دانشکده مهندسی
گروه مهندسی مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

مؤلف:

احمد عرفانی مقدم

استاد راهنما:

دکتر مهران کدخدایان

شهریور ۱۳۸۹

تاییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان:

بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ

که توسط آقای **احمد عرفانی مقدم** تهیه و به هیات داوران ارائه شده، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته مهندسی مکانیک در گرایش طراحی کاربردی، مورد تأیید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۶/۳۱ (سه‌شنبه)　　نمره:　　درجه ارزشیابی:

نام و نام خانوادگی	هیات داوران	مرتبه علمی	امضاء
۱- دکتر مهران کدخدایان	استاد راهنما	دانشیار	
۲- دکتر جلیل رضائی پژند	استاد ممتحن	استاد	
۳- دکتر فرهاد کلاهان	استاد ممتحن	استادیار	
۴- دکتر مجید معاونیان	دبیر تحصیلات تکمیلی	استادیار	

تاییدیه گروه مکانیک

گواهی می‌شود این پایان نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: **احمد عرفانی مقدم** امضاء تاریخ

استاد راهنما: **دکتر مهران کدخدایان** امضاء تاریخ

تقدیم به:

پدر مهربانم

مادر دلسوزم

که همواره پشتیبان و روشن‌کننده راه زندگیم بودند.

تقدیر و تشکر:

در اینجا لازم می‌دانم از زحمات جناب آقای دکتر مهران کدخدایان که در راستای به انجام رسیدن این پایان‌نامه، اینجانب را از رهنمودهای خویش بهره‌مند ساختند و همواره با صبر و شکیبایی به راهنمائی اینجانب پرداخته‌اند، قدردانی نمایم.

همچنین از دوست گرامی، آقای مهندس حیدری که در انجام این پروژه کمک‌های فراوانی به اینجانب نمودند و از تمام دوستانی که در این مقطع افتخار آشنائی و همراهی با آن‌ها را داشتم، کمال تشکر را دارم.

در آخر ولی نه برای آخرین بار، از پدر و مادر عزیزم که تا به امروز بهترین راهنما و الگوی بنده در تمامی موارد بوده‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

احمد عرفانی مقدم

فرم چکیده پایان‌نامه تحصیلی دوره تحصیلات تکمیلی	دفترمدیریت تحصیلات تکمیلی
نام خانوادگی دانشجو: **عرفانی مقدم** نام: **احمد**	
استاد راهنما: **دکتر مهران کدخدایان**	
دانشکده: **مهندسی** رشته: **مکانیک** گرایش: **طراحی کاربردی** مقطع: **کارشناسی ارشد**	
تاریخ دفاع: **۱۳۸۹/۶/۳۱** تعداد صفحات: **۱۴۱**	
عنوان پایان‌نامه: **بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ**	
کلید واژه‌ها: **هیدروفرمینگ، مسیرهای بارگذاری، طراحی آزمایش‌ها، تحلیل واریانس، بهینه‌سازی**	

