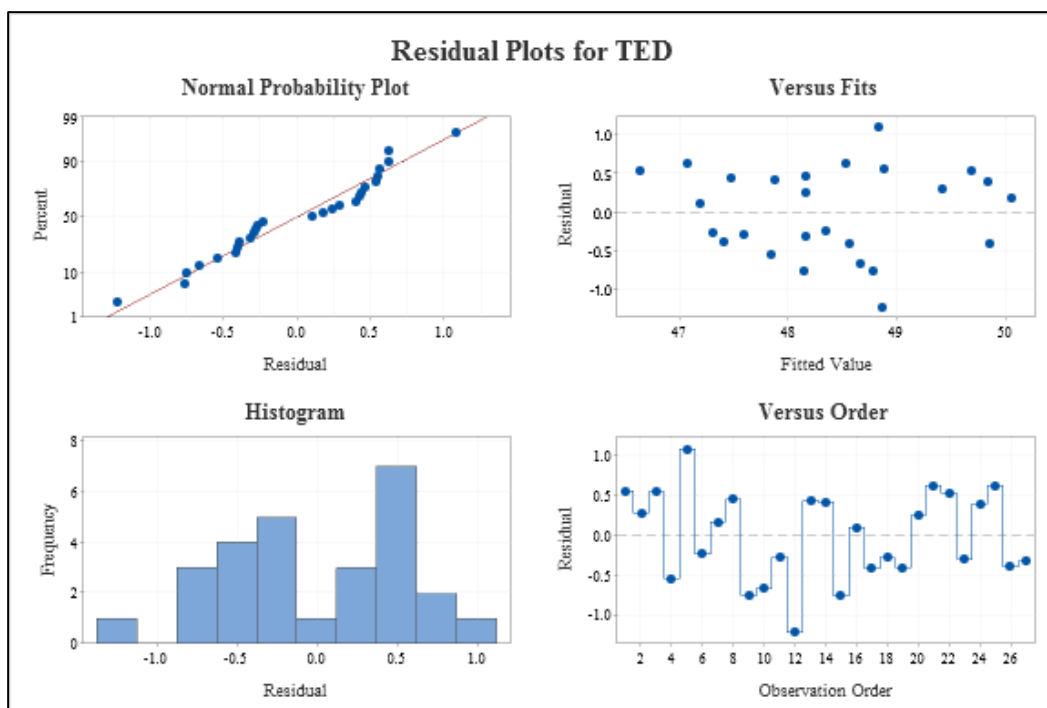
شکل ۵-۲. میزان درصد اثرگذاری عبارت‌های مؤثر بر قطر انتهایی لوله

۵-۲-۲- نمودار باقیمانده‌ها^۵

مانده به صورت تفاضل پاسخ اندازه‌گیری شده و پاسخ حاصل از مدل رگرسیون تعریف می‌شود.

⁵ Residual

به عبارتی هر چه توزیع باقیمانده به توزیع نرمال (خط رگرسیون) نزدیک‌تر باشد، مدل رگرسیونی بهتری برازش شده است. با توجه به توضیحات فوق، (مطابق شکل ۵-۳) می‌توان اظهار داشت که باقیمانده‌ها در نمودارهای احتمال نرمال عموماً از یک خط راست پیروی می‌کنند و هیچ‌گونه شواهدی مبنی بر غیرنرمال بودن، وجود ندارد. از این رو مدل توانسته است رابطه‌ی خوبی بین متغیرهای مستقل با متغیر پاسخ برقرار کند. همچنین باقیمانده‌ها به طور تصادفی در اطراف محور صفر، توزیع شده‌اند و نمودارها شامل هیچ الگوی مشخصی نبوده و کاملاً بی‌ساختار می‌باشند. از این رو، مدل‌های رگرسیون برای نتایج آزمایش، قابل اعتماد و مناسب می‌باشند.

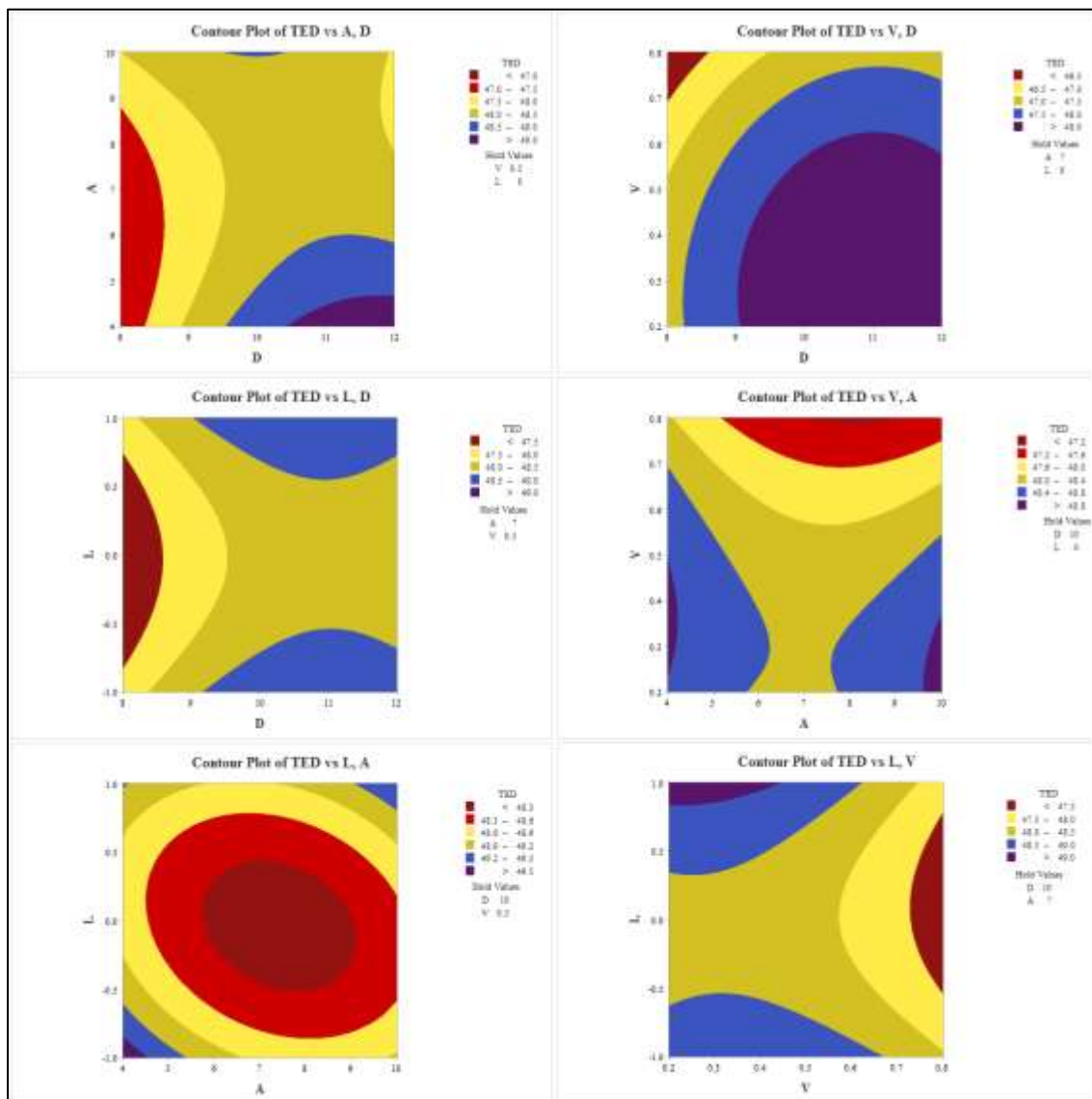


شکل ۵-۳. نمودار باقیمانده‌ها

۵-۲-۳- نمودارهای دو بعدی منحنی تراز^۶

از سوی دیگر می‌توان رفتار پاسخ‌های مسئله را بر اساس تغییرات متغیرهای ورودی در سطوح مختلف به صورت نمودارهای سه بعدی سطح پاسخ و دو بعدی منحنی تراز نشان داد. همچنین نمودار سه بعدی قطر انتهایی لوله در پیوست ب قابل مشاهده است. سطوح با رنگ بنفش به عنوان پاسخ‌های مورد نظر می‌باشند (شکل ۵-۴).

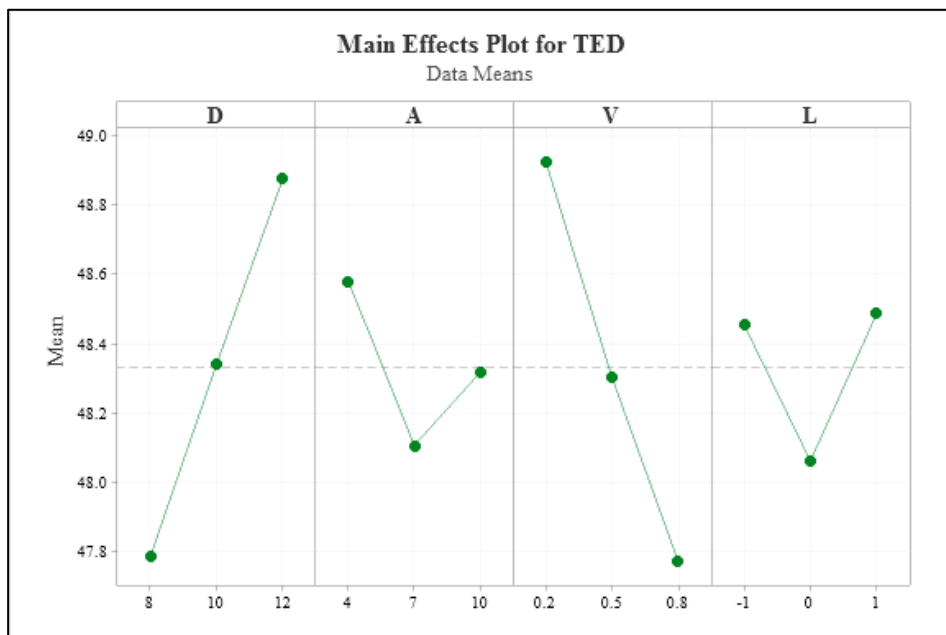
^۶ Contour plots



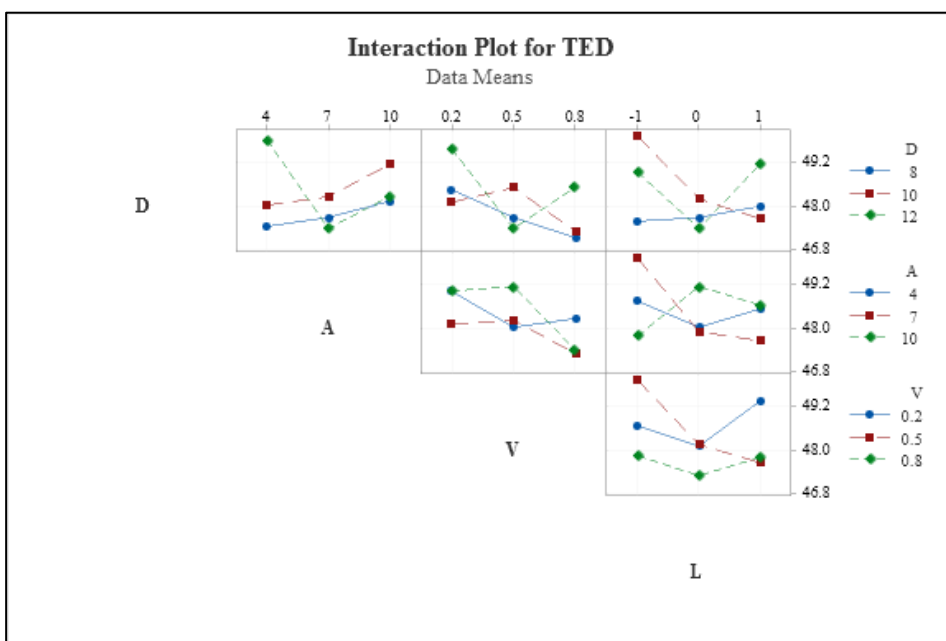
شکل ۵-۴. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر قطر انتهایی لوله به صورت دوبعدی

۵-۲-۴- نمودار اثرات خطی و متقابل داده‌ها

(شکل ۵-۵-الف) اثرات خطی متغیرهای ورودی بر قطر انتهایی لوله را نشان می‌دهد. با توجه به (شکل ۵-۵-الف) متغیرهای گام عمودی ابزار ۰,۲ mm، قطر ابزار ۱۲ mm بیشترین اثر را بر پارامتر TED دارند. همچنین (شکل ۵-۵-ب) تأثیرات تعاملی متغیرهای ورودی بر پارامتر پاسخ را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۵-۵. نمودار الف) اثرات خطی متغیرهای ورودی ب) اثر تعاملی متغیرهای ورودی بر حداکثر قطر انتهای لوله

۵-۳- تجزیه و تحلیل زبری سطح داخلی لوله

(مطابق جدول‌های ۲-۵ الی ۴-۵) تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند از جمله: قطر ابزار D ، گام زاویه‌ای A ، گام عمودی ابزار V و روانکار L بر زبری سطح داخلی لوله با تنظیم پارامتر: $(Ra)_i$ ، $(Rz)_i$ و $(Rq)_i$ با سطح اطمینان $\alpha=0,05$ مورد آنالیز قرار گرفتند. با توجه به تحلیل واریانس می‌توان دریافت که عبارات موثر بر $(Ra)_i$ ، $(Rz)_i$ و $(Rq)_i$ با $P\text{-Value} \leq 0,05$ به ترتیب: قطر ابزار D ، گام عمودی ابزار V و مجذور گام زاویه‌ای (A^2) (جدول ۲-۵)؛ قطر ابزار D ، گام عمودی ابزار V ، روانکار L و اثر مجذور گام زاویه‌ای (A^2) (جدول ۳-۵)؛ و قطر ابزار D ، گام عمودی ابزار V ، روانکار L و اثر مجذور گام زاویه‌ای (A^2) و قطر ابزار (D^2) (جدول ۴-۵) شناخته شدند.

جدول ۲-۵. تحلیل واریانس پارامتر $(Ra)_i$

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۱.۵۹۳۷۱	۰.۱۱۳۸۳۷	۲.۹۵	۰.۰۳۴
Linear	۴	۱.۰۸۹۴۰	۰.۲۷۲۳۵۰	۷.۰۶	۰.۰۰۴
D	۱	۰.۲۰۱۱۹	۰.۲۰۱۱۸۹	۵.۲۱	۰.۰۴۱
A	۱	۰.۰۴۸۳۳	۰.۰۴۸۳۲۶	۱.۲۵	۰.۲۸۵
V	۱	۰.۷۶۵۰۸	۰.۷۶۵۰۸۴	۱۹.۸۲	۰.۰۰۱
L	۱	۰.۰۷۴۸۰	۰.۰۷۴۷۹۹	۱.۹۴	۰.۱۸۹
Square	۴	۰.۳۲۴۱۸	۰.۰۸۱۰۴۶	۲.۱۰	۰.۱۴۴
D²	۱	۰.۱۴۴۲۹	۰.۱۴۴۲۹۲	۳.۷۴	۰.۰۷۷
A²	۱	۰.۲۶۴۸۸	۰.۲۶۴۸۸۱	۶.۸۶	۰.۰۲۲
V²	۱	۰.۰۰۲۴۵	۰.۰۰۲۴۵۲	۰.۰۶	۰.۸۰۵
L²	۱	۰.۰۰۲۱۵	۰.۰۰۲۱۴۵	۰.۰۶	۰.۸۱۸
۲-Way Interaction	۶	۰.۱۸۰۱۳	۰.۰۳۰۰۲۲	۰.۷۸	۰.۶۰۳

۰.۸۴۶	۰.۰۴	۰.۰۰۱۵۱۵	۰.۰۰۱۵۱	۱	DA
۰.۵۶۰	۰.۳۶	۰.۰۱۳۸۶۵	۰.۰۱۳۸۷	۱	DV
۰.۶۷۵	۰.۱۸	۰.۰۰۷۱۲۶	۰.۰۰۷۱۳	۱	DL
۰.۲۲۱	۱.۶۷	۰.۰۶۴۴۷۴	۰.۰۶۴۴۷	۱	AV
۰.۲۵۶	۱.۴۳	۰.۰۵۵۰۲۹	۰.۰۵۵۰۳	۱	AL
۰.۳۴۰	۰.۹۹	۰.۰۳۸۱۲۳	۰.۰۳۸۱۲	۱	VL
		۰.۰۳۸۵۹۷	۰.۴۶۳۱۶	۱۲	خطای مانده
۰.۰۱۰	۹۵.۴۷	۰.۰۴۶۲۱۹	۰.۴۶۲۱۹	۱۰	عدم برازش
		۰.۰۰۰۴۸۴	۰.۰۰۰۹۷	۲	خطای خالص
			۲.۰۵۶۸۸	۲۶	مجموع

R-sq(adj) ۵۱.۲۱٪

R-sq ۷۷.۴۸٪

جدول ۳-۵. تحلیل واریانس پارامتر $(R_z)_i$

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۴۲۰.۲۳۷	۳۰.۰۱۷	۴.۳۶	۰.۰۰۷
Linear	۴	۳۰.۹۳۰۷	۷.۷۳۲۷	۱۱.۲۴	۰.۰۰۱
D	۱	۷.۴۳۲۷	۷.۴۳۲۷	۱۰.۸۰	۰.۰۰۶
A	۱	۱.۷۸۶۱	۱.۷۸۶۱	۲.۶۰	۰.۱۳۳
V	۱	۱۶.۸۱۳۶	۱۶.۸۱۳۶	۲۴.۴۴	۰.۰۰۰
L	۱	۴.۸۹۸۵	۴.۸۹۸۵	۷.۱۲	۰.۰۲۰
Square	۴	۶.۳۴۶۰	۱.۵۸۶۵	۲.۳۱	۰.۱۱۸
D ²	۱	۲.۳۲۸۶	۲.۳۲۸۶	۳.۳۸	۰.۰۹۱
A ²	۱	۳.۷۸۶۰	۳.۷۸۶۰	۵.۵۰	۰.۰۳۷
V ²	۱	۰.۰۴۳۵	۰.۰۴۳۵	۰.۰۶	۰.۸۰۶
L ²	۱	۰.۱۱۷۱	۰.۱۱۷۱	۰.۱۷	۰.۶۸۷
۲-Way Interaction	۶	۴.۷۴۷۱	۰.۷۹۱۲	۱.۱۵	۰.۳۹۲
DA	۱	۰.۲۴۶۷	۰.۲۴۶۷	۰.۳۶	۰.۵۶۰

۰.۲۶۱	۱.۳۹	۰.۹۵۷۱	۰.۹۵۷۱	۱	DV
۰.۴۵۰	۰.۶۱	۰.۴۲۰۳	۰.۴۲۰۳	۱	DL
۰.۰۶۸	۴.۰۴	۲.۷۷۷۸	۲.۷۷۷۸	۱	AV
۰.۵۰۷	۰.۴۷	۰.۳۲۱۱	۰.۳۲۱۱	۱	AL
۰.۸۵۵	۰.۰۳	۰.۰۲۴۰	۰.۰۲۴۰	۱	VL
		۰.۶۸۸۱	۸.۲۵۶۸	۱۲	خطای مانده
۰.۰۱۹	۵۲.۶۲	۰.۸۲۲۶	۸.۲۲۵۶	۱۰	عدم برازش
		۰.۰۱۵۶	۰.۰۳۱۳	۲	خطای خالص
			۵۰.۲۸۰۶	۲۶	مجموع

R-sq(adj) ۶۴.۴۲٪

R-sq ۸۳.۵۸٪

جدول ۴-۵. تحلیل واریانس پارامتر (Rq)i

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۲.۶۶۲۸۹	۰.۱۹۰۲۱	۴.۳۱	۰.۰۰۸
Linear	۴	۱.۷۱۹۴۳	۰.۴۲۹۸۶	۹.۷۵	۰.۰۰۱
D	۱	۰.۲۲۲۳۷	۰.۲۲۲۳۷	۵.۰۴	۰.۰۴۴
A	۱	۰.۰۸۲۰۱	۰.۰۸۲۰۱	۱.۸۶	۰.۱۹۸
V	۱	۱.۱۲۱۸۴	۱.۱۲۱۸۴	۲۵.۴۵	۰.۰۰۰
L	۱	۰.۲۹۳۲۱	۰.۲۹۳۲۱	۶.۶۵	۰.۰۲۴
Square	۴	۰.۷۵۶۵۹	۰.۱۸۹۱۵	۴.۲۹	۰.۰۲۲
D ²	۱	۰.۳۶۷۱۸	۰.۳۶۷۱۸	۸.۳۳	۰.۰۱۴
A ²	۱	۰.۵۶۲۳۰	۰.۵۶۲۳۰	۱۲.۷۵	۰.۰۰۴
V ²	۱	۰.۰۳۹۷۸	۰.۰۳۹۷۸	۰.۹۰	۰.۳۶۱
L ²	۱	۰.۰۰۳۴۸	۰.۰۰۳۴۸	۰.۰۸	۰.۷۸۴
۲-Way Interaction	۶	۰.۱۸۶۸۸	۰.۰۳۱۱۵	۰.۷۱	۰.۶۵۱
DA	۱	۰.۰۳۳۳۷	۰.۰۳۳۳۷	۰.۷۶	۰.۴۰۱
DV	۱	۰.۰۰۵۶۰	۰.۰۰۵۶۰	۰.۱۳	۰.۷۲۸

۰.۷۴۶	۰.۱۱	۰.۰۰۴۸۳	۰.۰۰۴۸۳	۱	DL
۰.۱۵۵	۲.۳۰	۰.۱۰۱۵۵	۰.۱۰۱۵۵	۱	AV
۰.۴۱۷	۰.۷۱	۰.۰۳۱۰۹	۰.۰۳۱۰۹	۱	AL
۰.۶۳۵	۰.۲۴	۰.۰۱۰۴۴	۰.۰۱۰۴۴	۱	VL
		۰.۰۴۴۰۸	۰.۵۲۹۰۲	۱۲	خطای مانده
۰.۰۰۰۹	۱۰۹.۵۷	۰.۰۵۲۸۱	۰.۵۲۸۰۵	۱۰	عدم برازش
		۰.۰۰۰۴۸	۰.۰۰۰۹۶	۲	خطای خالص
			۳.۱۹۱۹۱	۲۶	مجموع

