دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

گرایش ساخت و تولید

کنترل فازی ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک

نگارش:

احسان رودگر آملی

استاد راهنما:

دکتر مجید قریشی

شهریور ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان‌نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان‌نامه خانم / آقای: احسان رودگر آملی

را با عنوان: مدلسازی و کنترل فازی ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
- استاد راهنما	دکتر مجید قریشی	دانشیار	
- استاد مشاور	-	-	-
- استاد مشاور	-	-	-
- استاد ممتحن	دکتر فرهنگ هنرور	استاد	
- استاد ممتحن	دکتر سعید خدایگان	استادیار	
- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ هنرور	استاد	

تقدیم به...

پدر دلسوز و مادر عزیزم که هرچه دارم از دعای آنهاست

و

تمامی اساتید و معلمانی که برایم زحمات فراوانی کشیده اند

تشکر و قدردانی

حقیر بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از استاد عزیز و مهربان و با اخلاق، جناب آقای دکتر قریشی که با حمایت‌ها و ارشادات خود زمینه رشد علمی اینجانب را فراهم نموده‌اند، صمیمانه اعلام می‌نمایم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای مهندس ابراهیمی سرپرست کارگاه جوشکاری و دانشجویان آزمایشگاه ماشینکاری پیشرفته دانشکده، مهندس وحید طهماسبی و مهندس سیاوش طبری جهت همکاری در انجام آزمایش‌های مربوط به پایان‌نامه، سپاسگزاری نمایم.

چکیده

در این تحقیق به بررسی اثر(مدلسازی و کنترل) پارامترهای فرآیند ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک پرداخته شده است. تفاوت عمده این نوع ماشینکاری با ماشینکاری تخلیه الکتریکی سنتی یا تر، استفاده از تزریق دی‌الکتریک گازی با فشار بالا به جای دی‌الکتریک مایع و اعمال دوران به الکترود ابزار می‌باشد. در این تحقیق ضمن بیان خصوصیات این فرآیند، مقدمه‌ای بر منطق فازی و روش‌های آماری، مدلسازی و کنترل فرآیند مبتنی بر استنتاج- فازی- عصبی- تطبیقی در ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک و سنتی، ارائه گریدیده است.

در این پژوهش به مدلسازی و طراحی قوانین کنترلی خارج از خط از ماشینکاری‌های تخلیه‌الکتریکی خشک و سنتی پرداخته است. برای انجام آزمایش‌های مربوط به ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک از شش پارامتر ورودی ولتاژ، شدت جریان، زمان روشنی پالس، ضریب بهره پالس، فشار گاز(اکسیژن) و سرعت دورانی اسپیندل و در طراحی آزمایش‌های مربوط به ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی سنتی از چهار فاکتور ولتاژ، زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و شدت جریان استفاده شده است. خروجی‌ها در هر دو حالت، نرخ باربرداری و زبری سطح می‌باشند. از معادلات رگرسیون برازش شده برای هر یک از خروجی‌ها (برای تولید داده‌های مصنوعی) در غنی‌سازی پایگاه داده استفاده شد. برای ارزیابی مدل‌ها و کنترلرهای مربوط به هریک از حالات نیز از ۸ وضعیت استفاده گردیده است. عملکرد هر یک از مدل‌ها و کنترلرها با توجه به معیار درصد انحراف از مقدار واقعی و میانگین قدرمطلق خطاها مورد ارزیابی قرار گرفتند. بیشترین درصد خطا در مدل‌های ANFIS غنی‌شده (به کمک داده‌های مصنوعی) مورد قبول به ترتیب برای حالات خشک و سنتی ۲/۵٪ و۹/۲۱٪ و برای کنترل پارامترهای ورودی به ترتیب ۳/۶٪ و ۷/۳٪ بدست آمده است که نسبت به مقالات ارائه شده در ژورنال‌های معتبر خارجی برتری دارد.