چکیده

تولید قطعات با اشکال پیچیده و با استحکام بالا موجب شده است تا روش هیدروفرمینگ به طور گسترده مورد توجه محققان قرار بگیرد. با توجه به کاربردهای گسترده روش هیدروفرمینگ این روش از جمله روش‌های پیچیده شکل‌دهی به شمار می‌رود و طراحی دقیق قطعات مستلزم تنظیم پارامترهای بسیاری است. از جمله این پارامترها، تنظیم شرایط بارگذاری است که از آن به عنوان طراحی مسیرهای بارگذاری تعبیر می‌شود. در این رساله بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری برای فرآیندهای هیدروفرمینگ مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به این که در فرآیند هیدروفرمینگ ارتباط صریح ریاضی میان معیارهای شکل‌پذیری و متغیرهای بارگذاری وجود ندارد بنابراین نمی‌توان طراحی دقیقی برای مسیرهای بارگذاری انجام داد و از طرفی طراحی با استفاده از روش سعی و خطا مستلزم صرف وقت، انرژی و هزینه بالائی است. لذا در این رساله به منظور انتخاب مهمترین وضعیت‌های طراحی از روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) استفاده شده است. طراحی مسیرهای بارگذاری در هیدروفرمینگ اتصالات T-، X- و Y-شکل مطالعه گردید در هر یک از فرآیندها برای تخمین شکل‌پذیری لوله معیارهای مناسب شکل‌دهی انتخاب شد و به منظور ارزیابی این معیارهای شکل‌پذیری نسبت به متغیرهای بارگذاری از تحلیل اجزا محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus/Explicit6.7 استفاده شده است. برای اهداف بهینه‌سازی لازم است تا یک رابطه ریاضی میان معیارهای شکل‌پذیری و متغیرهای بارگذاری وجود داشته باشد لذا برای این منظور از تحلیل رگرسیون بر روی جدول متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شده است. صحت و معنی دار بودن مدل‌های ریاضی حاصل از تحلیل رگرسیون با استفاده از تحلیل واریانس بررسی گردید و بهترین مدل بر مبنای معیارهای مختلف و بر اساس شایستگی بیشتر انتخاب گردید و چگونگی تاثیر هر یک از متغیرهای بارگذاری بر روی تغییر شکل لوله نیز مطالعه شد. به منظور بهینه‌سازی متغیرهای بارگذاری و طراحی مسیرهای بهینه از الگوریتم تبرید تدریجی بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از اعمال مسیرهای بارگذاری بهینه با نتایج آزمایشگاهی موجود توانائی روش ارائه شده برای طراحی مسیرهای بارگذاری در فرآیند هیدروفرمینگ را تائید نمود.

امضای استاد راهنما

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- هیدروفرمینگ ۲

۱-۲- اهداف پژوهش ۲

۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته

۲-۱- هیدروفرمینگ لوله ۶

۲-۲- طراحی مسیرهای بارگذاری ۶

فصل سوم: **روش طراحی مسیرهای بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ در مطالعه حاضر**

۳-۱- طراحی آزمایشها ۱۴

۳-۱-۱- چند تعریف در زمینه طراحی آزمایشها ۱۴

۳-۱-۲- کلیات روش طراحی آزمایشها ۱۵

۳-۱-۳- طرح‌های آزمایشی ۱۵

۳-۱-۴- مراحل اصلی اجرای طرح تاگوچی ۱۷

۳-۲- روش اجزا محدود ۱۷

۳-۳- تحلیل واریانس ۱۹

۳-۳-۱- مدل‌سازی ریاضی ۱۹

۳-۳-۲- میانیابی یا رگرسیون ۱۹

۳-۳-۳- معرفی توابع مختلف رگرسیونی ۲۰

۳-۳-۴- کنترل فرضیات و اعتبار مدل‌های رگرسیونی ۲۱

۳-۴- الگوریتم تبرید تدریجی ۲۲

۳-۴-۱- انواع روش‌های بهینه‌سازی ۲۲

۳-۴-۲- جستجوگر تبرید تدریجی (SA) ۲۴
۳-۴-۳- پارامتر و ساختار الگوریتم SA ۲۶

فصل چهارم: **طراحی مسیرهای بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات T شکل با اعمال میدان فشار خطی**

۴-۱- مروی بر فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات **T** شکل ۲۹
۴-۲- پارامترهای بارگذاری ۲۹
۴-۲-۱- فشار داخلی ۲۹
۴-۲-۲- جابجائی پانچ‌های محوری ۳۰
۴-۲-۳- جابجائی پانچ متقابل ۳۰
۴-۳- معیارهای شکل‌پذیری لوله در فرآیند هیدروفرمینگ ۳۲
۴-۴- طرح تاگوچی ۳۳
۴-۵- انجام آزمایشات ۳۳
۴-۵-۱- تائید یک نمونه آزمایشگاهی ۳۳
۴-۵-۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزا محدود ۳۶
۴-۶- تحلیل واریانس (ANOVA) ۳۸
۴-۶-۱- تحلیل رگرسیون و مدل‌سازی ریاضی ۳۸
۴-۶-۲- بررسی شایستگی مدل‌های ارائه شده ۳۹
۴-۶-۳- بررسی تاثیر دوبه‌دو متغیرهای بارگذاری ۴۳
۴-۷- بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی ۴۴
۴-۸- بررسی اثر متغیرهای بارگذاری بر روی شکل‌پذیری لوله ۴۸
۴-۹- DOE بر اساس روش فول فاکتوریل ۴۹
۴-۱۰- تحلیل واریانس بر اساس طرح فول فاکتوریل ۵۱
۴-۱۰-۱- تعیین مدل مناسب برای تخمین شکل‌پذیری لوله ۵۲
۴-۱۱- بهینه‌سازی بر اساس طرح فول‌فاکتوریل ۵۷