R-sq(adj) ۶۴.۰۹٪

R-sq ۸۳.۴۳٪

مدل رگرسیون به منظور پیش‌بینی پارامترهای زبری سطوح داخلی به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده و غیرکدگذاری شده استخراج شدند. به این ترتیب روابط (۳-۵)، (۴-۵) و (۵-۵) به صورت معادلات رگرسیونی غیرکدگذاری شده و روابط (۴-۵)، (۵-۵) و (۶-۵) به صورت معادلات رگرسیونی کدگذاری شده می‌باشند:

$$\begin{aligned} (Ra)_i = & -3.42 + 1.145 D - 0.533 A + 1.03 V + 0.177 L - 0.0592 D^2 \\ & + 0.0357 A^2 - 0.34 V^2 - 0.029 L^2 + 0.00162 DA - 0.0491 DV \\ & + 0.0106 DL + 0.0705 AV - 0.0195 AL - 0.163 VL \end{aligned} \quad (۳-۵)$$

$$\begin{aligned} (Ra)_i = & 0.6564 - 0.1057 D + 0.0518A + 0.2062 V + 0.0645 L - 0.237 D^2 \\ & + 0.321 A^2 - 0.031 V^2 - 0.029 L^2 + 0.0097 DA - 0.0294 DV \\ & + 0.0211 DL + 0.0635 AV - 0.0586 AL - 0.0488 VL \end{aligned} \quad (۴-۵)$$

$$\begin{aligned} (Rz)_i = & -11.4 + 4.50 D - 2.221 A + 2.61 V + 1.73 L - 0.238 D^2 + 0.1348 A^2 \\ & + 1.45 V^2 + 0.213 L^2 + 0.0207 DA - 0.408 DV - 0.081 DL \\ & + 0.463 AV - 0.0472 AL - 0.129 VL \end{aligned} \quad (۵-۵)$$

$$\begin{aligned} (Rz)_i = & 3.518 - 0.643 D + 0.315 A + 0.966 V + 0.522 L - 0.952 D^2 \\ & + 1.213 A^2 + 0.130 V^2 + 0.213 L^2 + 0.124 DA - 0.245 DV - \\ & 0.162 DL + 0.417 AV - 0.142 AL - 0.039 VL \end{aligned} \quad (۶-۵)$$

$$(Rq)_i = -5.70 + 1.796 D - 0.825 A + 1.91 V + 0.186 L - 0.0945 D^2 \quad (۷-۵)$$

$$+ 0.0520 A^2 - 1.38 V^2 + 0.037 L^2 + 0.00761 DA - 0.0312 DV$$

$$+ 0.0087 DL + 0.0885 AV - 0.0147 AL - 0.085 VL$$

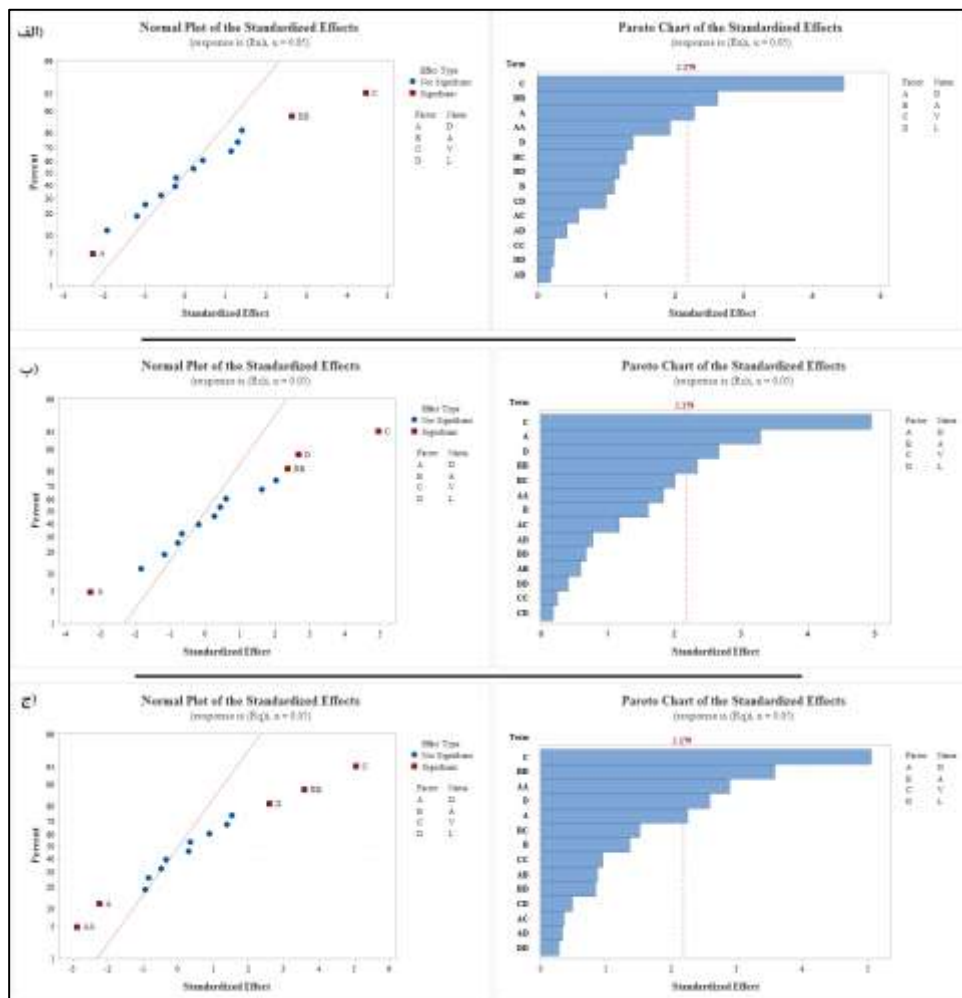
$$(Rq)_i = 0.8749 - 0.1111 D + 0.0675 A + 0.2496 V + 0.1276 L - 0.378 D^2 \quad (۸-۵)$$

$$+ 0.468 A^2 - 0.124 V^2 + 0.037 L^2 + 0.0457 DA - 0.0187 DV$$

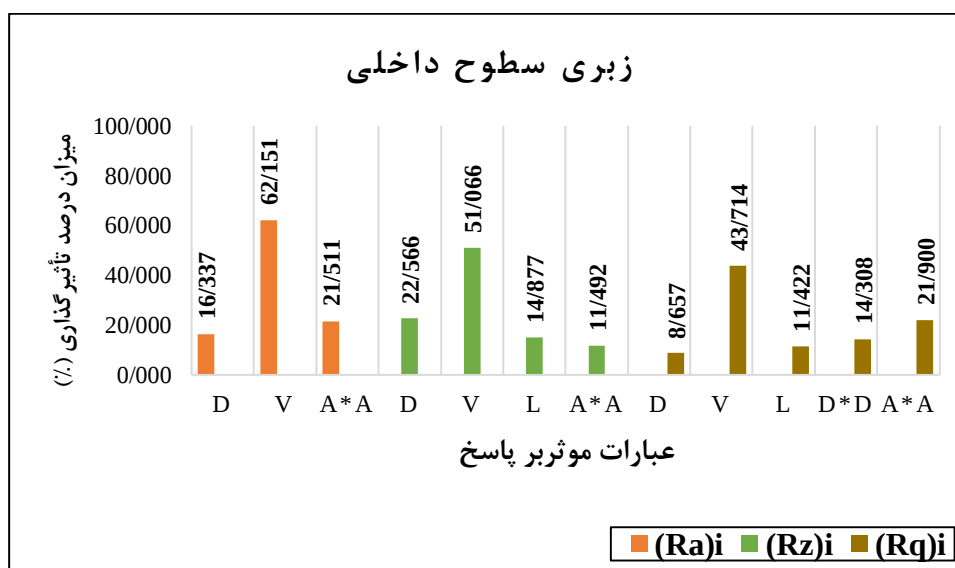
$$+ 0.0174 DL + 0.0797 AV - 0.0441 AL - 0.0255 VL$$

۵-۳-۱- نمودار توزیع نرمال اثرات داده‌ها و پارتو

(شکل ۵-۶) اثرات نرمال عبارات بر زبری سطوح داخلی در سطح اطمینان ۹۵ درصد را نشان می‌دهد. از این رو می‌توان دریافت که متغیرهای: گام عمودی ابزار V ، اثر مجذورگام زاویه‌ای (A^2) و قطر ابزار D بر $(Ra)_i$ (شکل ۵-۶-الف)؛ گام عمودی ابزار V ، قطر ابزار D ، روانکار L و اثر مجذورگام زاویه‌ای (A^2) بر $(Rz)_i$ (شکل ۵-۶-ب)؛ و همچنین گام عمودی ابزار V ، اثر مجذورگام زاویه‌ای (A^2) و قطر ابزار (D^2)، روانکار L و قطر ابزار D بر $(Rq)_i$ (شکل ۵-۶-ج) نسبت به خط توزیع، به عنوان عبارات موثر شناخته شدند. سایر عبارات به صورت عوامل غیر موثر بر مدل شناخته شدند. همچنین (شکل ۷-۵) میزان درصد عبارات موثر بر پارامترهای زبری سطوح را نشان می‌دهد.



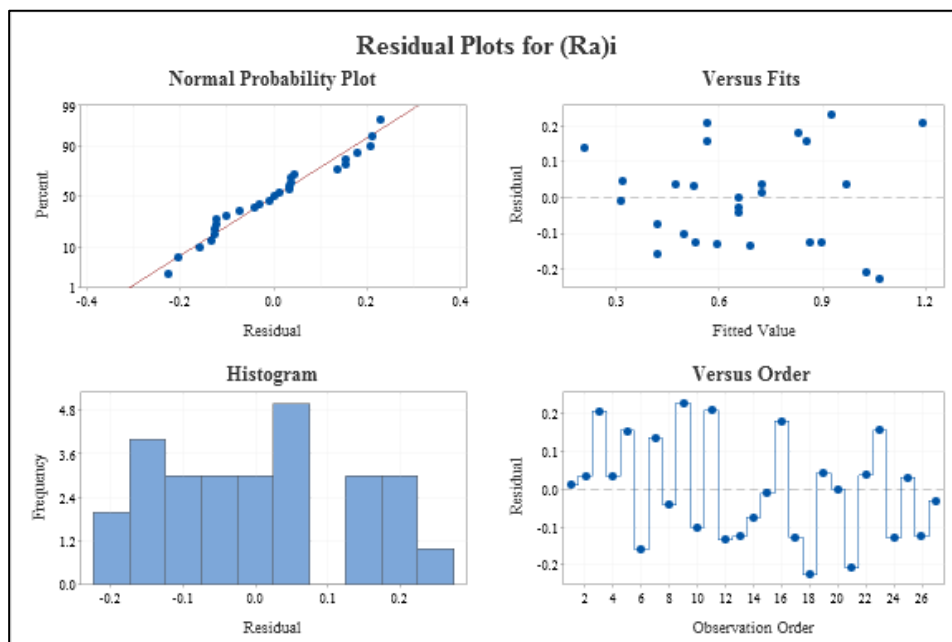
شکل ۵-۶. نمودار احتمال نرمال اثرات و پارتو الف) $(Ra)_i$ ب) $(Rz)_i$ و ج) $(Rq)_i$



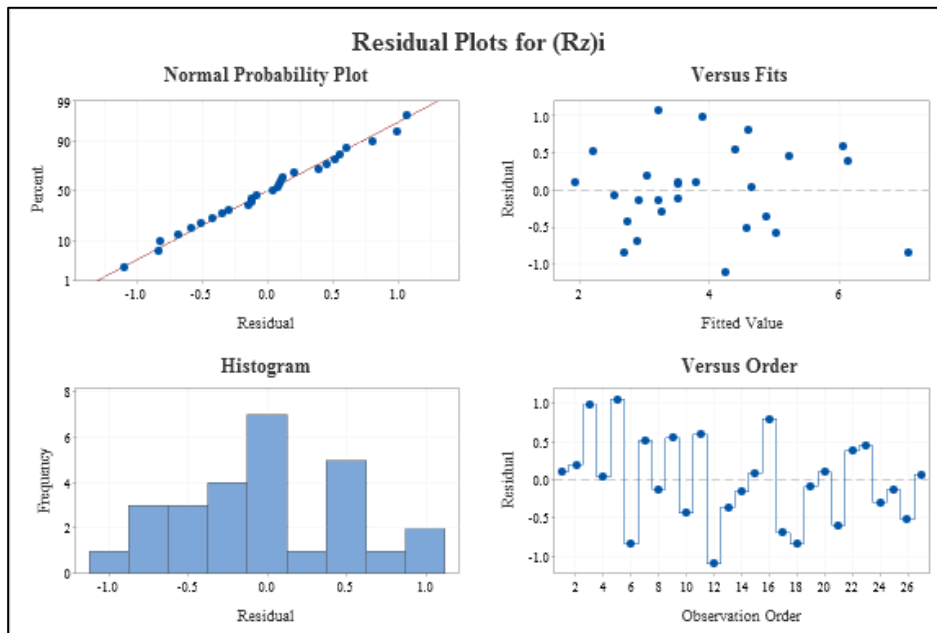
شکل ۵-۷. نمودار درصد اثرگذاری عبارت‌های موثر بر الف) $(Ra)_i$ ب) $(Rz)_i$ و ج) $(Rq)_i$

۵-۳-۲- نمودار باقیمانده‌ها

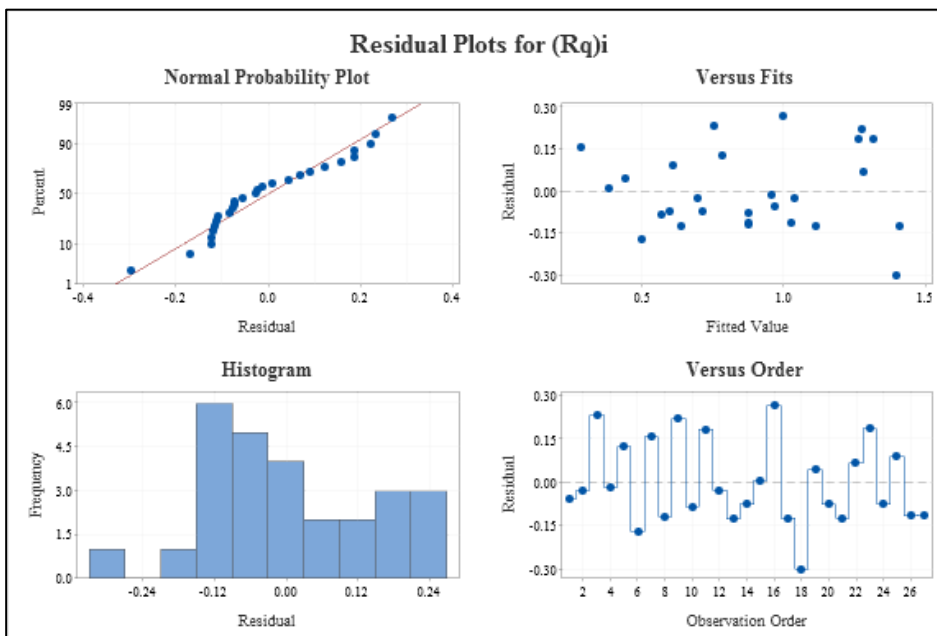
(مطابق شکل ۵-۸) می‌توان اظهار داشت که میزان باقیمانده نسبت به خط رگرسیون از یک روند نسبتاً نزدیک به هم پیروی می‌کنند. از این رو مدل توانسته است رابطه‌ی خوبی بین متغیرهای ورودی با پارامتر پاسخ برقرار کند. همچنین باقیمانده‌ها به طور تصادفی در اطراف محور صفر، توزیع شده‌اند و نمودارها شامل هیچ الگوی مشخصی نبوده و کاملاً بی‌ساختار می‌باشند. از این رو، مدل‌های رگرسیون برای نتایج آزمایش، قابل اعتماد و مناسب می‌باشند.



(الف)



(ب)



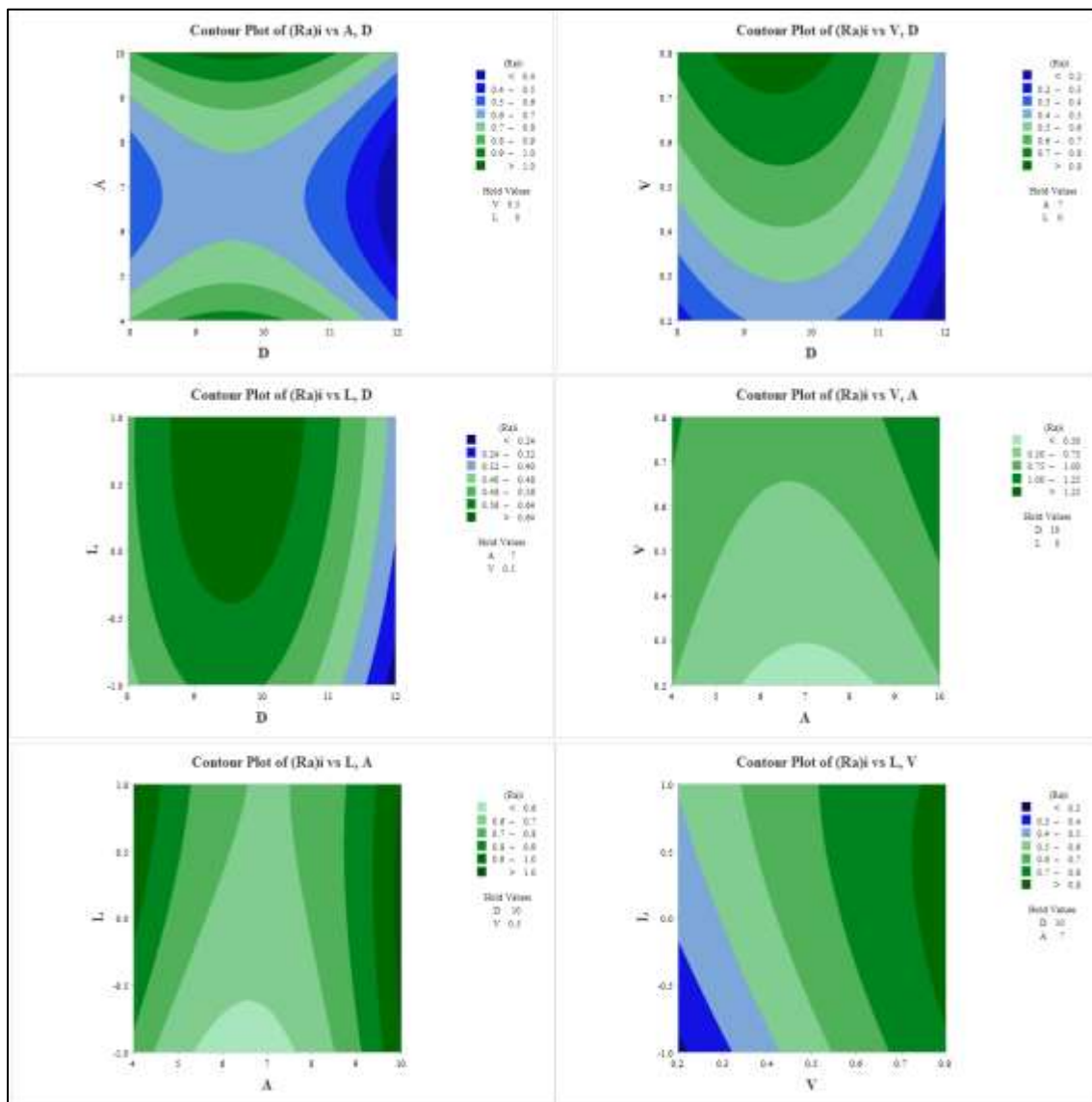
(ج)

شکل ۵-۸. نمودار باقیمانده الف) $(Ra)_i$ ب) $(Rz)_i$ و ج) $(Rq)_i$

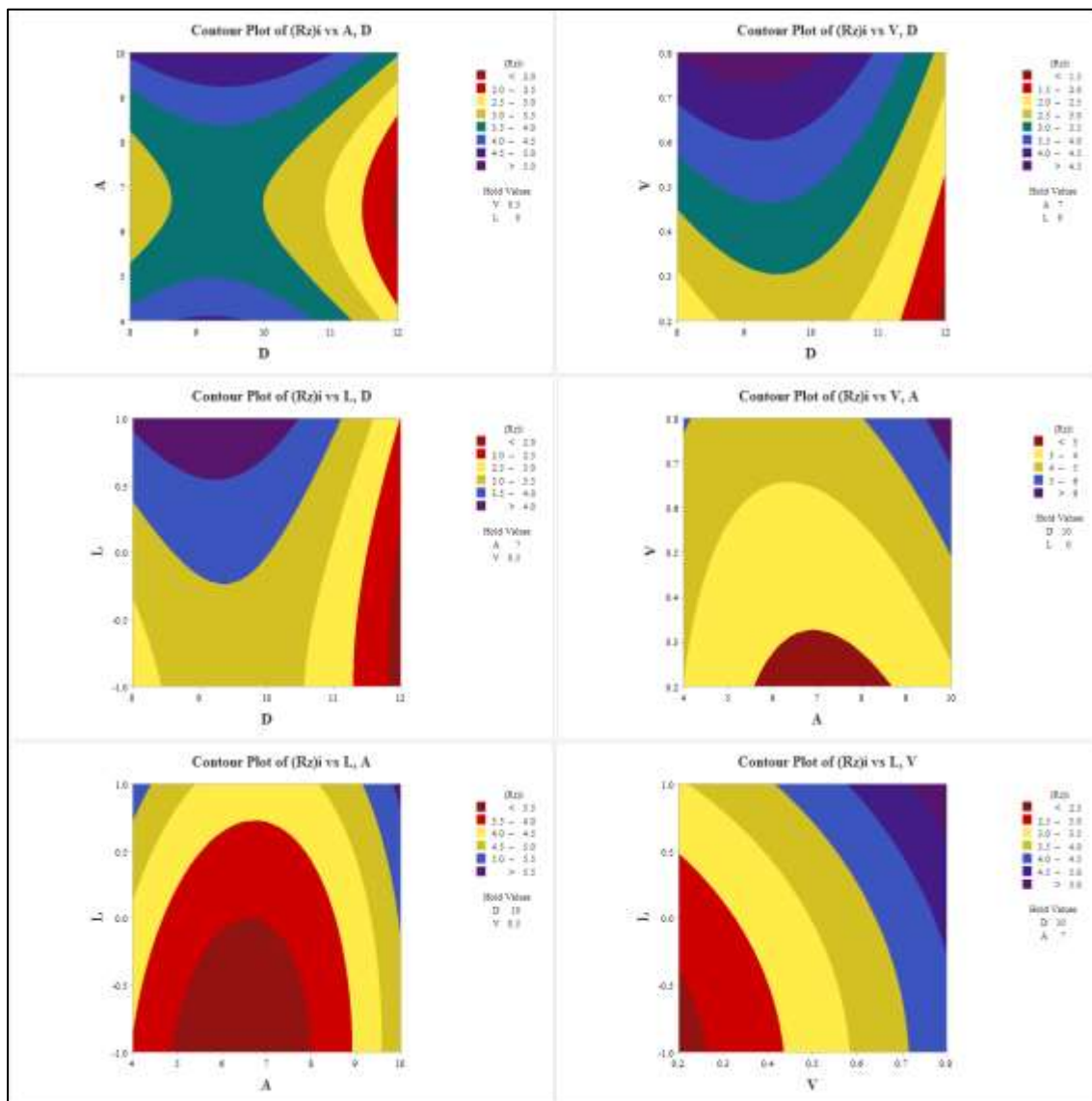
۵-۳-۳- نمودارهای دو بعدی منحنی تراز^۷

(مطابق شکل‌های دو بعدی ۹-۵ الی ۱۱-۵)، با توجه به حداقل‌سازی پارامترهای زبری سطوح داخلی به ترتیب: (شکل ۹-۵) سطوح با رنگ آبی به عنوان پاسخ $(Ra)_i$ ، (شکل ۱۰-۵) سطوح با رنگ قرمز به عنوان پاسخ $(Rz)_i$ و (شکل ۱۱-۵) سطوح با رنگ سبز به عنوان پاسخ $(Rq)_i$ می‌باشند. همچنین نمودار سه بعدی پارامترهای زبری سطوح داخلی در پیوست ج قابل مشاهده می‌باشند.