کلید واژه: ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی، ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک، طراحی آزمایش‌ها، سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی، مدلسازی، کنترل.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... و
فهرست جدول‌ها ..... ط
پیشگفتار ۱
۱-۱- مقدمه ۵
۱-۲- تاریخچه فرآیند تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک ۵
۱-۳- مدلسازی و کنترل ماشینکاریهای تخلیه الکتریکی به کمک منطق فازی ۸
فصل ۲- اصول ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۱۵
۲-۱- مقدمه ۱۵
۲-۲- تعریف ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۱۵
۲-۳- ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک ۱۵
۲-۳-۱- تعریف ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک ۱۵
۲-۳-۲- تعریف ماشینکاری تخلیه الکتریکی نیمه خشک ۱۶
۲-۳-۳- مکانیزم عملکرد ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک ۱۶
۲-۳-۴- گستره ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک و نیمه خشک ۱۷
۲-۳-۵- پارامترهای مؤثر در ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک ۱۹
۲-۴- مزایا و معایب ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک ۲۰
۲-۴-۱- مزایای فرآیند ۲۰
۲-۵- معایب فرآیند ۲۱
فصل ۳- روش طراحی آزمایشها ۲۳
۳-۱- مقدمه ۲۳
۳-۲- روند طراحی آزمایش ها ۲۳
۳-۳- مدلسازی فرآیند ۲۴
۳-۴- انواع طراحی آزمایش ۲۴
۳-۴-۱- روش سطح پاسخ ۲۵
۳-۴-۱-۱- طرحهای برازش مدل مرتبه دوم ۲۶
۳-۵- آزمایشها با فاکتورهای مختلف و تحلیل واریانس ANOVA ۲۸

۳-۶- نتایج تحلیل واریانس ۲۹
۳-۶-۱- آزمون فرض ۲۹
۳-۶-۲- P-Value ۳۰
۳-۷- طراحی آزمایش‌ها در این تحقیق ۳۰
فصل ۴- منطق فازی ۳۲
۴-۱- مقدمه ۳۲
۴-۲- مجموعه‌های فازی ۳۲
۴-۲-۱- توابع عضویت ۳۳
۴-۲-۱-۱- تابع عضویت مثلثی ۳۴
۴-۲-۱-۲- تابع عضویت ذوزنقه‌ای ۳۵
۴-۲-۱-۳- تابع عضویت گوسی ۳۶
۴-۲-۱-۴- تابع عضویت زنگوله‌ای شکل ۳۷
۴-۳- عملیات روی مجموعه‌های فازی ۳۷
۴-۳-۱- تساوی در مجموعه فازی ۳۷
۴-۳-۲- زیر مجموعه فازی ۳۸
۴-۳-۳- متمم مجموعه فازی ۳۸
۴-۳-۴- اجتماع مجموعه‌های فازی ۳۸
۴-۳-۵- اشتراک مجموعه‌های فازی ۳۹
۴-۴- متغیرهای کلامی ۳۹
۴-۴-۱- تعریف متغیرهای کلامی ۴۰
۴-۵- قواعد اگر آنگاه فازی ۴۱
۴-۵-۱- قواعد فازی ممدانی ۴۱
۴-۵-۱-۱- قواعد فازی ممدانی در کنترل کننده‌ی فازی ۴۲
۴-۵-۱-۲- قواعد فازی ممدانی در مدلسازی فازی ۴۳
۴-۶- ساختار سیستم‌های فازی ۴۴
۴-۷- استنتاج فازی ۴۵
۴-۷-۱- سیستم استنتاج فازی ممدانی ۴۶
۴-۷-۲- مدل فازی سوگینو ۴۸
۴-۷-۳- مدل فازی تسوکاموتو ۴۹
۴-۸- طراحی کنترلر فازی در EDM ۵۰
۴-۹- رویکرد فازی در تحقیق حاضر ۵۴

فصل ۵- تجهیزات آزمایش و طراحی آزمایشها ۵۶
۵-۱- معرفی دستگاه اسپارک ۵۶
۵-۱-۱- بخش ماشینکاری ۵۶
۵-۱-۲- طراحی دستگاه ماشینکاری اسپارک در حالت خشک ۵۷
۵-۱-۲-۱- موتور دستگاه ۵۸
۵-۱-۲-۲- سیستم انتقال قدرت ۵۸
۵-۱-۲-۳- سیستم انتقال گاز از داخل دستگاه ۵۸
۵-۱-۲-۴- سیستم گیرش الکترود ۵۹
۵-۱-۲-۵- انتقال جریان الکتریکی به الکترود ۵۹
۵-۱-۳- ساخت دستگاه در حالت خشک ۵۹
۵-۱-۴- میز دستگاه ۶۰
۵-۱-۵- ژنراتور ۶۱
۵-۲- تنظیم دستگاه و نحوه انجام آزمایش‌ها ۶۲
۵-۳- مواد به کار رفته در آزمایش ۶۲
۵-۳-۱- الکترود ابزار ۶۲
۵-۳-۱-۱- جنس الکترود ۶۲
۵-۳-۱-۲- مشخصات هندسی الکترود ۶۳
۵-۳-۲- قطعه‌کار ۶۳
۵-۳-۲-۱- جنس قطعه‌کار ۶۳
۵-۳-۲-۲- مشخصات هندسی قطعه‌کار ۶۴
۵-۳-۳- آماده سازی قبل از آزمایش ها و اندازه گیری ۶۴
۵-۴- تجهیزات جانبی ۶۴
۵-۵- طراحی آزمایش‌ها در این تحقیق ۶۵
۵-۵-۱- طراحی آزمایش‌ها در حالت خشک ۶۵
۵-۵-۲- طراحی آزمایش‌ها در حالت سنتی ۶۶
۵-۵-۳- نرم افزار Minitab ۶۶