فصل پنجم: **مطالعه اعمال میدان‌های فشار نوسانی در هیدروفرمینگ اتصالات T شکل**

۵-۱- پارامترهای بارگذاری ۶۰

۵-۱-۱- فشار نوسانی ۶۰

۵-۱-۲- منحنی جابجائی پانچ محوری ۶۰

۵-۱-۳- منحنی جابجائی پانچ متقابل ۶۱

۵-۲- پارامترهای خروجی یا معیارهای شکل‌پذیری لوله ۶۲

۵-۳- طراحی آزمایشها ۶۲

۵-۴- انجام آزمایشها ۶۴

۵-۵- تحلیل رگرسیون ۶۷

۵-۵-۱- بررسی شایستگی مدل‌های رگرسیونی ۶۷

۵-۶- مطالعه تاثیر پارامترهای بارگذاری بر روی تغییر شکل لوله ۷۱

۵-۶-۱- درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر ضخامت مینیمم ۷۱

۵-۶-۲- درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ارتفاع ماکزیمم شاخه ۷۲

۵-۶-۳- بررسی تاثیر متقابل پارامترهای بارگذاری بر روی شکل‌پذیری لوله ۷۳

۵-۷- بهینه‌سازی ۷۴

۵-۸- بحث ۷۷

۵-۹- تحلیل رگرسیون ۷۹

۵-۹-۱- مدل‌های رگرسیون ۷۹

۵-۹-۲- بررسی صحت مدل‌های ارائه شده ۸۰

۵-۱۰- بهینه‌سازی بر اساس طرح فول‌فاکتوریل ۸۵

۵-۱۱- بررسی تاثیر فشار نوسانی بر روی تغییر شکل ۸۶

فصل ششم: **طراحی مسیرهای بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات Y شکل**

۶-۱- هیدروفرمینگ Y شکل لوله‌ها ۹۰

۶-۲- تائید یک مدل آزمایشگاهی ۹۰

۶-۳- تعیین متغیرهای بارگذاری ۹۱

۶-۳-۱- فشار داخلی ۹۱
۶-۳-۲- پانچ محوری سمت چپ ۹۲
۶-۳-۳- پانچ محوری سمت راست ۹۳
۶-۳-۴- جابجائی پانچ متقابل ۹۳
۶-۴- طرح تاگوچی و طراحی مسیرهای بارگذاری ۹۴
۶-۴-۱- تعیین محدوده مینیمم و ماکزیمم برای متغیرها ۹۴
۶-۴-۲- جدول تاگوچی ۹۶
۶-۴-۳- متغیرهای خروجی ۹۸
۶-۵- تحلیل اجزا محدود آزمایشها ۹۹
۶-۶- تحلیل آماری جدول تاگوچی ۹۹
۶-۶-۱- تحلیل رگرسیون ۹۹
۶-۶-۲- بررسی مدل‌های ارائه شده ۱۰۱
۶-۶-۳- آزمایشها آماری برای ارزیابی مدل‌های پیشنهاد شده ۱۰۴
۶-۶-۴- تاثیر کلی متغیرهای بارگذاری ۱۰۵
۶-۶-۵- تاثیر متقابل متغیرهای بارگذاری ۱۰۶
۶-۷- بهینه‌سازی ۱۰۷
۶-۷-۱- بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری ۱۰۷

فصل هفتم: **طراحی مسیرهای بارگذاری فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات X شکل**

۷-۱- مقدمه ۱۱۲
۷-۲- فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات X شکل ۱۱۲
۷-۳- طراحی مسیرهای بارگذاری ۱۱۴
۷-۳-۱- فشار داخلی ۱۱۴
۷-۳-۲- پانچ محوری ۱۱۶
۷-۴- طراحی مسیرهای بارگذاری با استفاده از طرح تاگوچی ۱۱۶
۷-۵- معیارهای شکل‌پذیری لوله ۱۱۸