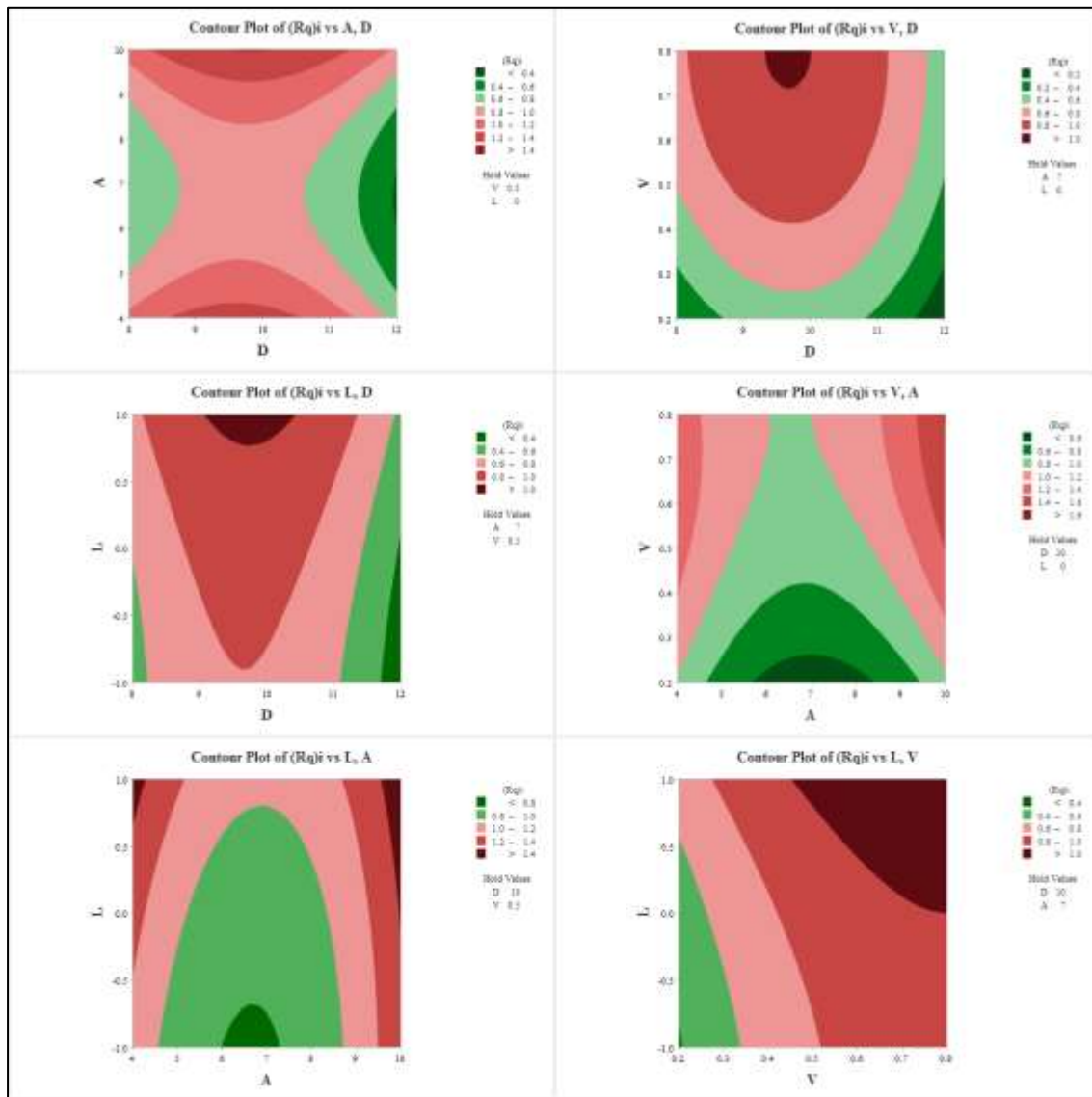
⁷ Surface plots



شکل ۵-۹. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Ra)_i$ به صورت دو بعدی



شکل ۵-۱۰. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rz)_i$ به صورت دو بعدی

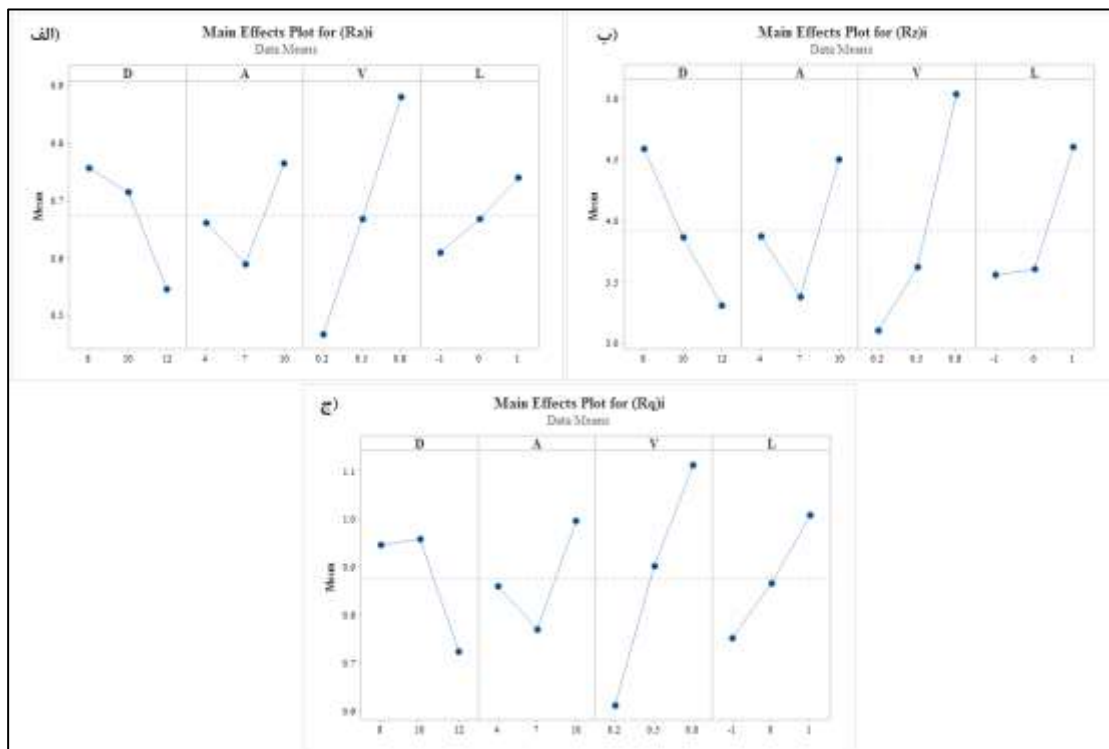


شکل ۵-۱۱. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rq)_i$ به صورت دو بعدی

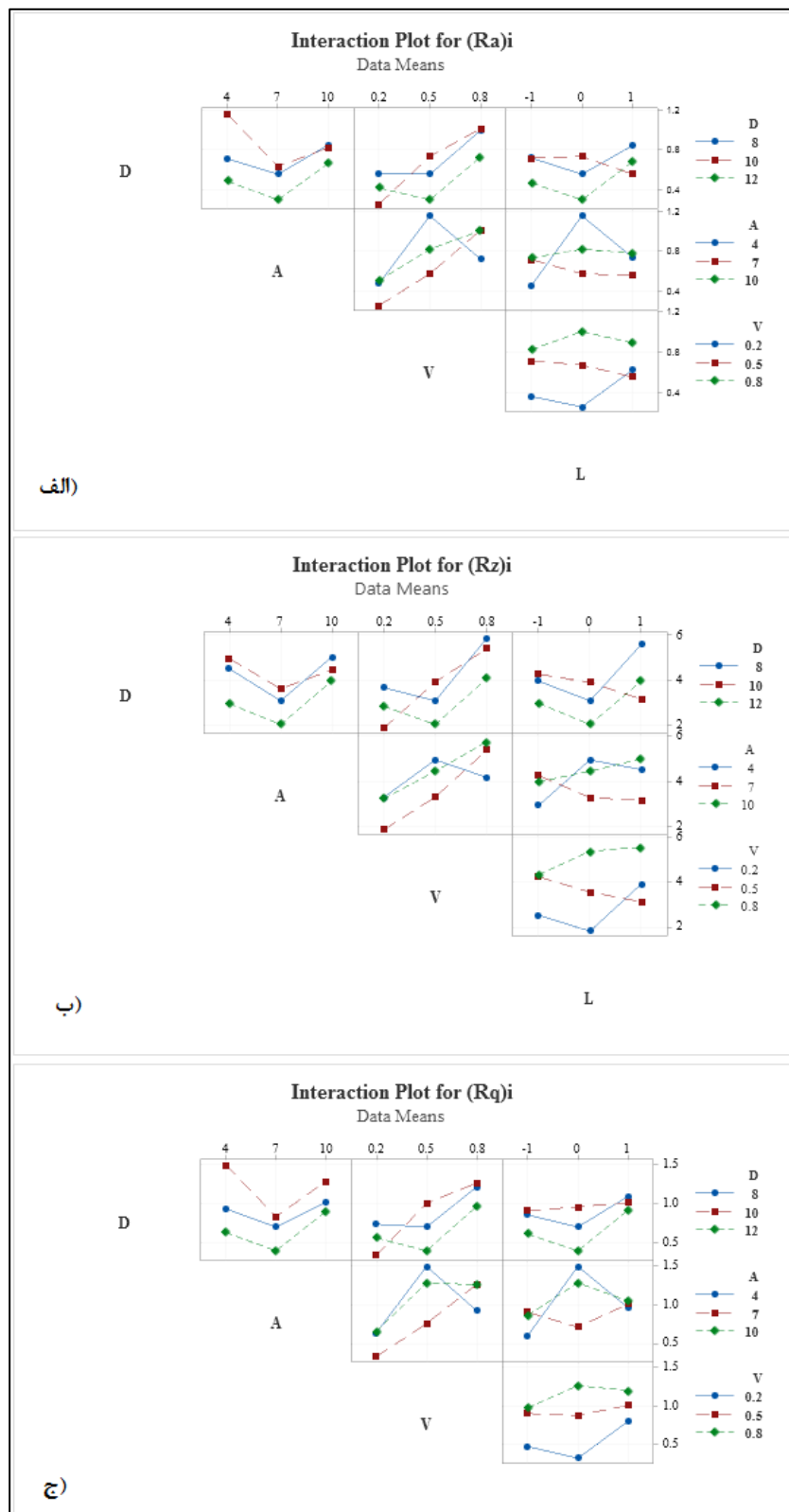
۵-۳-۴- نمودار اثرات خطی و متقابل داده‌ها

(شکل ۵-۱۲) اثرات خطی متغیرهای ورودی بر پارامترهای زبری سطوح داخلی لوله را نشان می‌دهد. با توجه به (شکل ۵-۱۲) متغیر گام عمودی ابزار ۰.۲ mm، قطر ابزار ۱۲ mm بیشترین اثر را بر

پارامترهای $(Ra)_i$ ، $(Rz)_i$ و $(Rq)_i$ دارند. همچنین (شکل ۵-۱۲) تأثیرات تعاملی متغیرهای ورودی بر پارامتر پاسخ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲. نمودار اثرات خطی متغیرهای ورودی بر الف) $(Ra)_i$ ب) $(Rz)_i$ و ج) $(Rq)_i$



شکل ۵-۱۳. نمودار اثرات متقابل متغیرهای ورودی بر الف) $(Ra)_i$ ب) $(Rz)_i$ و ج) $(Rq)_i$

۵-۴- تجزیه و تحلیل زبری سطح خارجی لوله

(مطابق جدول‌های ۵-۵ الی ۷-۵)، تأثیر متغیرهای ورودی فرآیند از جمله: قطر ابزار D، گام زاویه‌ای A، گام عمودی ابزار V و روانکار L بر زبری سطح خارجی لوله با تنظیم پارامتر: $(Ra)_e$ ، $(Rz)_e$ و $(Rq)_e$ با سطح اطمینان $\alpha=0,05$ مورد آنالیز قرار گرفتند. با توجه به تحلیل واریانس عبارات موثر بر $(Ra)_e$ ، $(Rz)_e$ و $(Rq)_e$ با $P\text{-Value} \leq 0,05$ به ترتیب: قطر ابزار D، گام عمودی ابزار V و مجذور گام زاویه‌ای (A^2) و گام عمودی (V^2) و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی (DV) (جدول ۵-۵)؛ قطر ابزار D، گام عمودی ابزار V و مجذور گام زاویه‌ای (A^2) و گام عمودی (V^2) و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی (DV) (جدول ۶-۵)؛ قطر ابزار D، گام عمودی ابزار V و مجذور گام عمودی (V^2) و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی (DV) و قطر ابزار در روانکار (DL) (جدول ۷-۵) شناخته شدند.

جدول ۵-۵. تحلیل واریانس پارامتر $(Ra)_e$

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۰.۶۵۰۵۷۲	۰.۰۴۶۴۶۹	۶.۶۸	۰.۰۰۱
Linear	۴	۰.۳۶۷۶۹۳	۰.۰۹۱۹۲۳	۱۳.۲۲	۰.۰۰۰
D	۱	۰.۰۴۴۴۰۲	۰.۰۴۴۴۰۲	۶.۳۸	۰.۰۲۷
A	۱	۰.۰۱۴۶۰۲	۰.۰۱۴۶۰۲	۲.۱۰	۰.۱۷۳
V	۱	۰.۳۰۷۶۷۷	۰.۳۰۷۶۷۷	۴۴.۲۴	۰.۰۰۰
L	۱	۰.۰۰۱۰۱۲	۰.۰۰۱۰۱۲	۰.۱۵	۰.۷۰۹
Square	۴	۰.۱۰۷۴۲۰	۰.۰۲۶۸۵۵	۳.۸۶	۰.۰۳۱
D^2	۱	۰.۰۰۴۱۸۶	۰.۰۰۴۱۸۶	۰.۶۰	۰.۴۵۳
A^2	۱	۰.۰۴۲۳۵۸	۰.۰۴۲۳۵۸	۶.۰۹	۰.۰۳۰

۰.۰۱۰	۹.۳۱	۰.۰۶۴۷۲۶	۰.۰۶۴۷۲۶	۱	V^2
۰.۲۳۲	۱.۵۹	۰.۰۱۱۰۲۸	۰.۰۱۱۰۲۸	۱	L^2
۰.۰۱۶	۴.۲۱	۰.۰۲۹۲۴۳	۰.۱۷۵۴۶۰	۶	۲-Way Interaction
۰.۶۸۱	۰.۱۸	۰.۰۰۱۲۳۱	۰.۰۰۱۲۳۱	۱	DA
۰.۰۰۱	۱۸.۲۷	۰.۱۲۷۰۳۳	۰.۱۲۷۰۳۳	۱	DV
۰.۸۱۱	۰.۰۶	۰.۰۰۰۴۱۷	۰.۰۰۰۴۱۷	۱	DL
۰.۰۶۸	۴.۰۲	۰.۰۲۷۹۷۳	۰.۰۲۷۹۷۳	۱	AV
۰.۴۹۵	۰.۵۰	۰.۰۰۳۴۵۲	۰.۰۰۳۴۵۲	۱	AL
۰.۱۶۳	۲.۲۱	۰.۰۱۵۳۵۵	۰.۰۱۵۳۵۵	۱	VL
		۰.۰۰۶۹۵۴	۰.۰۸۳۴۵۳	۱۲	خطای مانده
۰.۱۱۴	۸.۱۵	۰.۰۰۸۱۴۶	۰.۰۸۱۴۵۵	۱۰	عدم برازش
		۰.۰۰۰۹۹۹	۰.۰۰۱۹۹۸	۲	خطای خالص
			۰.۷۳۴۰۲۵	۲۶	مجموع

R-sq(adj) ۷۵.۳۷٪

R-sq ۸۸.۶۳٪

جدول ۵-۶. تحلیل واریانس پارامتر (Rz)e

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۲۱.۳۹۴۸	۱.۵۲۸۲	۷.۹۴	۰.۰۰۰
Linear	۴	۱۳.۰۰۵۲	۳.۲۵۱۳	۱۶.۹۰	۰.۰۰۰
D	۱	۱.۱۸۲۲	۱.۱۸۲۲	۶.۱۵	۰.۰۲۹
A	۱	۰.۴۶۶۳	۰.۴۶۶۳	۲.۴۲	۰.۱۴۵
V	۱	۱۰.۶۴۱۹	۱۰.۶۴۱۹	۵۵.۳۲	۰.۰۰۰
L	۱	۰.۷۱۴۸	۰.۷۱۴۸	۳.۷۲	۰.۰۷۸
Square	۴	۳.۴۰۷۷	۰.۸۵۱۹	۴.۴۳	۰.۰۲۰
D²	۱	۰.۰۹۴۷	۰.۰۹۴۷	۰.۴۹	۰.۴۹۶
A²	۱	۱.۳۵۸۵	۱.۳۵۸۵	۷.۰۶	۰.۰۲۱

۰.۰۰۸	۱۰.۲۳	۱.۹۶۷۹	۱.۹۶۷۹	۱	V ²
۰.۱۸۸	۱.۹۵	۰.۳۷۴۲	۰.۳۷۴۲	۱	L ²
۰.۰۱۵	۴.۳۲	۰.۸۳۰۳	۴.۹۸۱۹	۶	۲-Way Interaction
۰.۹۱۰	۰.۰۱	۰.۰۰۲۶	۰.۰۰۲۶	۱	DA
۰.۰۰۱	۲۰.۳۰	۳.۹۰۴۲	۳.۹۰۴۲	۱	DV
۰.۶۲۱	۰.۲۶	۰.۰۴۹۵	۰.۰۴۹۵	۱	DL
۰.۰۷۵	۳.۸۱	۰.۷۳۲۳	۰.۷۳۲۳	۱	AV
۰.۳۶۶	۰.۸۸	۰.۱۷۰۱	۰.۱۷۰۱	۱	AL
۰.۴۳۹	۰.۶۴	۰.۱۲۳۱	۰.۱۲۳۱	۱	VL
		۰.۱۹۲۴	۲.۳۰۸۴	۱۲	خطای مانده
۰.۵۱۳	۱.۲۹	۰.۱۹۹۹	۱.۹۹۸۸	۱۰	عدم برازش
		۰.۱۵۴۸	۰.۳۰۹۶	۲	خطای خالص
			۲۳.۷۰۳۲	۲۶	مجموع

R-sq(adj) ۷۸.۹۰٪

R-sq ۹۰.۲۶٪

جدول ۵-۷. تحلیل واریانس پارامتر (Rq)

منبع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۱۴	۲.۰۶۴۷۲	۰.۱۴۷۴۸۰	۷.۳۹	۰.۰۰۱
Linear	۴	۱.۱۹۴۵۴	۰.۲۹۸۶۳۴	۱۴.۹۷	۰.۰۰۰
D	۱	۰.۲۶۶۰۴	۰.۲۶۶۰۴۵	۱۳.۳۴	۰.۰۰۳
A	۱	۰.۰۰۴۶۹	۰.۰۰۴۶۹۴	۰.۲۴	۰.۶۳۶
V	۱	۰.۹۱۳۶۵	۰.۹۱۳۶۵۲	۴۵.۸۱	۰.۰۰۰
L	۱	۰.۰۱۰۱۵	۰.۰۱۰۱۴۵	۰.۵۱	۰.۴۸۹
Square	۴	۰.۲۵۶۷۹	۰.۰۶۴۱۹۷	۳.۲۲	۰.۰۵۲
D ²	۱	۰.۰۰۳۳۳	۰.۰۰۳۳۳۴	۰.۱۷	۰.۶۹۰
A ²	۱	۰.۰۵۱۰۱	۰.۰۵۱۰۰۶	۲.۵۶	۰.۱۳۶