فصل ۶- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها ۷۳
۶-۱- مقدمه ۷۳
۶-۲- تحلیل و بررسی آماری EDM خشک ۷۳
۶-۲-۱- تحلیل و بررسی آماری نرخ براده برداری در EDM خشک ۷۳
۶-۲-۲- تحلیل و بررسی آماری زبری سطح در EDM خشک ۷۶

۶-۳- مدلسازی ANFIS از فرآیند EDM خشک ۷۸
۶-۳-۱- مدلسازی ANFIS از نرخ باربرداری در EDM خشک ۷۹
۶-۳-۲- مدلسازی ANFIS از زبری سطح درEDM خشک ۸۱
۶-۴- قوانین فازی کنترل Off-line در EDM خشک ۸۴
۶-۴-۱- کنترل ولتاژ در EDM خشک ۸۵
۶-۴-۲- کنترل شدت جریان در EDM خشک ۸۶
۶-۴-۳- کنترل زمان روشنی پالس در EDM خشک ۸۷
۶-۴-۴- کنترل ضریب بهره پالس در EDM خشک ۸۸
۶-۴-۵- کنترل فشار گاز در EDM خشک ۸۹
۶-۴-۶- کنترل سرعت دورانی اسپیندل در EDM خشک ۹۰
۶-۵- مدلسازی و کنترل ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی ۹۴
۶-۶- تحلیل و بررسی آماری ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۹۴
۶-۶-۱- تحلیل و بررسی آماری نرخ براده برداری در EDM ۹۴
۶-۶-۲- تحلیل و بررسی آماری زبری سطح در EDM ۹۸
۶-۷- مدلسازی ANFIS از EDM ۱۰۱
۶-۷-۱- مدلسازی ANFIS از نرخ باربرداری در EDM ۱۰۲
۶-۷-۲- مدلسازی ANFIS از زبری سطح در EDM ۱۰۴
۶-۸- قوانین فازی کنترل Off-line در EDM ۱۰۷
۶-۸-۱- کنترل ولتاژ در EDM ۱۰۸
۶-۸-۲- کنترل زمان روشنی پالس در EDM ۱۰۹
۶-۸-۳- کنترل زمان خاموشی پالس در EDM ۱۱۰
۶-۸-۴- کنترل شدت جریان در EDM ۱۱۱
فصل ۷- نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۱۶
۷-۱- نتیجه گیری ۱۱۶
۷-۲- ارائه پیشنهاد ها برای تحقیقات آتی ۱۱۷
پیوست ۱۱۸
الگوریتم فازی- عصبی- تطبیقی ۱۱۹
مقدمه ۱۱۹
معرفی ساختار شبکه ANFIS ۱۱۹
دستورالعمل ANFIS در MATLAB ۱۲۴