۷-۶- انجام آزمایشها ۱۲۰
۷-۷- تحلیل رگرسیون و مدل‌سازی ریاضی ۱۲۱
۷-۷-۱- اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده ۱۲۲
۷-۷-۲- بررسی اثر پارامترهای بارگذاری بر روی تغییر شکل ۱۲۸
۷-۶- بهینه‌سازی مسیرهای بارگذاری ۱۳۱

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده

۸-۱- نتیجه‌گیری ۱۳۶
۸-۲- پیشنهادات برای کارهای آینده ۱۳۷

مراجع ۱۳۸

فهرست شکلها

شماره	عنوان	صفحه
۳-۱	فلوچارت مربوط به نحوه عملکرد الگوریتم SA	۲۵
۴-۱	شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ T-شکل	۲۹
۴-۲	منحنی عمومی فشار داخلی با متغیرهای ورودی	۳۰
۴-۳	مسیر جابجائی پانچ محوری با سه متغیر	۳۱
۴-۴	مسیر جابجائی پانچ متقابل و متغیرهای طراحی	۳۲
۴-۵	معیارهای شکل‌پذیری لوله هیدروفرم شده	۳۳
۴-۶	مدل آزمایشگاهی فرآیند هیدروفرمینگ T-شکل [۲۹]	۳۵
۴-۷	نصف مدل شبیه‌سازی	۳۵
۴-۸	توزیع ضخامت تار میانی لوله تغییر شکل داده شده	۳۶
۴-۹	چهار مسیر نمونه برای فشار داخلی	۳۶
۴-۱۰	چهار مسیر نمونه برای جابجائی پانچ محوری	۳۷
۴-۱۱	مسیرهای نمونه جابجائی پانچ متقابل	۳۷
۴-۱۲	توزیع باقیمانده‌ها در مقایسه با مقادیر تخمین زده شده (ضخامت مینیمم)	۴۰
۴-۱۳	توزیع باقیمانده‌ها در مقایسه با مقادیر تخمین زده شده (ارتفاع ماکزیمم)	۴۰
۴-۱۴	احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها (ضخامت مینیمم)	۴۱
۴-۱۵	احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها (ارتفاع ماکزیمم)	۴۱
۴-۱۶	نمودار هیستوگرام توزیع باقیمانده‌ها (ارتفاع ماکزیمم) در مدل خطی	۴۱

۴-۱۷	تطابق نمونه شبیه‌سازی و مدل‌سازی (ضخامت مینیمم)	۴۳
۴-۱۸	تطابق نمونه شبیه‌سازی و مدل‌سازی (ارتفاع ماکزیمم)	۴۳
۴-۱۹	تاثیر متقابل فشار نهائی و موقعیت نهائی پانچ متقابل بر روی ضخامت مینیمم	۴۴
۴-۲۰	تاثیر متقابل جابجائی نهائی پانچ محوری و زمان مرحله میانی پانچ محوری بر روی ارتفاع شاخه	۴۴
۴-۲۱	روند همگرائی الگوریتم تبرید تدریجی	۴۵
۴-۲۲	مسیر بهینه فشار داخلی	۴۷
۴-۲۳	مسیر بهینه جابجائی پانچ محوری	۴۷
۴-۲۴	مسیر بهینه جابجائی پانچ متقابل	۴۷
۴-۲۵	لوله شکل داده شده با شرایط بارگذاری بهینه	۴۸
۴-۲۶	درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ضخامت مینیمم	۴۸
۴-۲۷	درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ارتفاع ماکزیمم	۴۹
۴-۲۸	توزیع باقیمانده‌ها در مقایسه با مقادیر تخمین‌زده شده مدل خطی مرتبه اول (ضخامت مینیمم)	۵۳
۴-۲۹	توزیع باقیمانده‌ها در مقایسه با مقادیر تخمین‌زده شده مدل خطی مرتبه اول (ارتفاع ماکزیمم)	۵۳
۴-۳۰	توزیع باقیمانده‌ها در مقایسه با مقادیر تخمین‌زده شده مدل خطی مرتبه دوم (ضخامت مینیمم)	۵۴
۴-۳۱	توزیع باقیمانده‌ها در مقایسه با مقادیر تخمین‌زده شده مدل خطی مرتبه دوم (ارتفاع ماکزیمم)	۵۴
۴-۳۲	احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها در مدل خطی مرتبه دوم (ضخامت مینیمم)	۵۵
۴-۳۳	احتمال نرمال بودن باقیمانده‌ها در مدل خطی مرتبه دوم (ارتفاع ماکزیمم)	۵۵
۴-۳۴	پراکندگی داده‌های نمونه آزمایشگاهی بر حسب نمونه مدل‌سازی (ضخامت مینیمم)	۵۶
۴-۳۵	پراکندگی داده‌های نمونه آزمایشگاهی بر حسب نمونه مدل‌سازی (ارتفاع ماکزیمم)	۵۷