۰.۰۲۰	۷.۱۳	۰.۱۴۲۲۰۱	۰.۱۴۲۲۰	۱	V ²
۰.۳۲۸	۱.۰۴	۰.۰۲۰۷۴۹	۰.۰۲۰۷۵	۱	L ²
۰.۰۰۸	۵.۱۳	۰.۱۰۲۲۳۳	۰.۶۱۳۴۰	۶	۲-Way Interaction
۰.۷۸۶	۰.۰۸	۰.۰۰۱۵۳۴	۰.۰۰۱۵۳	۱	DA
۰.۰۰۲	۱۵.۴۵	۰.۳۰۸۲۱۰	۰.۳۰۸۲۱	۱	DV
۰.۰۱۸	۷.۴۷	۰.۱۴۸۹۹۶	۰.۱۴۹۰۰	۱	DL
۰.۱۵۴	۲.۳۱	۰.۰۴۶۰۸۲	۰.۰۴۶۰۸	۱	AV
۰.۱۲۵	۲.۷۲	۰.۰۵۴۲۱۱	۰.۰۵۴۲۱	۱	AL
۰.۱۲۵	۲.۷۳	۰.۰۵۴۳۶۷	۰.۰۵۴۳۷	۱	VL
		۰.۰۱۹۹۴۶	۰.۲۳۹۳۶	۱۲	خطای مانده
۰.۰۴۸	۲۰.۳۲	۰.۰۲۳۷۰۲	۰.۲۳۷۰۲	۱۰	عدم برازش
		۰.۰۰۱۱۶۶	۰.۰۰۲۳۳	۲	خطای خالص
			۲.۳۰۴۰۸	۲۶	مجموع

R-sq(adj) ۷۷.۴۹٪

R-sq ۸۹.۶۱٪

مدل رگرسیون به منظور پیش‌بینی پارامترهای زبری سطوح داخلی به صورت تابعی از متغیرهای ورودی کدگذاری شده و غیرکدگذاری شده استخراج شدند. به این ترتیب روابط (۵-۹)، (۵-۱۱) و (۵-۱۳) به صورت معادلات رگرسیونی غیرکدگذاری شده و روابط (۵-۱۰)، (۵-۱۲) و (۵-۱۴) به صورت معادلات رگرسیونی کدگذاری شده می‌باشند:

$$\begin{aligned} (Ra)_e = & -1.75 + 0.261 D + 0.2005 A - 0.167 V + 0.001 L - 0.0101 D^2 - \\ & 0.01426 A^2 + 1.763 V^2 + 0.0655 L^2 - 0.00146 DA - 0.1485 DV - \\ & 0.0026 DL + 0.0465 AV - 0.00490 AL + 0.1033 VL \end{aligned} \quad (۵-۹)$$

$$\begin{aligned} (Ra)_e = & 0.2345 - 0.0497 D + 0.0285 A + 0.1307 V - 0.0075 L - 0.0403 D^2 - \\ & 0.1283 A^2 + 0.1587 V^2 + 0.0655 L^2 - 0.0088 DA - 0.0891 DV - \\ & 0.0051 DL + 0.0418 AV - 0.0147 AL + 0.0310 VL \end{aligned} \quad (۵-۱۰)$$

$$(Rz)_e = -8.31 + 1.23 D + 1.044 A - 0.59 V - 0.383 L - 0.0480 D^2 - 0.0808 A^2 + 9.72 V^2 + 0.381 L^2 + 0.0021 DA - 0.823 DV + 0.0278 DL + 0.238 AV - 0.0344 AL + 0.292 VL \quad (۱۱-۵)$$

$$(Rz)_e = 1.527 - 0.256 D + 0.161 A + 0.769 V - 0.199 L - 0.192 D^2 - 0.727 A^2 + 0.875 V^2 + 0.381 L^2 + 0.013 DA - 0.494 DV + 0.056 DL + 0.214 AV - 0.103 AL + 0.088 VL \quad (۱۲-۵)$$

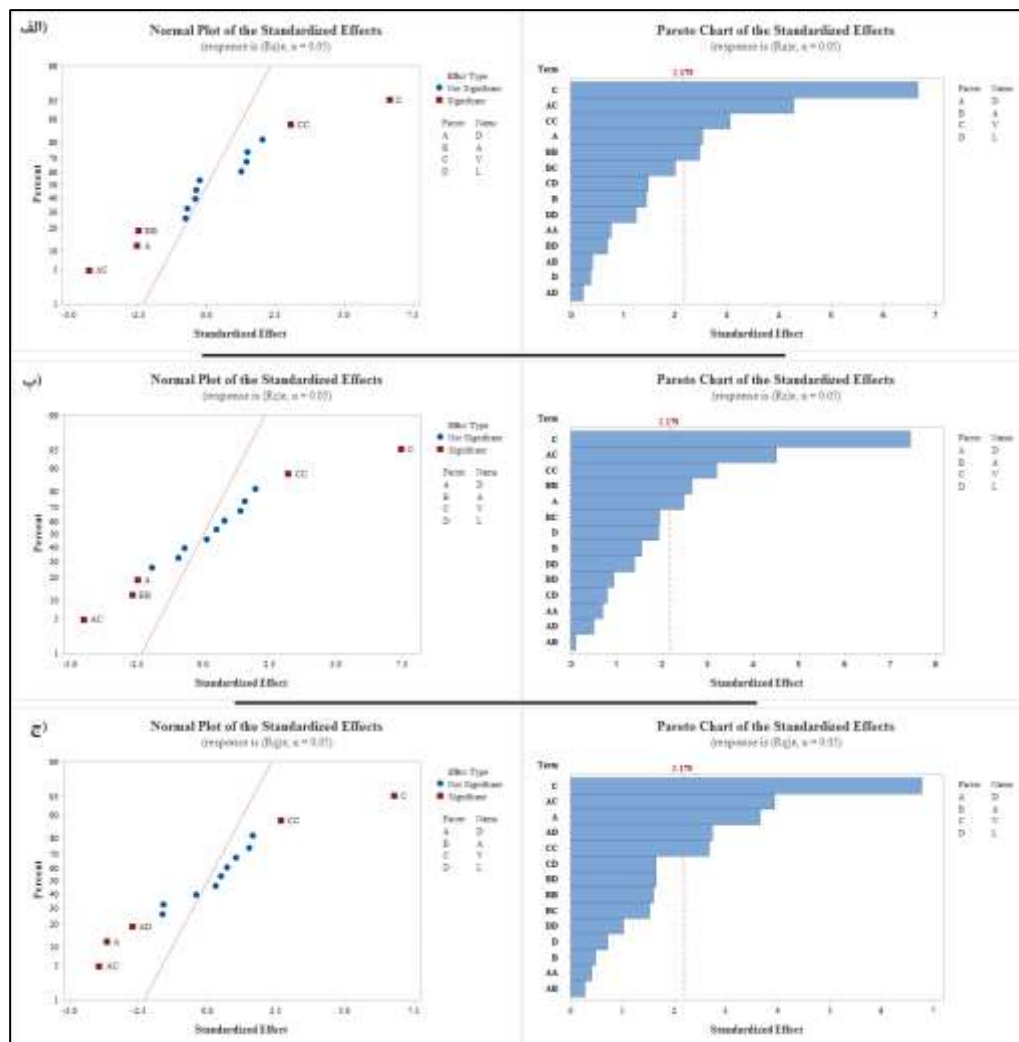
$$(Rq)_e = -1.31 + 0.223 D + 0.178 A + 0.03 V + 0.545 L - 0.0090 D^2 - 0.01565 A^2 + 2.613 V^2 + 0.0898 L^2 + 0.00163 DA - 0.2313 DV - 0.0482 DL + 0.0596 AV - 0.0194 AL + 0.194 VL \quad (۱۳-۵)$$

$$(Rq)_e = 0.3410 - 0.1216 D + 0.0161 A + 0.2253 V + 0.0237 L - 0.0360 D^2 - 0.1408 A^2 + 0.2352 V^2 + 0.0898 L^2 + 0.0098 DA - 0.1388 DV - 0.0965 DL + 0.0537 AV - 0.0582 AL + 0.0583 VL \quad (۱۴-۵)$$

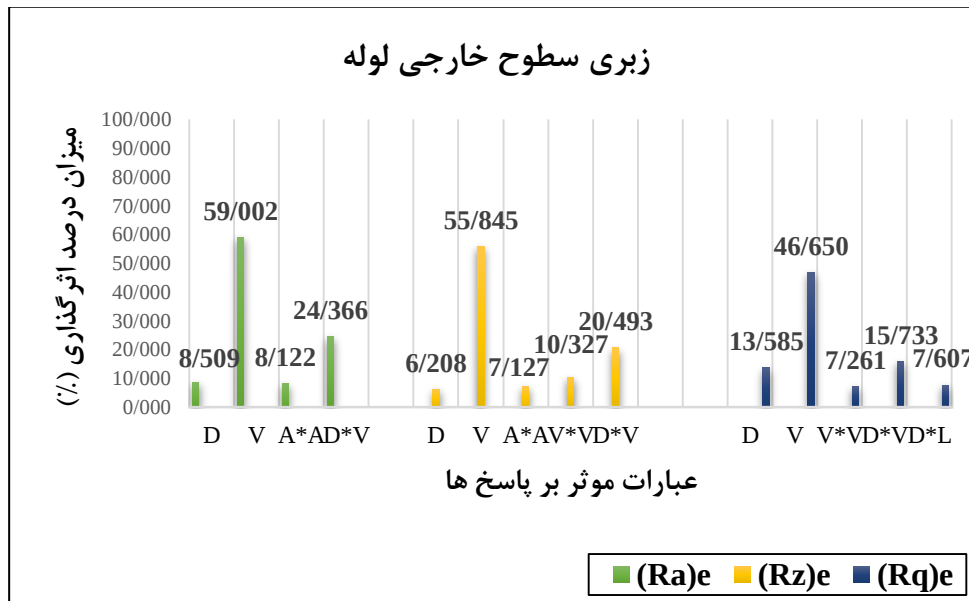
۵-۴-۱- نمودار توزیع نرمال اثرات داده‌ها و پارتو

(شکل ۵-۱۴) اثرات نرمال عبارات را بر زبری سطوح خارجی لوله در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد. از این رو می‌توان دریافت که متغیرهای: گام عمودی ابزار V ، اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی ابزار (DV) ، مجذور گام عمودی ابزار (V^2) ، قطر ابزار D و اثر مجذور گام زاویه‌ای (A^2) بر $(Ra)_e$ (شکل ۵-۱۴ الف)؛ گام عمودی ابزار V ، اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی ابزار (DV) ، مجذور گام عمودی ابزار (V^2) ، اثر مجذور گام زاویه‌ای (A^2) و قطر ابزار D بر $(Rz)_e$ (شکل ۵-۱۴ ب)؛ و همچنین گام عمودی ابزار V ، اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی ابزار (DV) ، قطر ابزار D ، حاصل ضرب قطر ابزار در روانکار (DL) و مجذور گام عمودی (V^2) بر $(Rq)_e$ (شکل ۵-۱۴ ج) نسبت به خط توزیع، به عنوان عبارات موثر شناخته شدند. سایر عبارات به صورت

عوامل غیر موثر بر مدل حاصل شدند. همچنین (شکل ۵-۱۵) میزان اثر گذاری عبارات موثر بر پارامترهای زبری سطوح خارجی را بر حسب درصد را نشان می‌دهد.



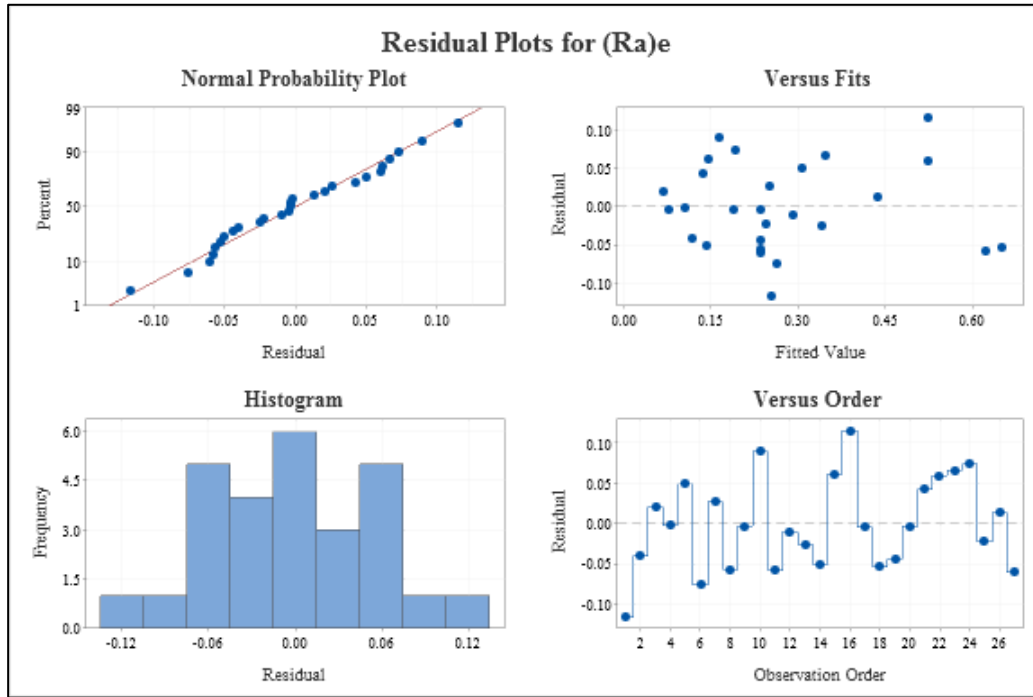
شکل ۵-۱۴. نمودار احتمال نرمال اثرات و پارتو الف) $(Ra)_e$ ب) $(Rz)_e$ و ج) $(Rq)_e$



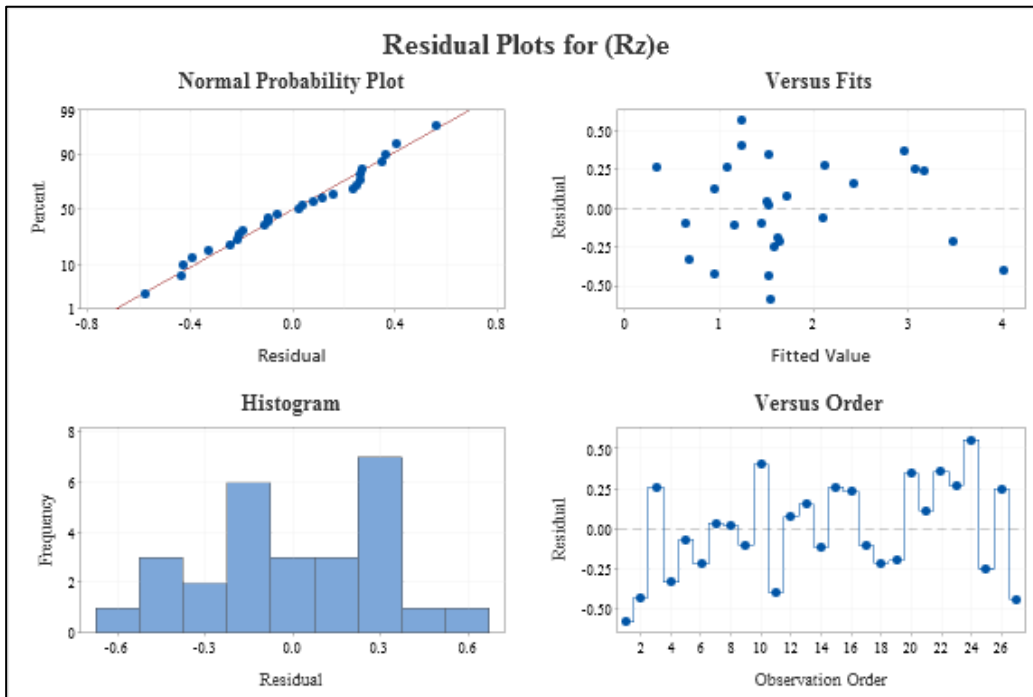
شکل ۵-۱۵. نمودار درصد اثرگذاری عبارت‌های موثر بر الف) $(Ra)_e$ ب) $(Rz)_e$ و ج) $(Rq)_e$

۵-۴-۲- نمودار باقیمانده‌ها

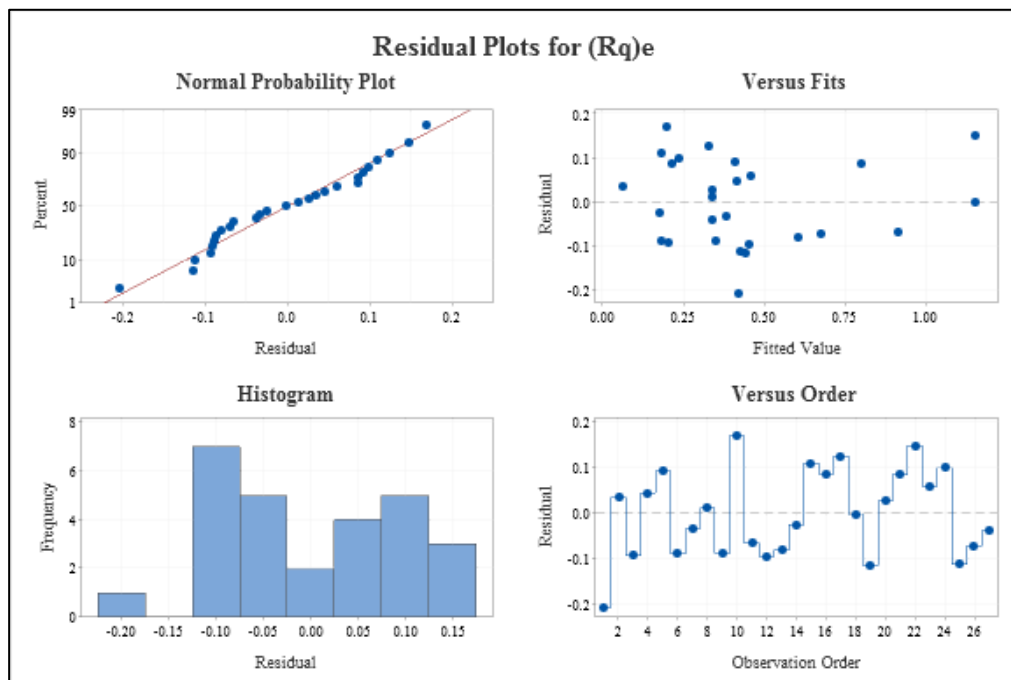
(مطابق شکل ۵-۱۶) می‌توان اظهار داشت که میزان باقیمانده نسبت به خط رگرسیون از یک روند نسبتاً نزدیک به هم پیروی می‌کنند. از این رو مدل توانسته است رابطه‌ی خوبی بین متغیرهای ورودی با پارامتر پاسخ برقرار کند. همچنین باقیمانده‌ها به طور تصادفی در اطراف محور صفر، توزیع شده‌اند و نمودارها شامل هیچ الگوی مشخصی نبوده و کاملاً بی‌ساختار می‌باشند. از این رو، مدل‌های رگرسیون برای نتایج آزمایش، قابل اعتماد و مناسب می‌باشند.



(الف)



(ب)

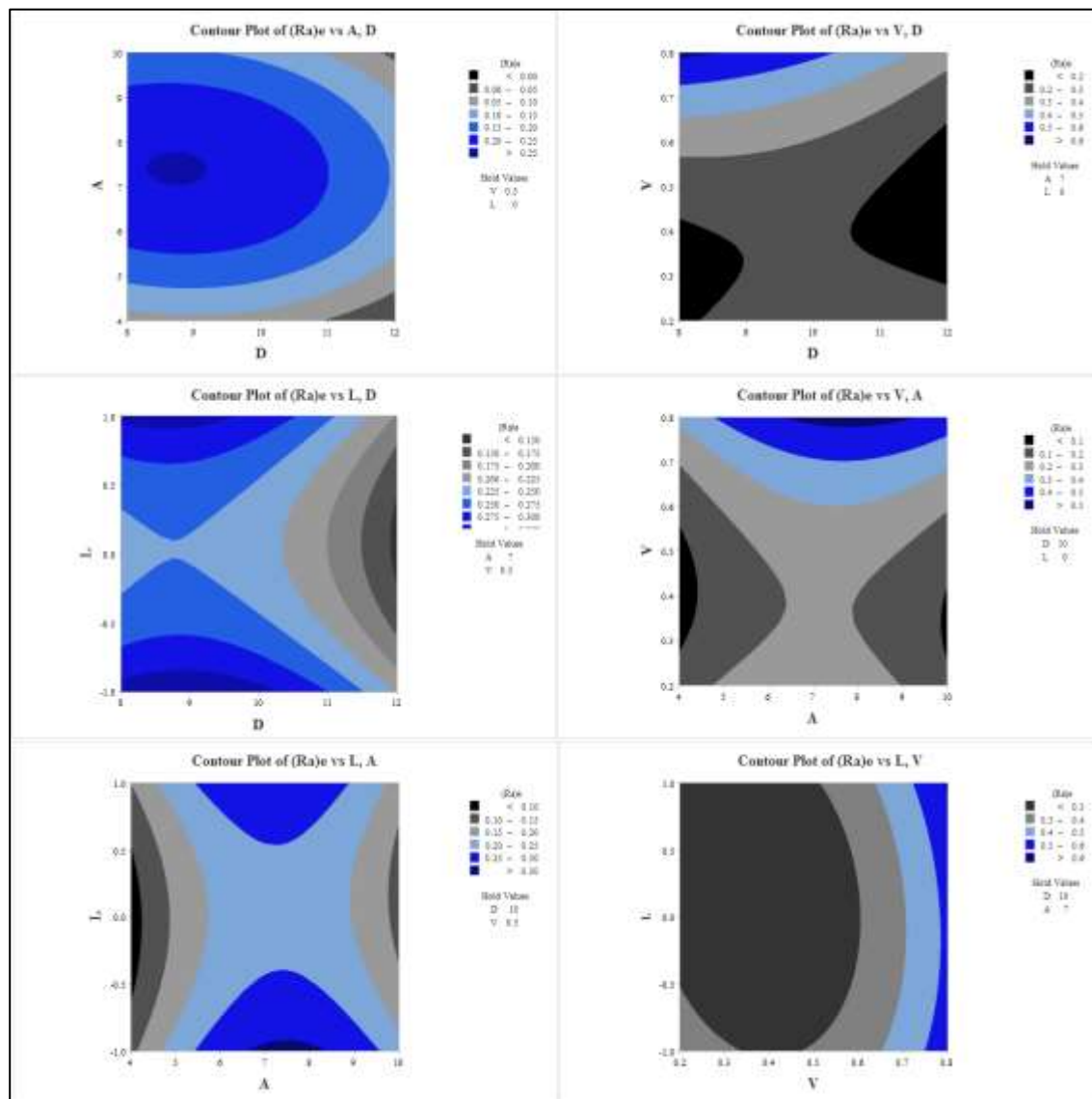


(ج)