فهرست مراجع..... ۱۳۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: نمایی از اجزای فرآیندEDM [۳۸]. ۱۵
شکل ۲-۲: دهانه ماشینکاری در حالت دی الکتریک گازی [۶]. ۱۶
شکل ۲-۳: مکانیزم اعمال ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک [۱۱]. ۱۷
شکل ۲-۴: نمایی از دستگاه اعمال ماشینکاری نیمه خشک [۹]. ۱۷
شکل ۲-۵: میکروسوراخکاری با فرآیند تخلیه الکتریکی خشک [۳۸]. ۱۸
شکل ۲-۶: ماشینکاری سیم برش خشک [۸]. ۱۸
شکل ۲-۷: فرزکاری تخلیه الکتریکی خشک[۶]. ۱۸
شکل ۲-۸: میکرو فرزکاری با ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک[۳۸]. ۱۹
شکل ۲-۹: میکروفرزکاری خشک در حالت CNC [۳۸]. ۱۹
شکل ۲-۱۰: پارامترهای مؤثر در ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک[۱۲]. ۲۰
شکل ۲-۱۱: مزایای فرآیند تخلیه الکتریکی خشک [۱۳]. ۲۱
شکل ۳-۱: سطح پاسخ و منحنی های تراز مربوطه[۴۲]. ۲۶
شکل ۳-۲: طرح مرکب مرکزی الف) برای ۲ =k ب) برای ۳=k [۴۲]. ۲۷
شکل ۳-۳: طرح مرکب مرکزی متمرکز شده در وجوه برای ۳=k [۴۴]. ۲۸
شکل ۳-۴: طرح باکس- بنکن برای ۳=k [۴۲]. ۲۸
شکل ۴-۱: نمایش تابع عضویت از افراد میانسال ۳۴
شکل ۴-۲: تابع عضویت مثلثی از هوای معتدل در یک منطقه گرمسیر ۳۵
شکل ۴-۳: تابع عضویت ذوزنقه‌ای از افراد با قد متوسط در جامعه ایران ۳۶
شکل ۴-۴: تابع عضویت گوسی از مجموعه افراد میانسال لاغر در ایران ۳۶
شکل ۴-۵: تابع عضویت ناقوسی شکل از افراد چاق در ایران ۳۷
شکل ۴-۶ : نمایش توابع عضویت فازی از رانندگی در بزرگراه‌های ایران ۴۰
شکل ۴-۷: نمای شماتیک سیستم دینامیکی واقعی[۴۴] ۴۳
شکل ۴-۸: نمای شماتیک از مدل فازی سیستم[۴۴] ۴۳
شکل ۴-۹: ساختار یک سیستم فازی. ۴۴
شکل ۴-۱۰: ساختار کنترل‌کننده منطقی فازی کلاسیک در سیستم مدار بسته[۴۴] ۴۵
شکل ۴-۱۱: نمای شماتیک سیستم استنتاج فازی ممدانی [۴۸]. ۴۶

شکل ۴-۱۲: مکانیزم تصمیم‌گیری فازی ممدانی برای انعام دادن در رستوران بر اساس کیفیت غذا و خدمات پذیرایی [۴۷]. ۴۷
شکل ۴-۱۳: نمای شماتیک سیستم استنتاج فازی سوگینو [۴۹] ۴۸
شکل ۴-۱۴: نمای شماتیک سیستم استنتاج فازی تسوکوماتو[۴۸] ۴۹
شکل ۴-۱۵: شماتیک سیستم پایش گپ درEDM [۲۶] ۵۱
شکل ۴-۱۶: سیگنالهای خروجی سیستم پایش گپ [۲۶] ۵۱
شکل ۴-۱۷: نمایش الگوهای طراحی شده برای تغییر شاخص پایداری ماشین (r)[۲۶]. ۵۳
شکل ۴-۱۸: نمایش اثر کنترلر خودتنظیم فازی در پایداری EDM[۲۶]. ۵۳
شکل ۵-۱: دستگاه اسپارک مورد استفاده ۵۶
شکل ۵-۲: نمای انتقال گاز از طریق کپسول در EDM خشک ۵۷
شکل ۵-۳: طرح کلگی ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک ۵۸
شکل ۵-۴: دستگاه ساخته شده اعمال ماشینکاری تخلیه الکتریکی خشک ۶۰
شکل ۵-۵: کلگی اعمال فرآیند معمول ۶۰
شکل ۵-۶: هندسه و نمایی از الکترود ابزار در EDM خشک ۶۳
شکل ۵-۷: هندسه و نمایی از قطعه کار در EDM خشک ۶۴
شکل ۶-۱: نمودار های مربوط به توزیع باقیمانده ها از نرخ باربرداری در EDM خشک ۷۵
شکل ۶-۲: نمودار تحلیل و پراکندگی باقیماندها برای زبری سطح در EDM خشک ۷۸
شکل ۶-۳: شماتیک مدلسازی خروجیهای فرآیند EDM خشک ۷۹
شکل ۶-۴: شماتیک کنترل Off-line (نگاشت معکوس) در کنترل پارامترهای EDM خشک ۸۴
شکل ۶-۵: نمایش ۴۵ تابع عضویت گاوسی تعریف شده برای نرخ باربرداری در کنترلر فازی نوع دوم (ANFIS 2) ۹۲
شکل ۶-۶: نمایش ۴۵ تابع عضویت گاوسی تعریف شده برای زبری سطح در کنترلر فازی نوع دوم (ANFIS 2) ۹۲
شکل ۶-۷: شماتیک طراحی قوانین فازی در کنترل سرعت دورانی اسپیندل در فضای ANFIS ۹۲
شکل ۶-۸: لیست قوانین فازی در کنترل سرعت اسپیندل در EDM خشک ۹۳
شکل ۶-۹: نمودار های مربوط به توزیع باقیمانده ها از نرخ باربرداری در EDM ۹۵
شکل ۶-۱۰: نمودار های مربوط به توزیع باقیمانده ها از زبری سطح در EDM ۹۹
شکل ۶-۱۱: شماتیک نگاشت پیشرو در مدلسازی EDM سنتی ۱۰۲
شکل ۶-۱۲: شماتیک کنترل Off- Line (نگاشت معکوس) از پارامترهای ورودی EDM ۱۰۷
شکل ۶-۱۳: شماتیک کنترل شدت جریان در EDM ۱۱۱