۳۶-۴ منحنی همگرائی الگوریتم تبرید تدریجی ۵۸

۱-۵ منحنی فشار نوسانی به همراه متغیرهای بارگذاری ۶۰

۲-۵ منحنی جابجائی پانچ محوری ۶۱

۳-۵ مسیر جابجائی پانچ متقابل با متغیرهای مربوطه ۶۲

۴-۵ دو مسیر نمونه برای فشار داخلی ۶۵

۵-۵ مسیرهای نمونه جابجائی پانچ‌های محوری ۶۵

۶-۵ مسیر نمونه جابجائی پانچ متقابل ۶۵

۷-۵ توزیع باقیمانده‌ها برای ضخامت مینیمم ۶۸

۸-۵ توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای مدل ضخامت مینیمم ۶۸

۹-۵ توزیع باقیمانده‌ها برای ارتفاع ماکزیمم شاخه ۶۹

۱۰-۵ توزیع نرمال باقیمانده‌ها برای ارتفاع ماکزیمم شاخه ۶۹

۱۱-۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود و مدل‌سازی آماری برای ضخامت مینیمم ۷۰

۱۲-۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود و مدل‌سازی آماری برای ارتفاع ماکزیمم شاخه ۷۰

۱۳-۵ درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ضخامت مینیمم ۷۲

۱۴-۵ درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ارتفاع ماکزیمم شاخه ۷۲