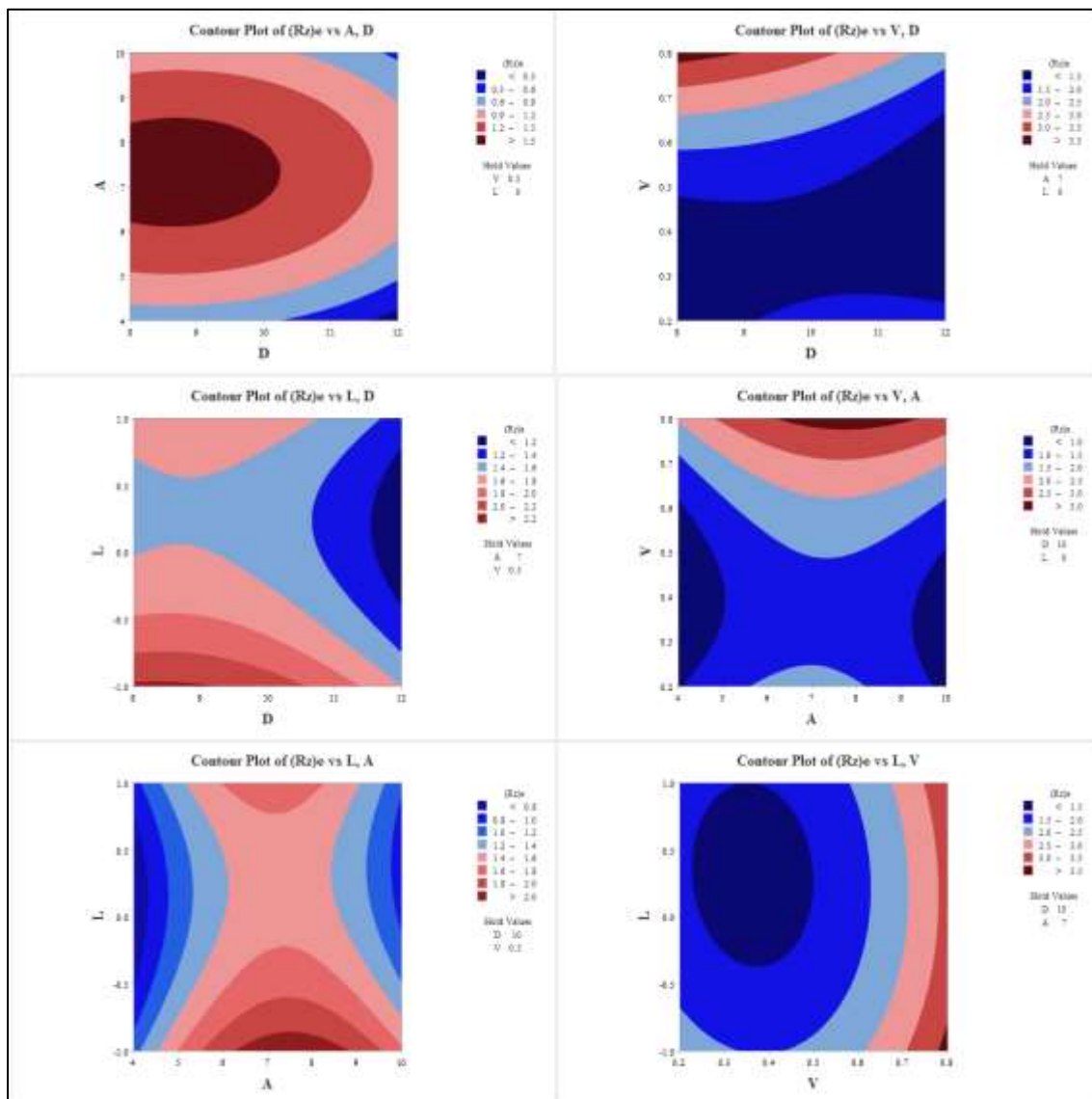
شکل ۵-۱۶. نمودار باقیمانده الف) $(Ra)_e$ ب) $(Rz)_e$ و ج) $(Rq)_e$

۵-۴-۳- نمودارهای دو بعدی منحنی تراز

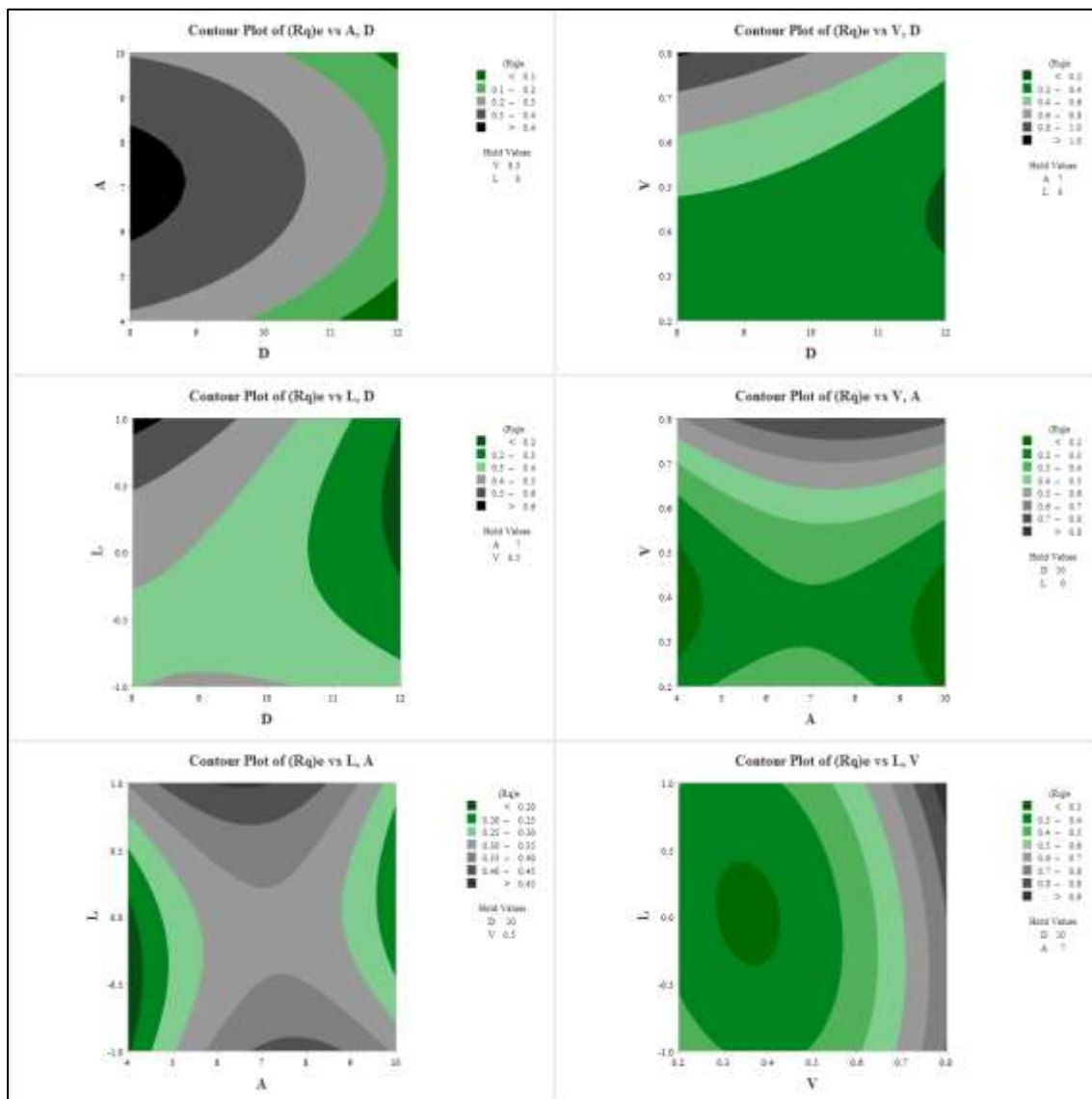
(مطابق شکل‌های دو بعدی ۵-۱۷ الی ۵-۱۹)، با توجه به حداقل‌سازی پارامترهای زبری سطوح خارجی به ترتیب: (شکل ۵-۱۷) سطوح با رنگ مشکی به عنوان پاسخ $(Ra)_e$ ، (شکل ۵-۱۸) سطوح با رنگ آبی به عنوان پاسخ $(Rz)_e$ و (شکل ۵-۱۹) سطوح با رنگ سبز به عنوان پاسخ $(Rq)_e$ می‌باشند. همچنین نمودار سه بعدی حداقل پارامترهای زبری سطوح خارجی در پیوست ج قابل مشاهده است.



شکل ۵-۱۷. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Ra)_e$ به صورت دو بعدی



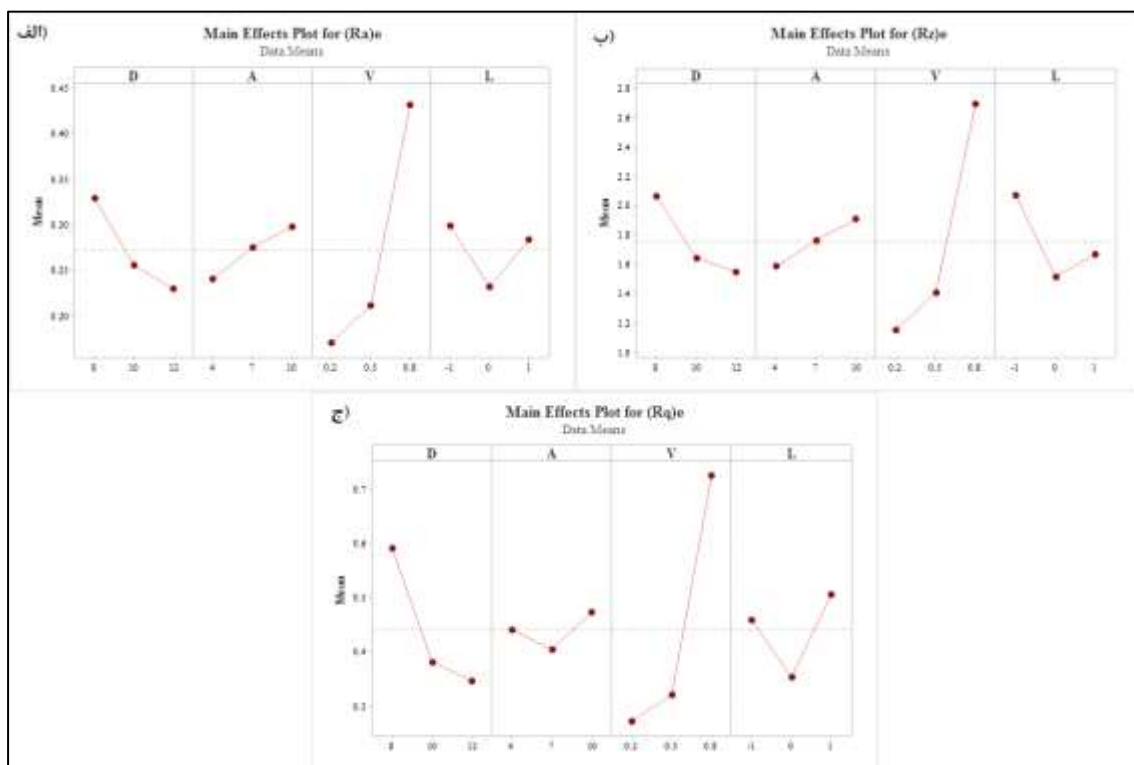
شکل ۵-۱۸. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rz)e$ به صورت دو بعدی



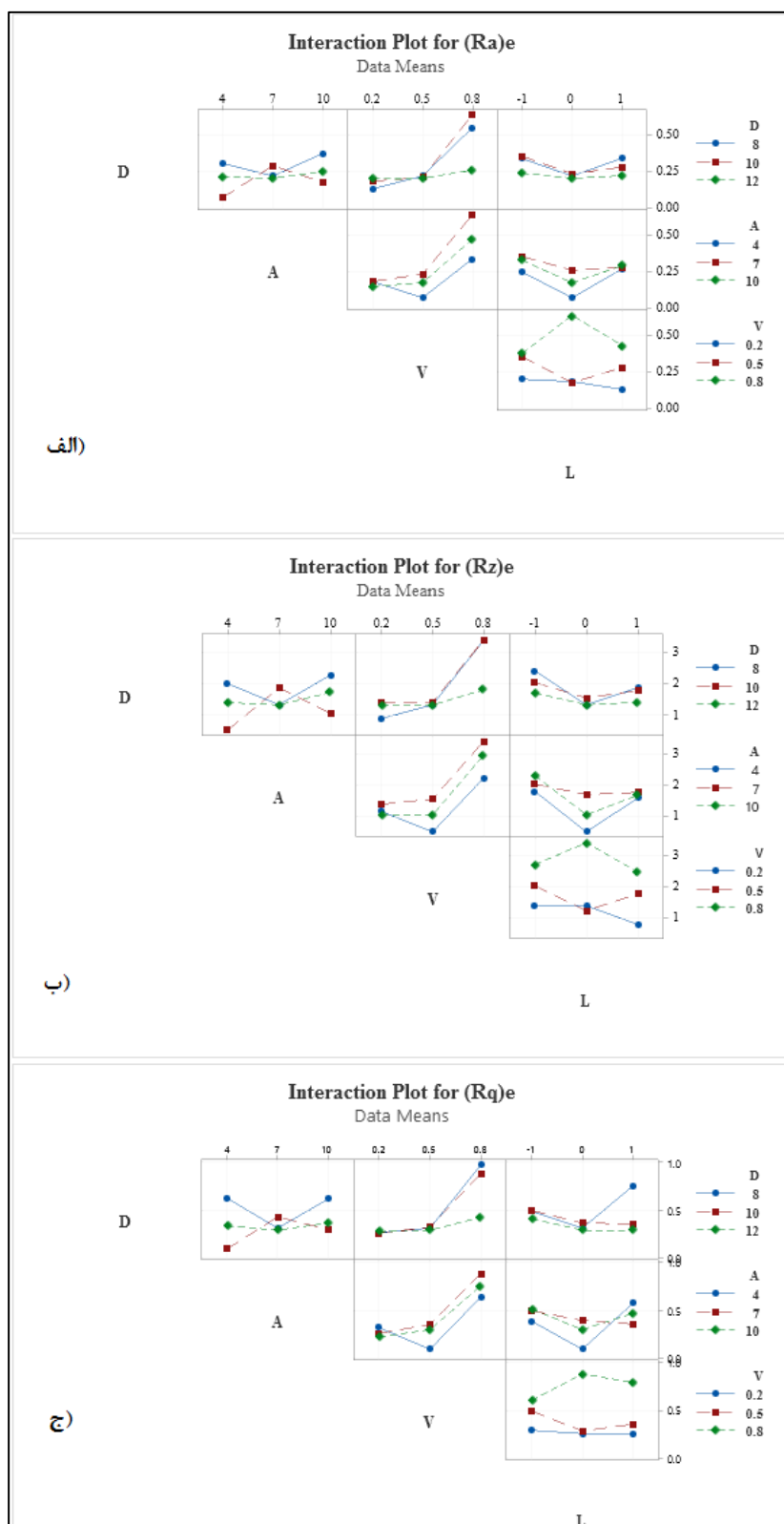
شکل ۵-۱۹. بررسی اثرات متغیرهای ورودی بر $(Rq)e$ به صورت دو بعدی

۵-۴-۴- نمودار اثرات خطی و متقابل داده‌ها

(شکل ۵-۲۰) اثرات خطی متغیرهای ورودی بر پارامترهای زبری سطوح خارجی لوله را نشان می‌دهد. با توجه به (شکل ۵-۲۰) متغیرهای گام عمودی ابزار ۰,۲ mm، قطر ابزار ۱۲ mm بیشترین اثر را بر پارامترهای زبری سطوح داخلی $(Ra)_e$ ، $(Rz)_e$ و $(Rq)_e$ دارند. همچنین (شکل ۵-۲۱) تأثیرات تعاملی متغیرهای ورودی بر پارامتر پاسخ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۰. نمودار اثرات خطی متغیرهای ورودی بر الف) $(Ra)_e$ ب) $(Rz)_e$ و ج) $(Rq)_e$



شکل ۵-۲۱. نمودار اثرات متقابل متغیرهای ورودی بر الف) $(Ra)e$ ب) $(Rz)e$ و ج) $(Rq)e$

۵-۵- بهینه‌سازی و صحه‌گذاری^۸

در این پژوهش، از روش مطلوبیت^۹ برای بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند استفاده می‌شود. بنابراین به منظور بهینه‌سازی چند هدفه پاسخ‌ها (حداکثر قطر انتهای لوله و حداقل زبری سطوح داخلی و خارجی لوله) از توابع مطلوبیت به ترتیب معادلات (۵-۱۵) و (۵-۱۶) استفاده شد. همچنین مطلوبیت کلی فرآیند (D) از رابطه‌ی (۵-۱۷) محاسبه می‌شود که برابر با میانگین هندسی توابع مجزای مطلوبیت (d_i) می‌باشد.

$$d = \begin{cases} 0 & Y < L \\ \left(\frac{Y-L}{U-L}\right)^r & L < Y < U \\ 1 & Y > U \end{cases} \quad (۵-۱۵)$$

$$d = \begin{cases} 1 & Y < L \\ \left(\frac{U-Y}{U-L}\right)^r & L < Y < U \\ 0 & Y > U \end{cases} \quad (۵-۱۶)$$

$$D = (d_1 \cdot d_2 \dots d_m)^{1/m} \quad (۵-۱۷)$$

که در رابطه بالا؛ L و U به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار پاسخ Y، r وزن داده‌ها که از ۰٫۱ الی ۱ متغیر است و m معرف تعداد پاسخ‌های خروجی می‌باشند. بنابراین در این پژوهش، بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرآیند SPIF به منظور دستیابی به تنظیمات بهینه آزمایش و در راستای برآوردن

^۸ Optimization and validation

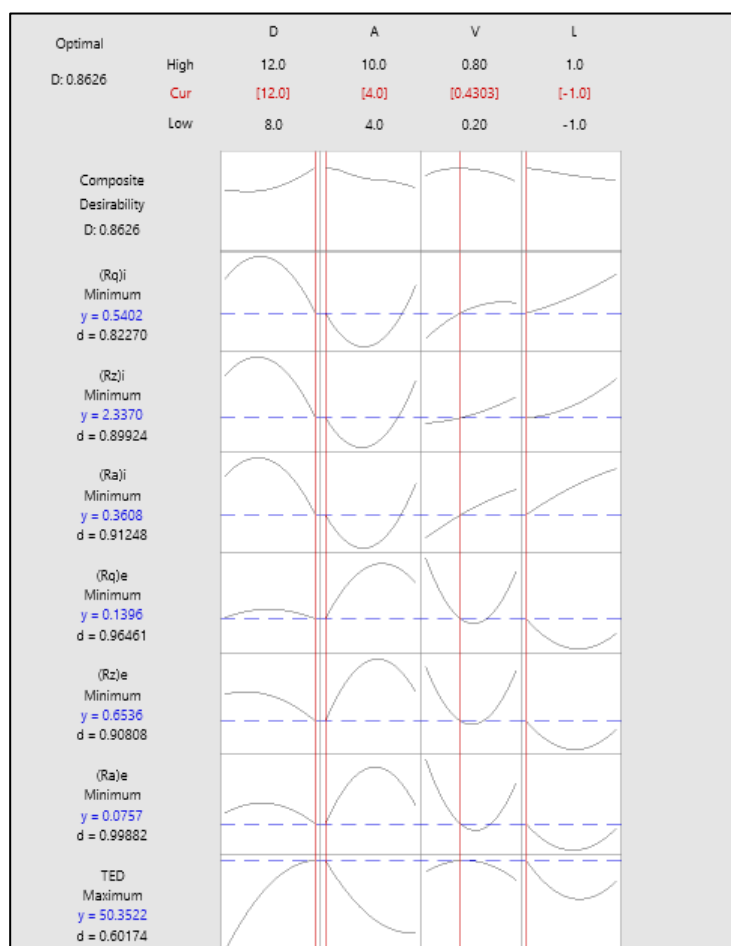
^۹ Desirability method

اهداف توابع مطلوبیت به صورت چندهدفه^{۱۰} و به طور همزمان انجام می‌شود. با توجه به توضیحات فوق، (جدول ۵-۸) تنظیمات اولیه برای بهینه‌سازی متغیرهای ورودی برای دستیابی به حداکثر قطر انتهای لوله و حداقل زبری سطوح داخلی و خارجی را نشان می‌دهد. با توجه به (شکل ۵-۲۲) مقادیر بهینه متغیرهای ورودی برای منبسط‌سازی انتهای لوله فولاد زنگ نزن AISI 304 (مطابق جدول ۵-۹) حاصل شد.