شکل ۶-۱۴: نمایش توابع عضویت (گاوسی) فازی نرخ باربرداری در EDM ۱۱۲
شکل ۶-۱۵: نمایش توابع عضویت (گاوسی) فازی زبری سطح در EDM ۱۱۳
شکل ۶-۱۶: لیست قوانین فازی (ANFIS 1) مربوط به کنترل شدت جریان در فرآیند EDM ۱۱۳
شکل ۶-۱۷: شماتیک تصمیم‌گیری فازی در تعیین شدت جریان فرآیند EDM ۱۱۴
شکل ۶-۱۸: نمایش سه بعدی پایگاه قوانین فازی مربوط به کنترل شدت جریان در EDM ۱۱۴

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۴-۱: پایگاه قوانین فازی برای حرکت الکترود ۵۲
جدول ۵-۱: مقادیر واقعی و کد شده فاکتورهای ورودی آزمایش EDM خشک در طرح CCD ۶۵
جدول ۵-۲: مقادیر واقعی فاکتورهای ورودی آزمایشEDM ۶۶
جدول ۵-۳: فاکتورهای ورودی و نتایج خروجی ها در EDM خشک ۶۷
جدول ۵-۴: ۴۵ داده مربوط به تمرین و آموزش مدل در EDM خشک ۶۸
جدول ۵-۵: ۸ نمونه تست انتخابی برای ارزیابی مدل مربوط به EDM خشک ۶۹
جدول ۵-۶: فاکتورهای ورودی و نتایج خروجی ها در EDM ۶۹
جدول ۵-۷: نمونه تست برای ارزیابی مدل‌ها در EDM ۷۱
جدول ۶-۱: جدول ANOVA اولیه برای نرخ براده برداری در EDM خشک ۷۳
جدول ۶-۲: جدول ANOVA اصلاح شده برای نرخ براده برداری در EDM خشک ۷۴
جدول ۶-۳: جدول تحلیل واریانس اولیه برای زبری سطح ۷۶
جدول ۶-۴: جدول تحلیل واریانس اصلاح شده برای زبری سطح ۷۷
جدول ۶-۵: نتایج مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۷۹
جدول ۶-۶: ارزیابی مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۸۰
جدول ۶-۷: نتایج مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۸۰
جدول ۶-۸: : ارزیابی مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۸۱
جدول ۶-۹: نتایج مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۸۲
جدول ۶-۱۰: ارزیابی مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۸۲
جدول ۶-۱۱: نتایج مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی زبری سطح ۸ نمونه تست ۸۳
جدول ۶-۱۲: ارزیابی مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی زبری سطح ۸ نمونه تست ۸۳
جدول ۶-۱۳: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ولتاژ ۸ نمونه تست ۸۵
جدول ۶-۱۴: ارزیابی کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ولتاژ ۸ نمونه تست ۸۶
جدول ۶-۱۵: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌ب‌ینی جریان ۸ نمونه تست ۸۶
جدول ۶-۱۶: ارزیابی کنترلرهای فازی در پیش‌بینی جریان ۸ نمونه تست ۸۷
جدول ۶-۱۷: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی زمان روشنی پالس ۸ نمونه تست ۸۷
جدول ۶-۱۸: ارزیابی کنترلرهای فازی در پیش‌بینی زمان روشنی پالس ۸ نمونه تست ۸۸