۱۵-۵ تاثیر متقابل دامنه فشار و فشار نهائی بر روی ضخامت مینیمم ۷۳

۱۶-۵ تاثیر متقابل فشار نهائی و جابجائی نهائی پانچ محوری بر روی ارتفاع شاخه ۷۳

۱۷-۵ مسیر بهینه تغییرات فشار داخلی ۷۶

۱۸-۵ مسیر بهینه جابجائی پانچ محوری ۷۶

۱۹-۵ مسیر بهینه جابجائی پانچ متقابل ۷۶

۵-۲۰ منحنی همگرائی الگوریتم تبرید تدریجی ۷۷

۵-۲۱ لوله تغییر شکل یافته با اعمال مسیرهای بارگذاری بهینه ۷۷

۵-۲۲ توزیع باقیمانده‌ها برای ضخامت بر اساس مدل خطی ۸۲

۵-۲۳ توزیع باقیمانده‌ها برای ارتفاع بر اساس مدل خطی ۸۲

۵-۲۴ توزیع باقیمانده‌ها برای ضخامت بر اساس مدل سهموی ۸۳

۵-۲۵ توزیع باقیمانده‌ها برای ارتفاع بر اساس مدل سهموی ۸۳

۵-۲۶ مقایسه نتایج مدل‌سازی با شبیه‌سازی برای ضخامت مینیمم ۸۵

۵-۲۷ مقایسه نتایج مدل‌سازی با شبیه‌سازی برای ارتفاع ۸۵

۵-۲۸ درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ضخامت مینیمم ۸۷

۵-۲۹ درصد تاثیرگذاری پارامترهای بارگذاری بر روی ارتفاع ماکزیمم شاخه ۸۷

۶-۱ شماتیکی از فرآیند هیدروفرمینگ Y شکل لوله ۹۰

۶-۲ شکل نهائی فرآیند هیدروفرمینگ برای لوله و ابزار ۹۱

۶-۳ توزیع ضخامت تار میانی لوله در فرآیند هیدروفرمینگ ۹۱

۶-۴ شکل عمومی مسیر فشار با متغیرهای مربوطه ۹۲

۶-۵ مسیر عمومی جابجائی پانچ محوری چپ با متغیرهای مورد نظر ۹۲

۶-۶ مسیر جابجائی پانچ محوری سمت راست ۹۳

۶-۷ مسیر جابجائی پانچ متقابل و متغیرهای مربوطه ۹۴

۶-۸ وقوع چروکیدگی در اثر جابجائی بیش از اندازه پانچ محوری سمت راست ۹۵

۶-۹ شروع چروکیدگی به علت مقدار نامناسب T_{ram} ۹۵

۶-۱۰ شکل نهائی لوله با اعمال مسیر قبل ۹۵

۶-۱۱ چهار مسیر نمونه برای فشار داخلی ۹۸

۶-۱۲ چهار مسیر نمونه برای جابجائی پانچ محوری سمت چپ ۹۸

۶-۱۳ مسیرهای نمونه پانچ محوری راست ۹۸

۶-۱۴ مسیرهای نمونه جابجائی پانچ متقابل ۹۹

۶-۱۵ توزیع باقیمانده‌ها بر حسب مقادیر تخمین زده شده (ضخامت مینیمم) ۱۰۲

۶-۱۶ توزیع باقیمانده‌ها بر حسب مقادیر تخمین زده شده (ارتفاع ماکزیمم) ۱۰۲

۶-۱۷ پراکندگی داده‌ها بر حسب نمونه مدل‌سازی شده (ضخامت مینیمم) ۱۰۳

۶-۱۸ پراکندگی داده‌ها بر حسب نمونه مدل‌سازی شده (ارتفاع ماکزیمم) ۱۰۳

۶-۱۹ درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ضخامت مینیمم ۱۰۵

۶-۲۰ درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ارتفاع شاخه ۱۰۵

۶-۲۱ تاثیر متقابل فشار نهائی و زمان انبساط بر روی ضخامت مینیمم ۱۰۶

۶-۲۲ تاثیر متقابل S_{ram} و S_{lam} بر روی ضخامت مینیمم ۱۰۶

۶-۲۳ تاثیر متقابل T_{rap} و S_{ram} بر روی ارتفاع شاخه ۱۰۷

۶-۲۴ تاثیر متقابل S_{raf} و P_{yield} بر روی ارتفاع شاخه ۱۰۷

۶-۲۵ منحنی همگرائی الگوریتم SA برای هیدروفرمینگ Y شکل ۱۰۸

۶-۲۶ مسیر بهینه فشار داخلی ۱۰۹

۶-۲۷ مسیر بهینه جابجائی پانچ محوری چپ ۱۰۹

۶-۲۸ مسیر بهینه جابجائی پانچ محوری راست ۱۰۹

۶-۲۹ مسیر بهینه جابجائی پانچ متقابل ۱۱۰

۶-۳۰ لوله تغییر شکل داده با اعمال مسیرهای بارگذاری بهینه ۱۱۰

۷-۱ شماتیک فرآیند هیدروفرمینگ اتصالات X شکل ۱۱۲

۷-۲ مدل شبیه‌سازی اجزا محدود در نرم‌افزار Abaqus/Explicit ۱۱۳

۷-۳ منحنی تغییر ضخامت در راستای صفحات مذکور حاصل از شبیه‌سازی. الف) ضخامت در راستای zx ب) ضخامت در راستای zy ۱۱۴

۷-۴ لوله تغییر شکل یافته درون قالب در انتهای فرآیند هیدروفرمینگ ۱۱۵

۷-۵ منحنی عمومی فشار داخلی ۱۱۵

۷-۶ منحنی عمومی جابجائی پانچ محوری ۱۱۶

۷-۷ چهار مسیر تغییر فشار داخلی ۱۱۹

۷-۸ چهار مسیر جابجائی پانچ محوری ۱۱۹

۷-۹ توزیع باقیمانده‌های $T_{min\,(zx)}$ بر اساس مدل خطی ۱۲۴

۷-۱۰ توزیع باقیمانده‌های $T_{min\,(zy)}$ بر اساس مدل خطی ۱۲۴

۷-۱۱ توزیع باقیمانده‌های $T_{max\,(zy)}$ بر اساس مدل خطی ۱۲۴

۷-۱۲ توزیع باقیمانده‌های H_{max} بر اساس مدل خطی ۱۲۵

۷-۱۳ توزیع پراکندگی داده‌ها بر حسب نمونه مدل‌سازی (ضخامت مینیمم در راستای zx) ۱۲۶