پاسخ‌ها	مقدار هدف	حد پایین	هدف	حد بالا	وزن	درجه اهمیت
(Rq)i	کمینه‌سازی	۰.۳۳۲۷	۱.۵۰۳۳۳	۱	۱	۱
(Rz)i	کمینه‌سازی	۱.۸۵۰۰	۶.۶۸۳۳۳	۱	۱	۱
(Ra)i	کمینه‌سازی	۰.۲۶۱۰	۱.۴۰۱۶۷	۱	۱	۱
(Rq)e	کمینه‌سازی	۰.۰۹۷۰	۱.۳۰۰۳۳	۱	۱	۱
(Rz)e	کمینه‌سازی	۰.۳۵۳۰	۳.۶۲۳۳۳	۱	۱	۱
(Ra)e	کمینه‌سازی	۰.۰۷۵۰	۰.۶۳۹۳۳	۱	۱	۱
TED	بیشینه‌سازی	۴۷.۰۱۸	۵۲.۵۵۹۰	۱	۱	۱

جدول ۵-۸. تنظیمات اولیه بهینه‌سازی

¹⁰ Multi - objective optimization



شکل ۵-۲۲. نمودارهای برشی مربوط به رفتار پارامترهای پاسخ و تابع مطلوبیت کلی در نقطه‌ی بهینه

جدول ۵-۹. مقادیر حاصل از فرآیند بهینه‌سازی

متغیرهای ورودی	قطر ابزار (mm)	گام زاویه‌ای (Degree)	گام عمودی ابزار (mm)	روانکار
مقادیر بهینه	۱۲	۴	۰.۴۳۰	روغن

برای صحت‌گذاری ترکیب بهینه متغیرهای ورودی، آزمون تجربی بر اساس مقادیر حاصل از متغیرهای فرآیند بهینه‌سازی (مطابق جدول ۵-۹) انجام شد. پاسخ‌های قطر انتهای لوله و زبری سطوح داخلی و

خارجی حاصل از آزمون تجربی، نسبت به مقادیر بهینه با اختلاف اندک (مطابق جدول ۵-۱۰) حاصل شدند که مطابقت خوبی را با مقادیر حاصل از فرآیند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۰. نتایج حاصل از آزمون صحه‌گذاری

پارامترهای زبری سطوح خارجی لوله			پارامترهای زبری سطوح داخلی لوله			قطرانتهای لوله	پارامترهای پاسخ
(Rq)e	(Rz)e	(Ra)e	(Rq)i	(Rz)i	(Ra)i	TED (mm)	
(μm)							
۰,۱۳۹	۰,۶۵۳	۰,۰۷۵	۰,۵۴	۲,۳۳۷	۰,۳۶۰	۵۰,۳۵۲	مقادیر حاصل از پاسخ بهینه‌سازی
۰,۱۴۱	۰,۶۶۰	۰,۰۷۴	۰,۵۵۲	۲,۳۸۴	۰,۳۶۹	۵۰,۸۳۱	مقادیر حاصل از پاسخ صحه‌گذاری
۱,۴۳	۱,۰۷	۱,۳۳	۲,۲۲	۲,۰۱	۲,۵	۰,۹۵	درصد خطا (%)

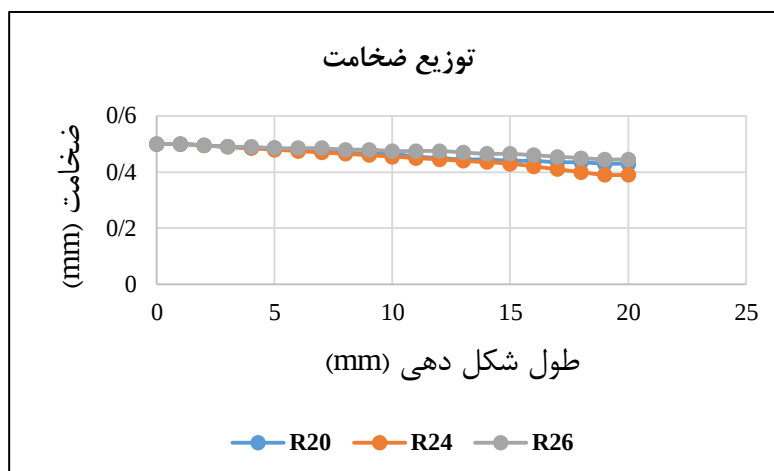
۵-۶- بررسی تغییر ضخامت جداره لوله در بخش انبساطی

(شکل ۵-۲۳)، تصاویری از نمونه‌های برش خورده به همراه چگونگی تغییرات ضخامت آن‌ها در بخش انبساطی انتهای لوله را نشان می‌دهد. با توجه به اختلاف درصد تغییرات قطر انتهای لوله، سه نمونه بر اساس بیشینه و کمینه درصد تغییرات قطر انتهای لوله به ترتیب ($R_{24}=۴.۴۰۵\%$ ، $R_{26}=۱۰.۵۴۲\%$) و به علاوه یک نمونه از سطح میانه ($R_{20}=۷.۹۰۲\%$) (سطح صفر)، مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در (شکل ۵-۲۳) قابل مشاهده می‌باشد با افزایش زاویه شکل‌دهی، بر اثر اعمال حداکثر فشار کششی و جابه‌جایی مواد [۴۵]، در انتهای لوله نازک شدگی رخ می‌دهد. با توجه به نتایج تحلیل پارامتر قطر انتهای لوله، با افزایش قطر ابزار (۱۲ میلی‌متر) و کاهش گام عمودی ابزار (۰,۲ mm) قطر انتهای لوله بیشتری حاصل می‌شود. از این رو می‌توان اظهار داشت با افزایش قطر انتهای لوله، درصد تغییرات قطر انتهای لوله کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان نازک شدگی بیشتری در انتهای لوله ایجاد می‌شود و

برعکس (شکل ۵-۲۳-ب). علاوه بر این، برگشت فنری بالای لوله، تأثیر مهمی بر افزایش میزان درصد تغییر قطر انتهای لوله دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۵-۲۳. بررسی توزیع ضخامت الف) نمونه‌های برش خورده ب) تغییرات ضخامت در جداره لوله منبسط شده

۵-۷- بررسی گام عمودی بر صافی سطح لوله منبسط شده

کیفیت سطح نمونه شکل‌دهی شده با استفاده از فرآیند SPIF بسیار وابسته به گام عمودی می‌باشد. (شکل ۵-۲۴) به ترتیب گام‌های عمودی ۰٫۲، ۰٫۵، ۰٫۸ و ۱٫۰ mm را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر استریو میکروسکوپ می‌توان دریافت که با افزایش گام عمودی، صافی سطح نمونه کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۲۴. کیفیت سطح با گام عمودی الف (۰,۲ ب) ۰,۵ و ج (۰,۸ mm

فصل ۶

نتیجہ گیری و پیشہ سادہ

۶-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور شکل دهی انبساطی انتهای لوله فولاد زنگ نزن AISI 304 با هندسه مخروطی از فرآیند SPIF استفاده شد. طراحی آزمایش مبتنی بر روش RSM و با بهره گیری از طرح Box-behnken و انتخاب متغیرهای ورودی فرآیند همچون: قطر ابزار، گام زاویه ای، گام عمودی ابزار و روانکار انجام شد. پاسخ های اندازه گیری شده حاصل از آزمون های تجربی که عبارتند از قطر انتهای لوله و پارامترهای زبری سطوح داخلی و خارجی در نرم افزار Minitab19 منطبق بر اصول تحلیل واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در ادامه، فرآیند بهینه سازی بر اساس روش مطلوبیت انجام شد و با استفاده از آزمون صحت گذاری، نتایج آن به تأیید رسید. همچنین نحوه توزیع ضخامت در جداره بخش منبسط شده لوله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می شوند:

- با توجه به نتایج تحلیل واریانس، عبارات موثر بر قطر انتهایی لوله عبارتند از: قطر ابزار، گام عمودی ابزار و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام زاویه ای.
- بر اساس نمودار توزیع نرمال داده ها و پارتو عبارات موثر بر قطر انتهای لوله به ترتیب: گام عمودی ابزار با سهم ۳۶,۲۷٪ به عنوان تأثیرگذارترین عامل، قطر ابزار با سهم ۳۲,۳۸٪ و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام زاویه ای با سهم ۳۱,۳۵٪ حاصل شد.
- با توجه به نتایج تحلیل واریانس عبارات موثر بر پارامترهای زبری سطوح داخلی لوله عبارتند از: قطر ابزار، گام عمودی ابزار و مجذور گام زاویه ای بر $(Ra)_i$ ؛ قطر ابزار، گام عمودی ابزار، روانکار و اثر مجذور گام زاویه ای بر $(Rz)_i$ و قطر ابزار، گام عمودی ابزار، روانکار و اثر مجذور گام زاویه ای و قطر ابزار بر $(Rq)_i$.

- با توجه به نتایج تحلیل واریانس عبارات موثر بر پارامترهای زبری سطوح خارجی لوله عبارتند از: قطر ابزار، گام عمودی ابزار و مجذور گام زاویه‌ای و گام عمودی و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی بر $(Ra)_e$ ؛ قطر ابزار، گام عمودی ابزار و مجذور گام زاویه‌ای و گام عمودی و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی بر $(Rz)_e$ و قطر ابزار، گام عمودی ابزار و مجذور گام عمودی و اثر تعاملی حاصل ضرب قطر ابزار در گام عمودی و قطر ابزار در روانکار بر $(Rq)_e$.
- بر اساس تجزیه و تحلیل عبارات موثر بر پارامترهای زبری سطح، متغیر گام عمودی ابزار با بیشترین درصد سهم به عنوان موثرترین عامل شناخته شد.
- ترکیب بهینه متغیرهای ورودی جهت دستیابی به حداکثر قطر انتهای لوله و حداقل زبری سطوح داخلی و خارجی با مطلوبیت برابر (۰,۸۶۲۶) به صورت زیر تعیین شد: قطر ابزار mm ۱۲، گام زاویه‌ای 40° ، گام عمودی ابزار mm ۰,۴۳ و روانکار روغن.
- نتایج حاصل از فرآیند بهینه‌سازی و آزمون صحه‌گذاری نشان داد که مطابقت خوبی میان مقادیر پارامترهای پاسخ وجود دارد. لذا روند بهینه‌سازی توانست به‌طور موفقیت‌آمیزی هدف از پیش تعیین شده را محقق کند.
- نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که گام عمودی ابزار بیشترین تأثیر را بر حداقل زبری سطح و حداکثر قطر انتهای لوله دارد. همچنین در گام‌های عمودی کوچک به دلیل جابه‌جایی پیوسته مواد صافی سطح بهتر و قطر بزرگتری از انتهای منبسط شده حاصل می‌شود.

- با بررسی توزیع ضخامت در بخش انبساطی لوله نشان داد که، با افزایش قطر انتهای لوله، درصد تغییرات قطر انتهای لوله کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان نازک شدگی بیشتری در انتهای لوله ایجاد خواهد شد.

۶-۲- پیشنهادها

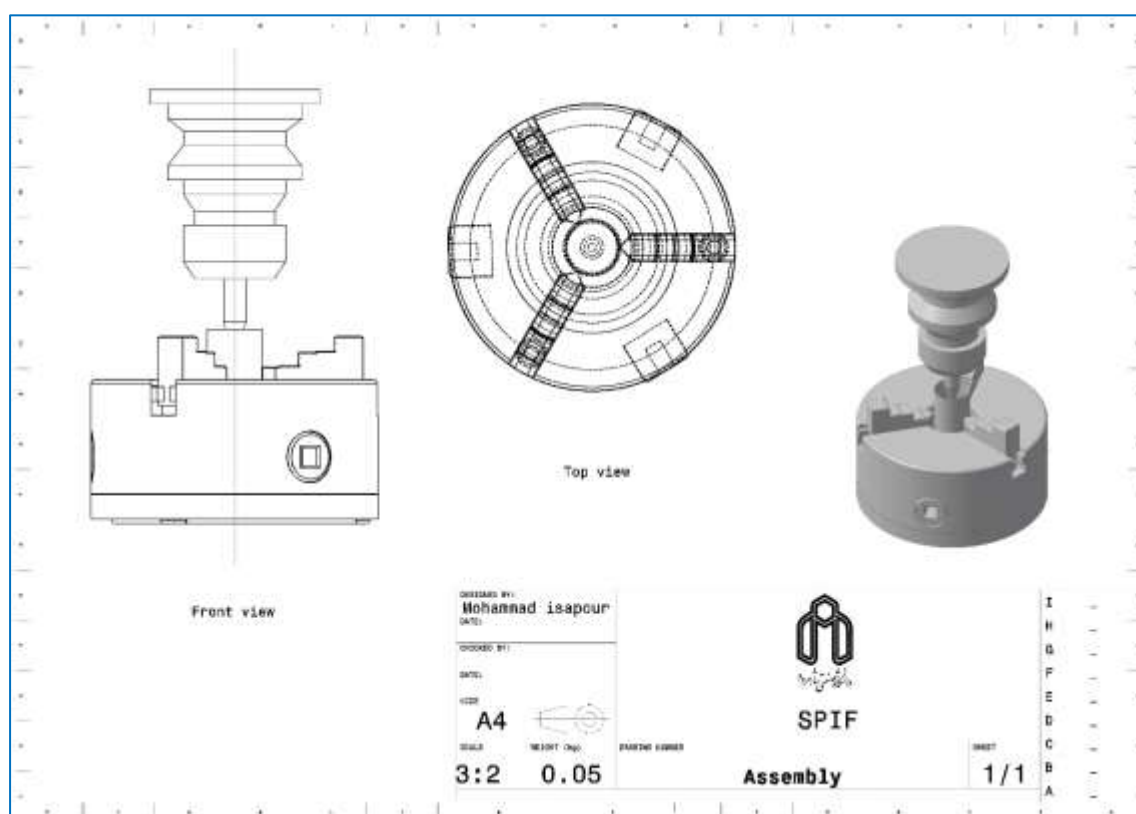
بر اساس تحقیقات انجام شده و نتایج مستخرج در پژوهش پیش رو، پیشنهادهای زیر به منظور تداوم مسیر پژوهشی ارائه می‌شوند:

- تحلیل تجربی پژوهش پیش رو با به کارگیری روش‌های متفاوت و نوین آماری و عصبی و مقایسه نتایج حاصل از آنها.
- اجرای فرآیند شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله به صورت گرم و یا داغ و مطالعه تأثیر متغیر دما بر پارامترهای پاسخ.
- مطالعه و بررسی سایر متغیرهای ورودی فرآیند شکل‌دهی تدریجی همچون: هندسه ابزار، ضخامت اولیه لوله، نرخ پیشروی ابزار و سرعت دورانی ابزار شکل‌دهی.
- شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی انبساطی انتهای لوله در نرم افزارهای تحلیل المان محدود و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی.

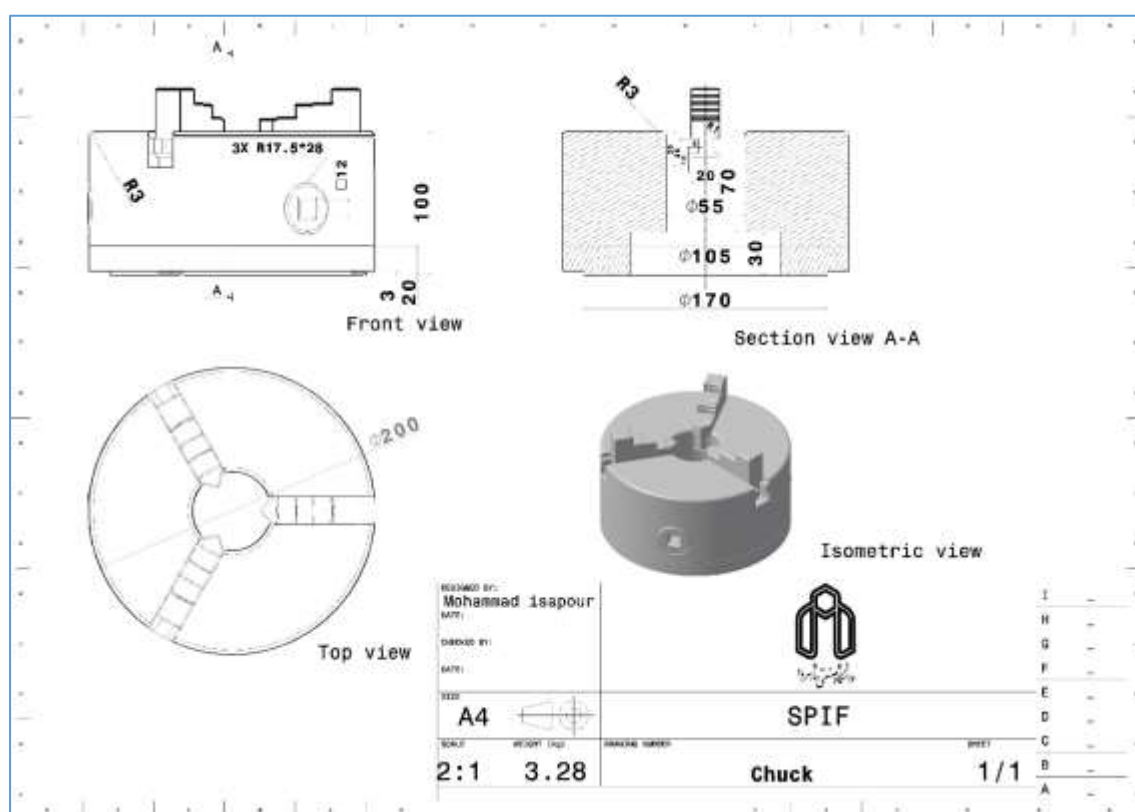
پوست

پوست الف: نقشه‌های مهندسی میکسر و ابزار

■ مونتاژ اجزای فرآیند:

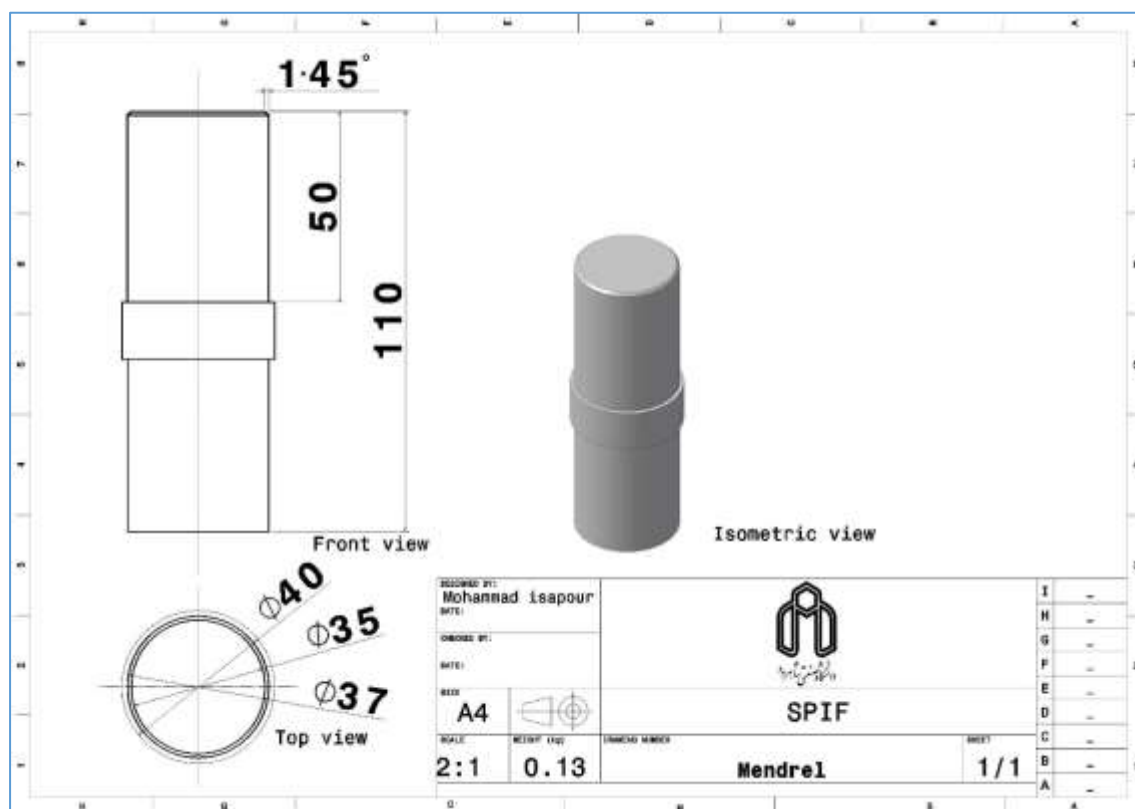


■ مجموعه سه نظام:

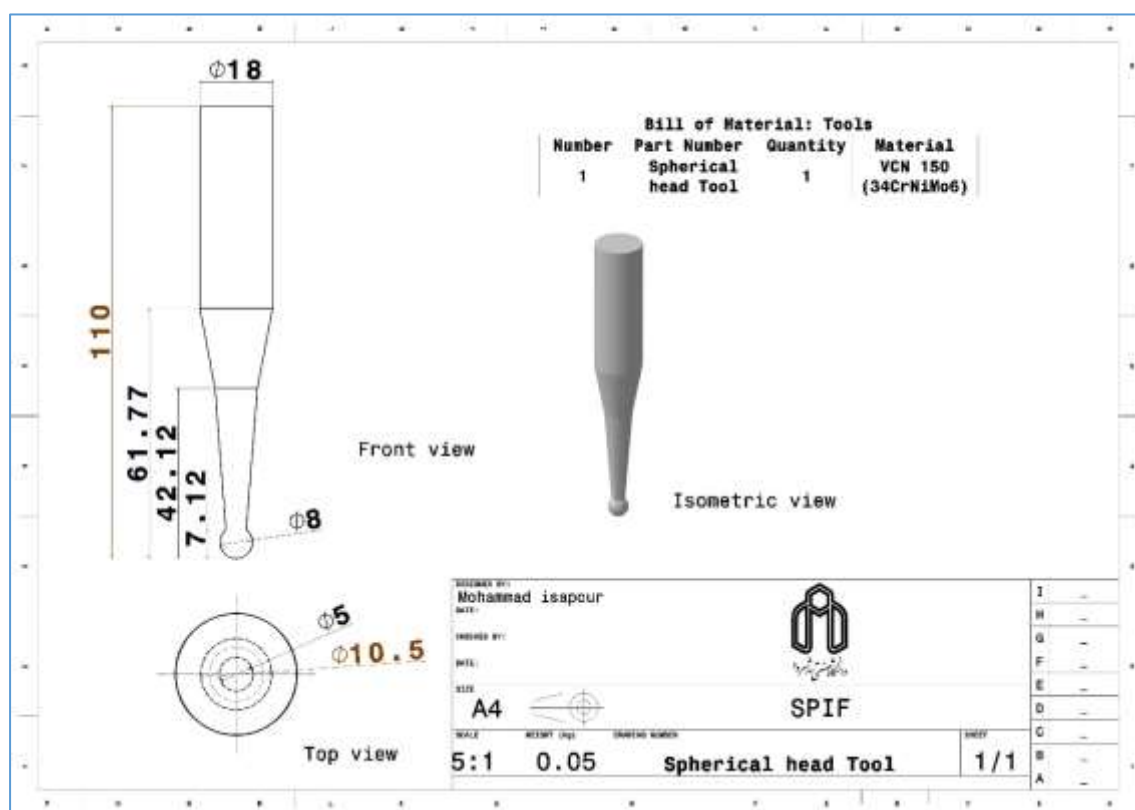




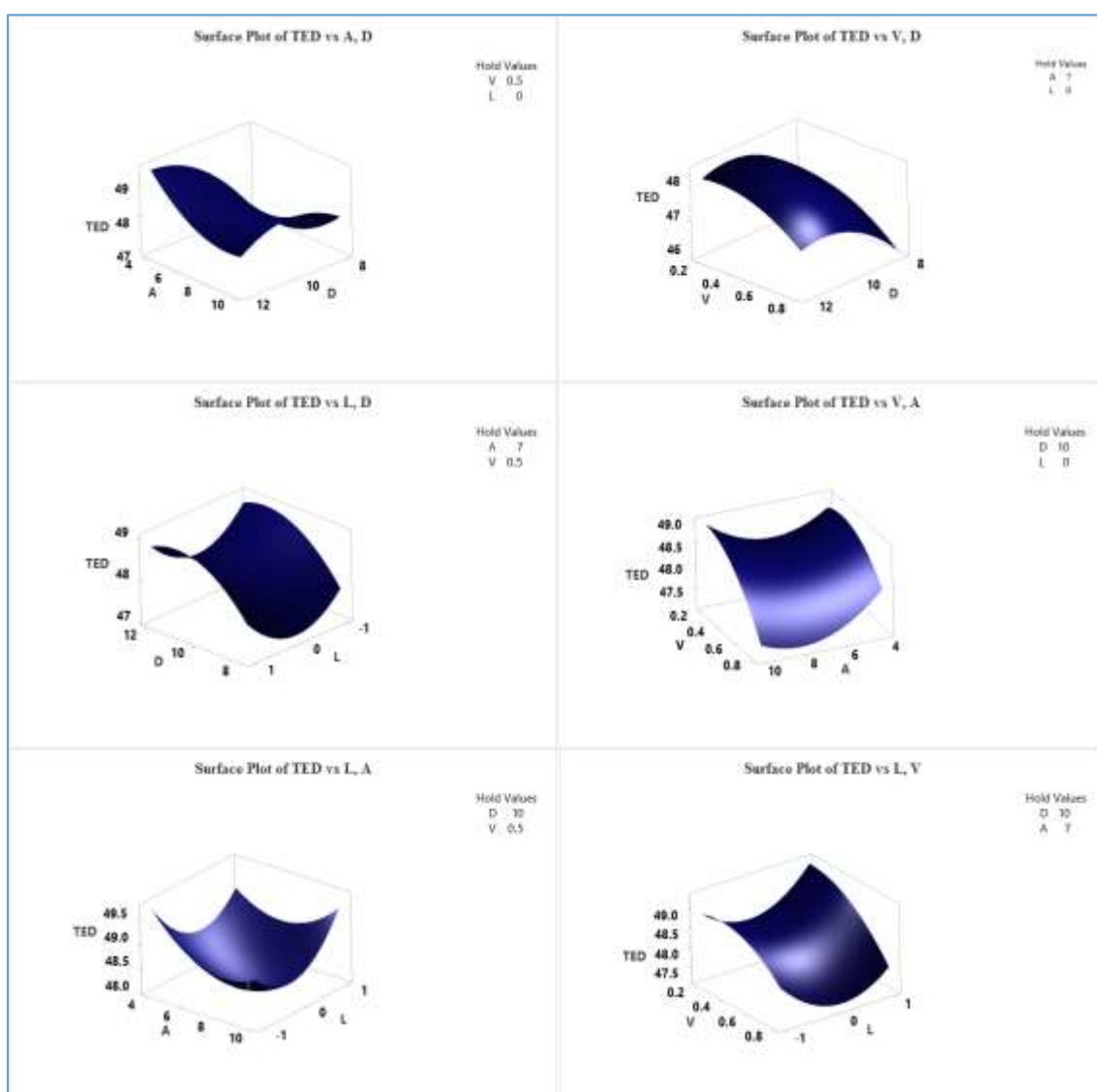
■ مندرل:



■ نمونه ابزار سرکروی با قطر ۸mm:

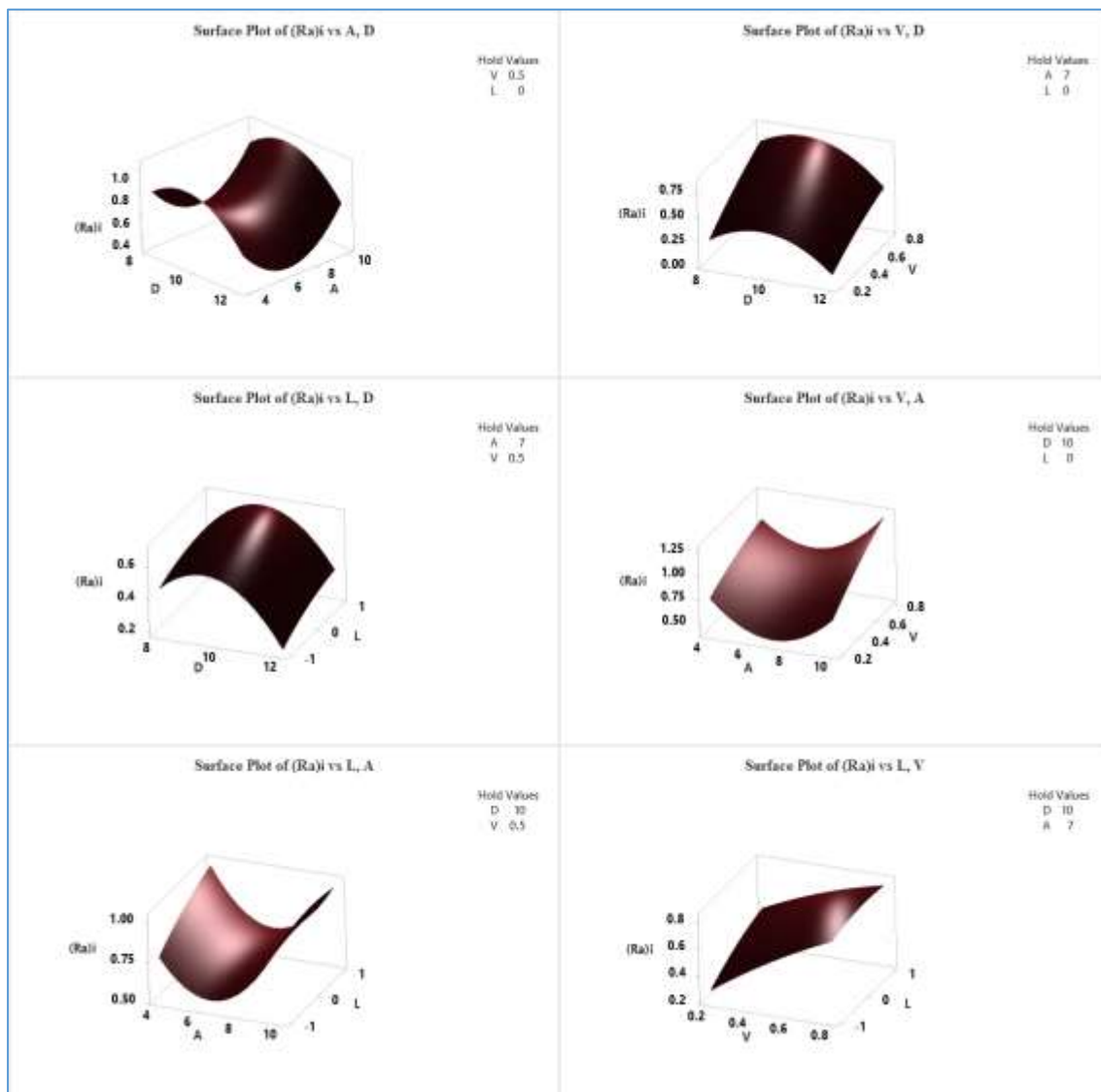


پیوست ب: نمودارهای سه بعدی منحنی سطح پاسخ (TED)

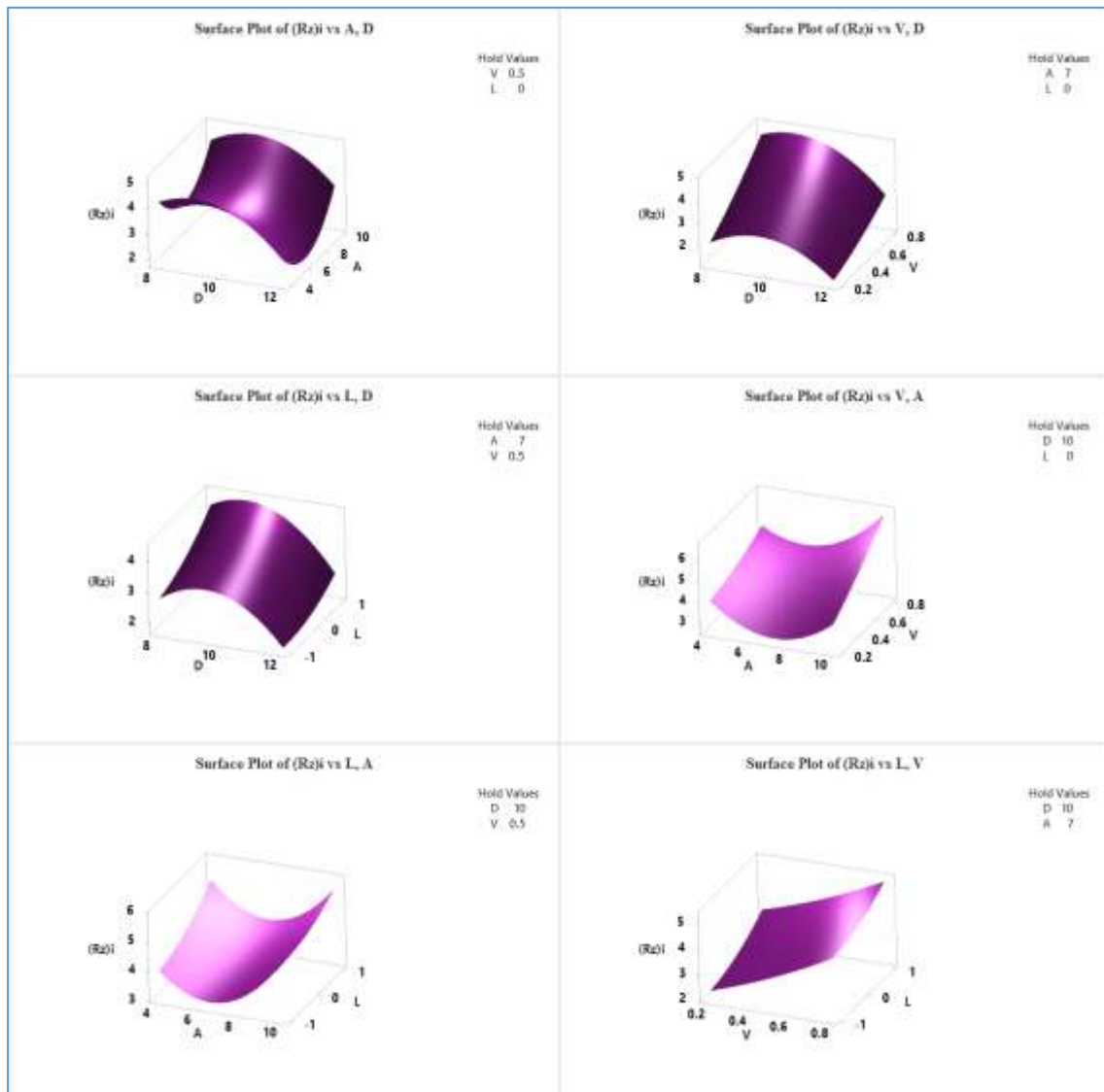


پیوست ج: نمودارهای سه بعدی منحنی سطح پاسخ زبری سطوح داخلی و خارجی لوله

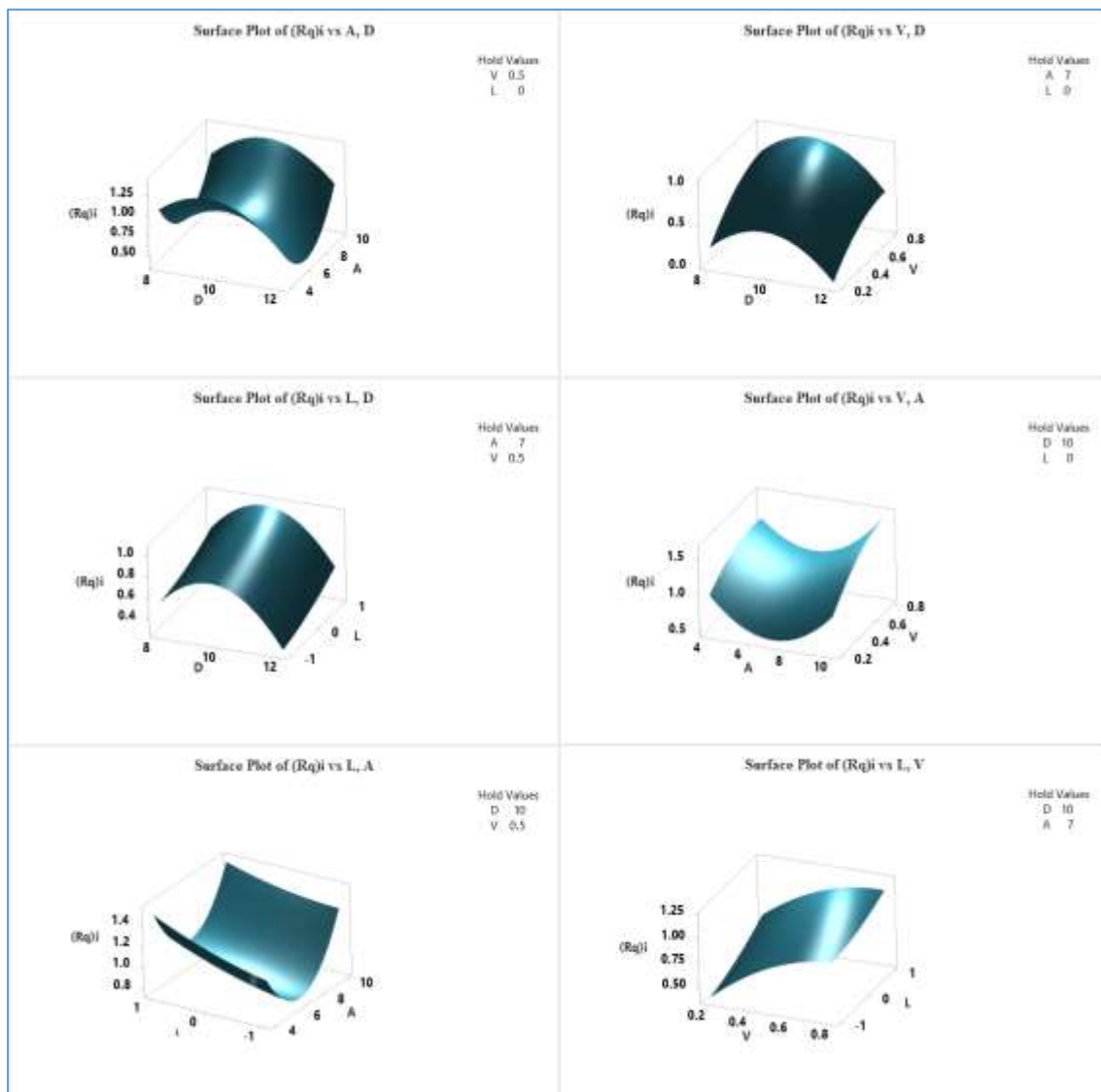
▪ (Ra)_i:



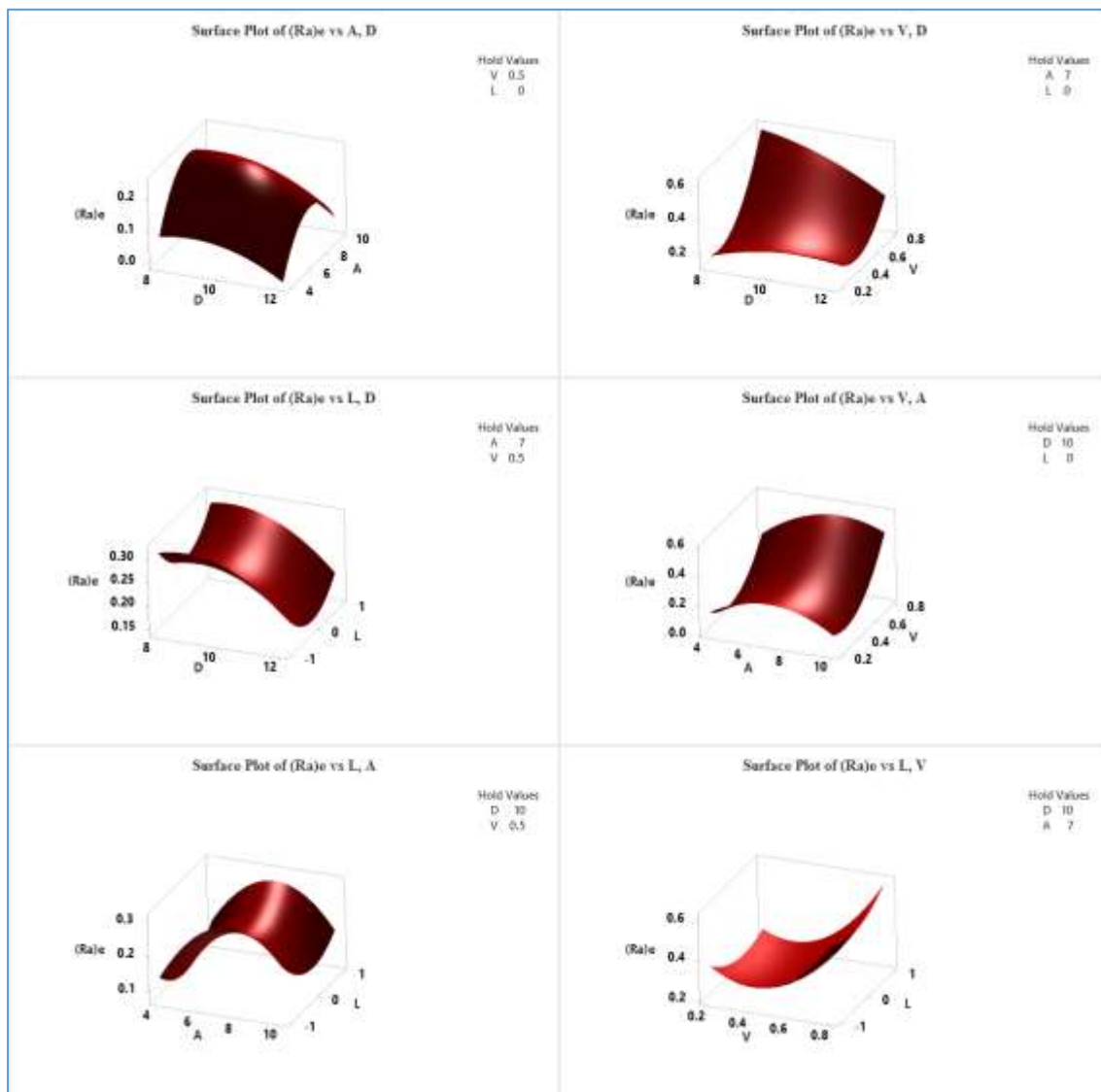
■ (Rz)_i:



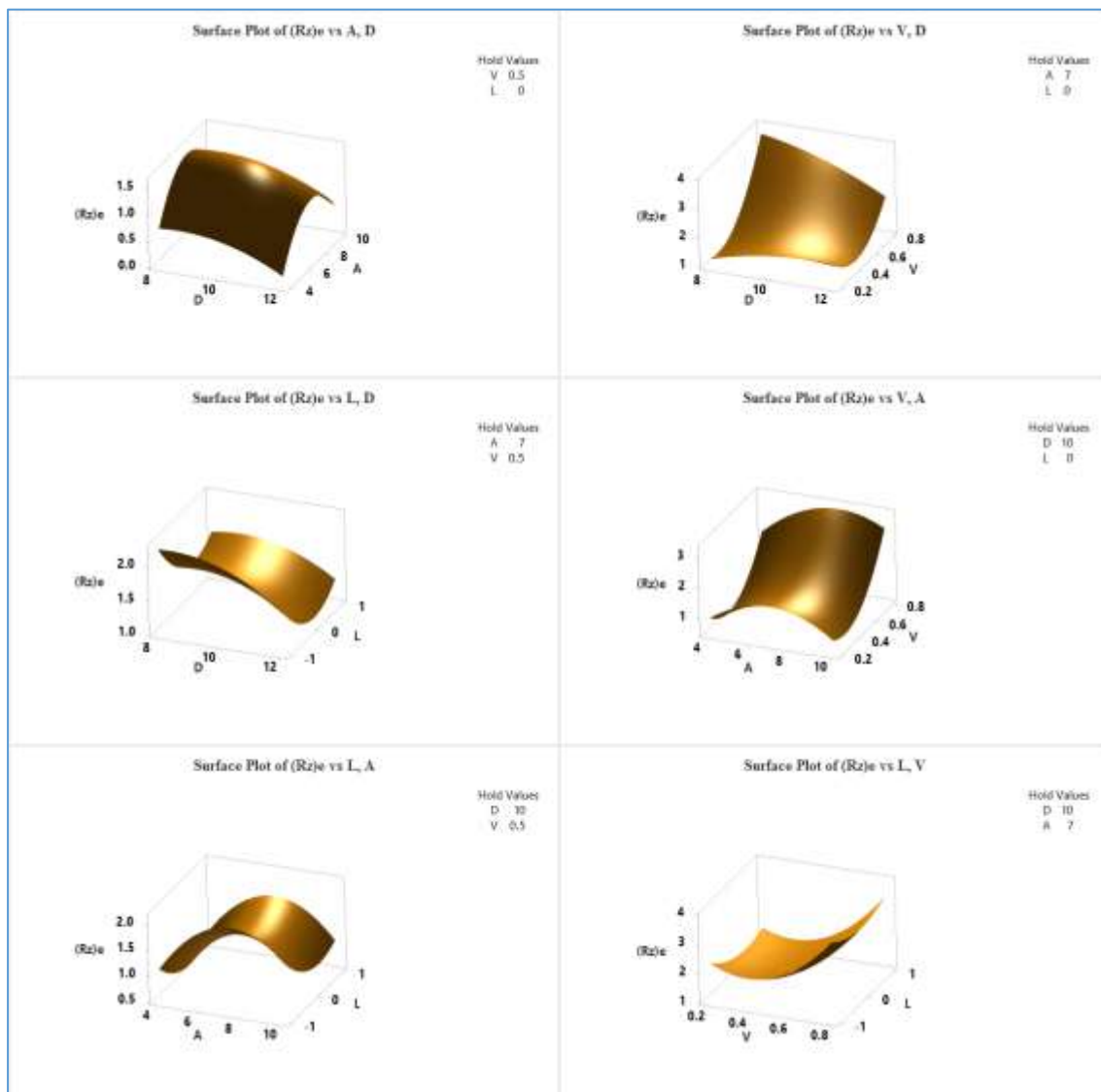
■ $(R_q)_i$:



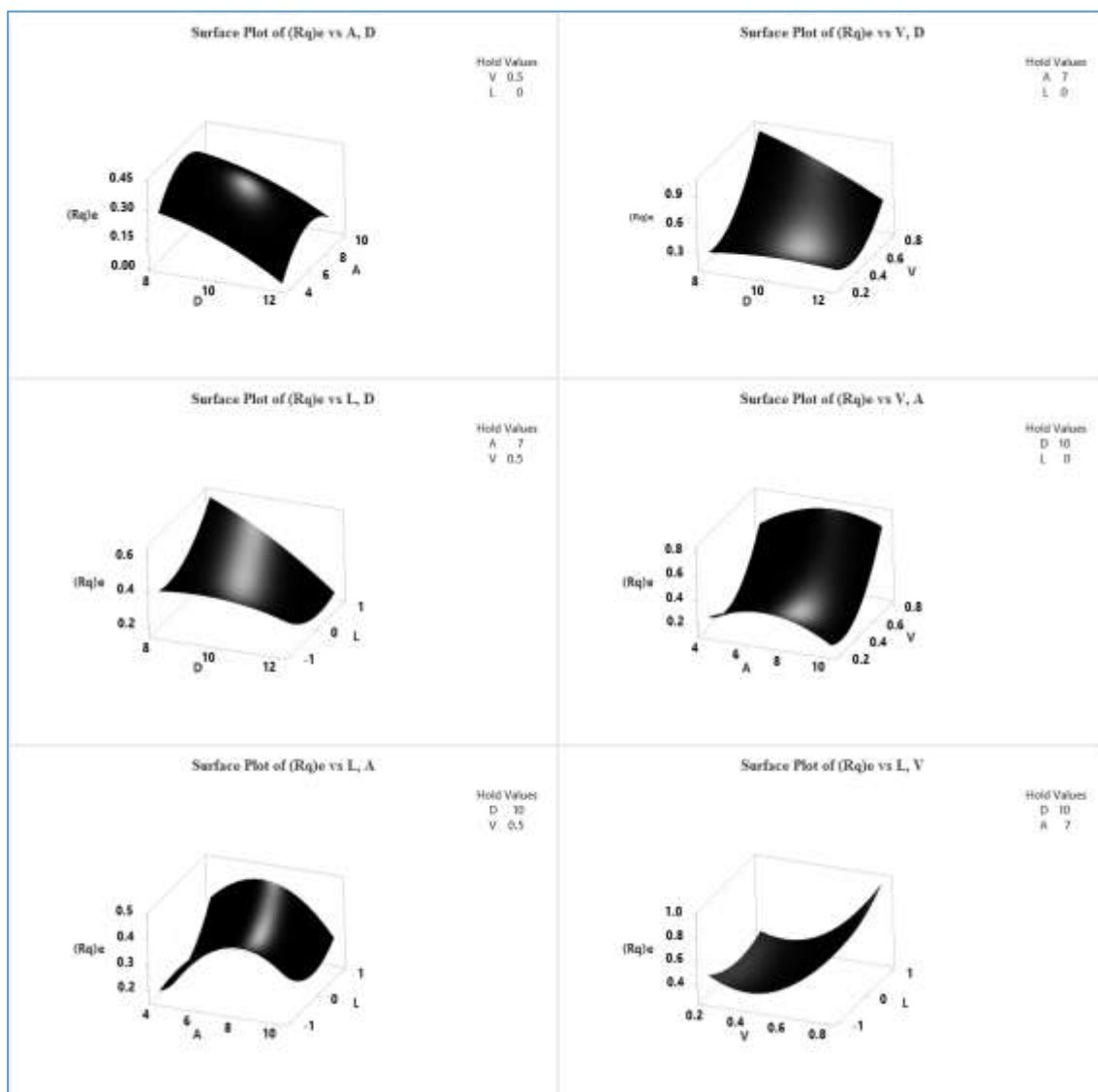
■ $e(Ra):$

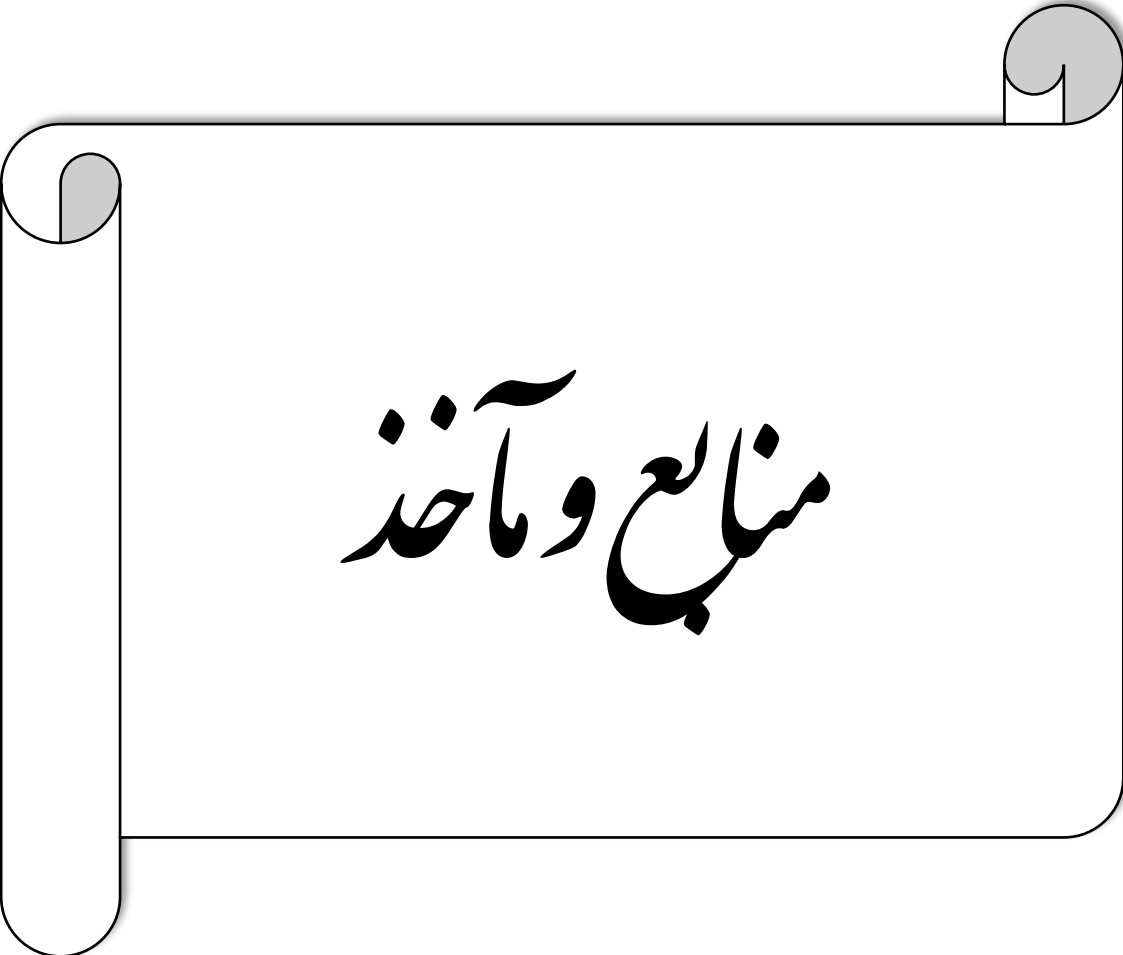


■ $(R_z)_e$:



■ $(R_q)e$:





منابع و مأخذ

-
- [1] S. H. Pawar, S. D. Kore, and A. Nandy, "FE analysis of effect of variation in coil length and coil-tube relative positions on establishment of magnetic fields and distribution of velocities in electromagnetic forming of muffler tube," *Procedia Manuf.*, vol. 47, no. 2019, pp. 659–664, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.204.
 - [2] J. P. Magrinho, M. B. Silva, G. Centeno, F. Moedas, C. Vallellano, and P. A. F. Martins, "On the determination of forming limits in thin-walled tubes," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 155, pp. 381–391, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.020.
 - [3] B. K. Roy, Y. P. Korkolis, Y. Arai, W. Araki, T. Iijima, and J. Kouyama, "Experimental and numerical investigation of deformation characteristics during tube spinning," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 110, no. 7–8, pp. 1851–1867, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05864-z.
 - [4] A. Vahdati and M. Vahdati, "Experimental, statistical and simulation study on spring-back behavior in incremental sheet metal forming (ISMF) process," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1315, pp. 607–612, 2010, doi: 10.1063/1.3552514.
 - [5] M. Vahdati, M. Sedighi, and H. Khoshkish, "An analytical model to reduce spring-back in incremental sheet metal forming (ISMF) process," *Adv. Mater. Res.*, vol. 83–86, pp. 1113–1120, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.1113.
 - [6] M. Vahdani, M. J. Mirnia, H. Gorji, and M. Bakhshi-Jooybari, "Experimental Investigation of Formability and Surface Finish into Resistance Single-Point Incremental Forming of Ti–6Al–4V Titanium Alloy Using Taguchi Design," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 72, no. 4, pp. 1031–1041, 2019, doi: 10.1007/s12666-019-01577-4.
 - [7] A. AL-Obaidi, A. Kunke, and V. Kräusel, "Hot single-point incremental forming of glass-fiber-reinforced polymer (PA6GF47) supported by hot air," *J. Manuf. Process.*, vol. 43, no. May, pp. 17–25, 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.036.
 - [8] N. A. Roşca and M. Oleksik, "Simulation of the Single Point Incremental Forming of Polyamide and Polyethylene Sheets," *MATEC Web Conf.*, vol. 290, p. 03014, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201929003014.
 - [9] B. T. H. T. Baharudin, Q. M. Azpen, S. Sulaima, and F. Mustapha, "Experimental Investigation of Forming Forces in Frictional Stir Incremental Forming of Aluminum Alloy AA6061-T6," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 11, p. 484, Nov. 2017, doi: 10.3390/met7110484.
 - [10] C. V. Ajay, C. Boopathi, and P. Kavin, "Incremental sheet metal forming (ISMF): A literature review," *Int. Conf. Mater. Manuf. Mach. 2019*, vol. 2128, no. July, p. 030012, 2019, doi: 10.1063/1.5117955.
 - [11] J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, and J. Allwood, "Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal," *CIRP Ann.*, vol. 54, no. 2, pp. 88–114, 2005, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60021-3.
 - [12] A. K. Behera, B. Lu, and H. Ou, "Characterization of shape and dimensional accuracy of incrementally formed titanium sheet parts with intermediate curvatures between two feature types," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 5–8, pp. 1099–1111, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7649-2.
 - [13] C. Brecher, (2015), "Advances in Production Technology," *Springer International Publishing, Cham*, London, pp. 123-125, doi: 10.1007/978-3-319-12304-2
 - [14] G. Ambrogio, L. De Napoli, L. Filice, F. Gagliardi, and M. Muzzupappa, "Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing," *J.*

- Mater. Process. Technol.*, vol. 162–163, no. SPEC. ISS., pp. 156–162, 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.148.
- [15] V. A. Cristino, J. P. Magrinho, G. Centeno, M. B. Silva, and P. A. F. Martins, “Theory of single point incremental forming of tubes,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 287, 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116659.
- [16] J. M. Allwood and H. Utsunomiya, “A survey of flexible forming processes in Japan,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 15, pp. 1939–1960, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.034.
- [17] K. Jackson and J. Allwood, “The mechanics of incremental sheet forming,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 3, pp. 1158–1174, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025.
- [18] T. Wen, C. Yang, S. Zhang, and L. Liu, “Characterization of deformation behavior of thin-walled tubes during incremental forming: a study with selected examples,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 78, no. 9–12, pp. 1769–1780, 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6777-4.
- [19] Y. M. Huang and Y. M. Huang, “Influence of punch radius and angle on the outward curling process of tubes,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 19, no. 8, pp. 587–596, 2002, doi: 10.1007/s001700200064.
- [20] Y. H. Lu, “Study of tube flaring ratio and strain rate in the tube flaring process,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 40, no. 3, pp. 305–318, 2004, doi: 10.1016/S0168-874X(03)00049-0.
- [21] T. A. N. C. Joo and M. H. Dordkeshan, “EXPERIMENTAL STUDY ON TUBE END FLARING PROCESS FOR,” no. 7, pp. 39–43, 2017.
- [22] www.flareseal.com.
- [23] M. C. Radu and I. Cristea, “Processing metal sheets by SPIF and analysis of parts quality,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 3, pp. 287–293, 2013, doi: 10.1080/10426914.2012.746702.
- [24] Z. Liu, S. Liu, Y. Li, and P. A. Meehan, “Modeling and optimization of surface roughness in incremental sheet forming using a multi-objective function,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 29, no. 7, pp. 808–818, 2014, doi: 10.1080/10426914.2013.864405.
- [25] M. Vahdati, R. A. Mahdavinnejad, S. Amini, and M. Moradi, “Statistical Analysis and Optimization of Factors Affecting the Surface Roughness in the UVaSPIF Process Using Response Surface Methodology,” *J. Adv. Mater. Process.*, vol. 3, no. 1, pp. 15–28, 2015.
- [26] A. Henia, B. Riadh, and B. S. Hedi, “Multiobjective Optimization Problem of Dieless Incremental Forming,” vol. 653, pp. 1078–1083, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.651-653.1078.
- [27] H. Khalatbari, A. Iqbal, X. Shi, L. Gao, G. Hussain, and M. Hashemipour, “High-Speed Incremental Forming Process: A Trade-Off between Formability and Time Efficiency,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 30, no. 11, pp. 1354–1363, 2015, doi: 10.1080/10426914.2015.1037892.
- [28] B. T. H. T. Baharudin, Q. M. Azpen, S. Sulaima, and F. Mustapha, “Experimental investigation of forming forces in frictional stir incremental forming of aluminum alloy AA6061-T6,” *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 11, pp. 10–12, 2017, doi: 10.3390/met7110484.
- [29] M. Honarpisheh, M. Mohammadi Jobedar, and I. Alinaghian, “Multi-response optimization on single-point incremental forming of hyperbolic shape Al-1050/Cu bimetal using response surface methodology,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 96, no.

- 9–12, pp. 3069–3080, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1812-5.
- [30] H. Mostafanezhad, H. G. Menghari, S. Esmaceli, and E. M. Shirkharkolaee, “Optimization of two-point incremental forming process of AA1050 through response surface methodology,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 127, pp. 21–28, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.042.
- [31] M. Vahdani, M. J. Mirnia, M. Bakhshi-Jooybari, and H. Gorji, “Electric hot incremental sheet forming of Ti-6Al-4V titanium, AA6061 aluminum, and DC01 steel sheets,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 103, no. 1–4, pp. 1199–1209, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03624-2.
- [32] A. Kumar and V. Gulati, “Experimental investigation and optimization of surface roughness in negative incremental forming,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 131, no. August, pp. 419–430, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.08.078.
- [33] R. B. Azhiri, F. Rahimidehghan, F. Javidpour, R. M. Tekiyeh, S. M. Moussavifard, and A. S. Bideskan, “Optimization of Single Point Incremental Forming Process Using Ball Nose Tool,” *Exp. Tech.*, vol. 44, no. 1, pp. 75–84, 2020, doi: 10.1007/s40799-019-00338-8.
- [34] M. Oraon, S. Mandal, and V. Sharma, “Investigation into the process parameter of single point incremental forming (SPIF),” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 2–5, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.922.
- [35] A. Kumar and V. Gulati, “Optimization and investigation of process parameters in single point incremental forming,” *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 246–255, 2020.
- [36] P. Ganesh, A. Visagan, N. Ethiraj, M. Prabhakar, and S. Sendilvelan, “Optimization of pyramid shaped single point incremental forming of AA5052 alloy sheet,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.573.
- [37] M. H. Shojaeefard, A. Khalkhali, and S. Shahbaz, “Sensitivity analysis and optimization of the surface roughness in the incremental forming of mild steel sheets,” *Sci. Iran.*, vol. 28, no. 1, pp. 316–325, 2021, doi: 10.24200/SCI.2020.53513.3274.
- [38] “Matsubara S., 1994 . Incremental nosing of a circular tube with a hemispherical head tool. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity 35 : 256 - 261,” p. 1994, 1994.
- [39] C. Yang, T. Wen, L. T. Liu, S. Zhang, and H. Wang, “Dieless incremental hole-flanging of thin-walled tube for producing branched tubing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 11, pp. 2461–2467, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.027.
- [40] J. Raujol-Veillé, F. Toussaint, L. Tabourot, M. Vautrot, and P. Balland, “Experimental and numerical investigation of a short, thin-walled steel tube incremental forming process,” *J. Manuf. Process.*, vol. 19, pp. 59–66, 2015, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.03.008.
- [41] G. HUSSAIN, H. VALAEI, K. A. Al-GHAMDI, and B. KHAN, “Finite element and experimental analyses of cylindrical hole flanging in incremental forming,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 26, no. 9, pp. 2419–2425, 2016, doi: 10.1016/S1003-6326(16)64362-5.
- [42] T. Wen, X. Chen, J. Zheng, J. Qing, and Z. xu Tang, “Multi-directional incremental sheet forming—a novel methodology for flexibly producing thin-walled parts,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 5–8, pp. 1909–1919, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9923-3.
- [43] S. Hashemi Ghiri and F. Rahmani, “Experimental Investigation of Effective Parameters

- on a New Incremental Tube Bulging Method Using Rotary Tool,” *ADMT J.*, vol. 10, no. 2, pp. 83–91, 2017.
- [44] T. Wen, J. Zheng, J. Qing, and J. Z. Fang, “Outwards and inwards crimping of tube ends by single-point incremental forming,” *Procedia Eng.*, vol. 207, pp. 854–859, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.841.
- [45] H. Movahedinia, M. J. Mirnia, M. Elyasi, and H. Baseri, “An investigation on flaring process of thin-walled tubes using multistage single point incremental forming,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1–4, pp. 867–880, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0971-0.
- [46] F. RAHMANI, S. M. H. SEYEDKASHI, and S. J. HASHEMI, “Converting circular tubes into square cross-sectional parts using incremental forming process,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 29, no. 11, pp. 2351–2361, 2019, doi: 10.1016/S1003-6326(19)65141-1.
- [47] F. Rahmani, S. M. H. Seyedkashi, and S. J. Hashemi, “Experimental study on warm incremental tube forming of aa6063 aluminum tubes,” *Int. J. Eng. Trans. C Asp.*, vol. 33, no. 9, pp. 1773–1779, 2020, doi: 10.5829/ije.2020.33.09c.11.
- [48] S. M. H. Seyedkashi, F. Rahmani, and S. J. Hashemi, “Numerical and Experimental Investigation of Forming Limit Diagram in Warm Incremental Forming Process of Aluminum Tubes,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20, no. June, pp. 1635–1645, 2020.
- [49] Xia. Chen, Tong. Wen, Jian. Qin, Jin. Hu, Meng. Zhang, Zhi-sun. Zhang, “Deformation Feature of Sheet Metals During Inclined Hole-Flanging by Two-Point Incremental Forming,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 21, pp. 169–176, 2020, doi: /article/10.1007/s12541-019-00296-6.
- [50] V. A. Cristino, J. P. Magrinho, G. Centeno, M. B. Silva, and P. A. F. Martins, “Theory of single point incremental forming of tubes,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 287, no. February, p. 116659, 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116659.
- [51] F. Aghabeyki, M. J. Mirnia, and M. Elyasi, “Cold and warm flaring of thin-walled titanium tube using single-point incremental forming,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 114, no. 11–12, pp. 3357–3376, Jun. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07135-x.
- [52] <https://www.minitab.com/en-us/>.
- [53] Atlas Steel, “Stainless steel - Grade 304 (UNS S30400),” vol. 304. pp. 1–12, 2018, [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=965>.
- [54] <https://www.3ds.com/products-services/catia/>.
- [55] <https://www.cimco.com/>.
- [56] <https://www.machine-dro.co.uk/baty-r14-horizontal-profile-projector-with-gmr-inspection-digital-readout>.
- [57] B. M. Adams, *Design and Analysis of Experiments, Sixth Edition*, vol. 37, no. 2. 2005.
- [58] Tokyo Seimitsu, “Explanation of Surface Characteristics Standards Definition of Surface texture and Stylus instrument,” *Surf. Texture Contour Meas. Instruments*, pp. 230–237, 2015, [Online]. Available: http://www.inspectionengineering.com/Surface_Finish.htm.

Abstract

The end flaring of thin-walled tubes using single point incremental forming (SPIF) has the great importance in industries such as: aerospace, automotive and shipbuilding. This process, has been considered by researchers due to its high flexibility, no need to mold manufacturing and its application in the field of rapid prototyping. Since there has not been much research on the quality of the products made by this process, in this research, the experimental study and statistical analysis of variables affecting the dimensional accuracy and surface roughness of the formed samples were considered. Design of experiments was conducted based on the response surface methodology (RSM). Then, based on the experimental tests, the effect of input variables of SPIF process such as: tool diameter, vertical step size, angular step and lubricant type on the tube end diameter (TED) and roughness of internal and external surfaces of the stainless steel tube (AISI 304) was investigated. The measured output responses were statistically analyzed in Minitab software. The ANOVA results showed that the variables of tool diameter, vertical step size and the interactive effect of multiplication of tool diameter in the angular step have the most significant effect on the tube end diameter. In the following, the linear, quadratic and interactive effects of input variables on the roughness of internal and external surfaces of the tube end were extracted. Multi-objective optimization of responses was done using the desirability function. The optimum values of tool diameter, angular step, and vertical step size were determined to be 12 mm, 4 deg, and 0.43 mm, respectively, with the lubricant type be oil in order to achieve the maximum of TED and the minimum of surface roughness. By examining the thickness distribution of several specimens in the expanded area, it can be seen that by reducing the change percentage in the TED, more thinning is achieved at the tube end. Moreover, using spherical-head tools with greater diameters increases the end diameter of the expanded tube and reduces the spring-back.

Keywords: Single point incremental forming, Response surface methodology, Surface roughness, Tube end diameter, Spring-back



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

**Experimental investigation and statistical analysis
of variables affecting the dimensional accuracy and
surface roughness of the specimen produced from
the tube end flaring using SPIF process**

By:

Mohammad Isapour Rudy

Supervisor:

Dr. Mahdi Vahdati

Advisor:

Dr. Mohammad javad Mirnia

February 2022