۷-۱۴ توزیع پراکندگی داده‌ها بر حسب نمونه مدل‌سازی (ضخامت مینیمم در راستای zy) ۱۲۷

۷-۱۵ توزیع پراکندگی داده‌ها بر اساس نمونه مدل‌سازی (ضخامت ماکزیمم در راستای zy) ۱۲۷

۷-۱۶ توزیع پراکندگی داده‌ها بر اساس نمونه مدل‌سازی (ارتفاع شاخه) ۱۲۷

۷-۱۷ درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی مینیمم ضخامت در صفحه zx ۱۲۸

۷-۱۸ درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی مینیمم ضخامت در صفحه zy ۱۲۹

۷-۱۹ درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ماکزیمم ضخامت در صفحه zy ۱۲۹

۷-۲۰	درصد تاثیرگذاری متغیرهای بارگذاری بر روی ماکزیمم ارتفاع شاخه	۱۲۹
۷-۲۱	تاثیر همزمان زمان فشار تسلیم و فشار نهائی بر روی مینیمم ضخامت در صفحه zx	۱۳۰
۷-۲۲	تاثیر همزمان فشار تسلیم و فشار نهائی بر روی مینیمم ضخامت در صفحه zy	۱۳۰
۷-۲۳	تاثیر همزمان فشار تسلیم و جابجائی اولیه پانچ محوری بر روی ضخامت ماکزیمم در صفحه zy	۱۳۰
۷-۲۴	تاثیر همزمان جابجائی نهائی پانچ محوری و فشار نهائی بر روی ارتفاع ماکزیمم شاخه	۱۳۱
۷-۲۵	روند همگرائی الگوریتم تبرید تدریجی برای مسئله حاضر	۱۳۲
۷-۲۶	مسیر بهینه تغییر فشار داخلی در فرآیند	۱۳۳
۷-۲۷	مسیر بهینه جابجائی پانچ محوری در فرآیند	۱۳۳
۷-۲۸	لوله تغییر شکل یافته با اعمال مسیرهای بارگذاری بهینه	۱۳۴

فهرست جدولها

شماره	عنوان	صفحه
۴-۱	متغیرهای مربوط به فشار داخلی	۳۱
۴-۲	مشخصات متغیرهای جابجائی پانچ محوری	۳۱
۴-۳	متغیرهای طراحی مسیر جابجائی پانچ متقابل	۳۲
۴-۴	طرح تاگوچی بر اساس آزمایشات دو سطحی برای ۱۱ متغیر بارگذاری	۳۴
۴-۵	خواص لوله (AA6063-T4)	۳۵
۴-۶	نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود آزمایشات	۳۸
۴-۷	بررسی معنادار بودن مدل خطی ضخامت مینیمم	۴۰
۴-۸	بررسی معنادار بودن مدل خطی ارتفاع ماکزیمم	۴۰
۴-۹	ضرایب همبستگی مدل‌های ارائه شده	۴۲
۴-۱۰	مقادیر دلخواه برای متغیرهای بارگذاری	۴۲
۴-۱۱	مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی اجزا محدود	۴۲
۴-۱۲	خطای محاسبه شده برای شرایط بارگذاری بر اساس جدول (۴-۱۱)	۴۳
۴-۱۳	مقادیر بهینه بدست آمده از الگوریتم SA	۴۶
۴-۱۴	مقایسه نتایج الگوریتم SA با تحلیل اجزا محدود	۴۶
۴-۱۵	مقادیر بهینه برای طراحی مسیرهای بارگذاری	۴۶
۴-۱۶	متغیرهای بارگذاری انتخاب شده به همراه بازه طراحی شده	۴۹
۴-۱۷	طرح فول فاکتوریل به همراه نتایج FEA	۵۰