جدول ۶-۱۹: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ضریب بهره پالس در ۸ نمونه تست ۸۸
جدول ۶-۲۰: ارزیابی کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ضریب بهره پالس در ۸ نمونه تست ۸۹
جدول ۶-۲۱: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی فشار گاز ۸ نمونه تست ۸۹
جدول ۶-۲۲: ارزیابی کنترلرهای فازی در پیش‌بینی فشار گاز ۸ نمونه تست ۹۰
جدول ۶-۲۳: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی سرعت دورانی اسپیندل در ۸ نمونه تست ۹۱
جدول ۶-۲۴: ارزیابی کنترلرهای فازی در پیش‌بینی سرعت دورانی اسپیندل ۸ نمونه تست ۹۱
جدول ۶-۲۵: جدول تحلیل واریانس اولیه برای نرخ باربرداری در EDM ۹۴
جدول ۶-۲۶: جدول ANOVA اصلاح شده برای نرخ براده برداری در EDM خشک ۹۵
جدول ۶-۲۷: جدول ANOVA اصلاح شده برای نرخ براده برداری در EDM ۹۶
جدول ۶-۲۸: جدول ANOVA برای نرخ براده برداری در EDM در فضای تبدیل یافته به لگاریتم طبیعی ۹۶
جدول ۶-۲۹: جدول ANOVA اصلاح شده برای نرخ براده برداری در EDM در فضای تبدیل یافته به لگاریتم طبیعی ۹۶
جدول ۶-۳۰: ارزیابی مدل‌های آماری مبتنی بر رگرسیون آماری از نرخ باربرداری در ۸ نمونه آزمایش. ۹۷
جدول ۶-۳۱: جدول تحلیل واریانس اولیه برای زبری سطح در EDM ۹۸
جدول ۶-۳۲: جدول تحلیل واریانس اصلاح شده برای زبری سطح در EDM ۹۸
جدول ۶-۳۳: جدول تحلیل واریانس مدل اصلاح شده نوع دوم برای زبری سطح در EDM ۹۹
جدول ۶-۳۴: جدول تحلیل واریانس اولیه برای زبری سطح در EDM در فضای تبدیل یافته به لگاریتم طبیعی ۱۰۰
جدول ۶-۳۵: جدول تحلیل واریانس اصلاح شده برای زبری سطح در EDM در فضای تبدیل یافته به لگاریتم طبیعی ۱۰۰
جدول ۶-۳۶: ارزیابی نتایج مدل‌های آماری از زبری سطح در۸ نمونه تست EDM ۱۰۱
جدول ۶-۳۷: نتایج مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۱۰۳
جدول ۶-۳۸: نتایج ارزیابی مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی نرخ باربرداری در ۸ نمونه تست ۱۰۳
جدول ۶-۳۹: نتایج مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۱۰۴
جدول ۶-۴۰: نتایج ارزیابی مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی نرخ باربرداری ۸ نمونه تست ۱۰۴
جدول ۶-۴۱: نتایج مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی زبری سطح ۸ نمونه تست ۱۰۵
جدول ۶-۴۲: نتایج ارزیابی مدل‌های ANFIS در پیش‌بینی زبری سطح ۸ نمونه تست ۱۰۵
جدول ۶-۴۳: نتایج مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی زبری سطح ۸ نمونه تست ۱۰۶
جدول ۶-۴۴: نتایج ارزیابی مدل‌های ANFIS غنی‌شده در پیش‌بینی زبری سطح ۸ نمونه تست ۱۰۶

جدول ۶-۴۵ : نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ولتاژ ۸ نمونه تست EDM ۱۰۸
جدول ۶-۴۶: ارزیابی نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ولتاژ ۸ نمونه تستEDM..... ۱۰۸
جدول ۶-۴۷ : نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی زمان روشنی پالس در ۸ نمونه تست EDM..... ۱۰۹
جدول ۶-۴۸: ارزیابی نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی ولتاژ در ۸ نمونه تستEDM..... ۱۰۹
جدول ۶-۴۹: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی زمان خاموشی پالس در ۸ نمونه تستEDM..... ۱۱۰
جدول ۶-۵۰: ارزیابی نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی زمان خاموشی پالس در ۸ نمونه تست EDM
..... ۱۱۰
جدول ۶-۵۱: نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی شدت جریان در ۸ نمونه تست EDM..... ۱۱۱
جدول ۶-۵۲: ارزیابی نتایج کنترلرهای فازی در پیش‌بینی شدت جریان در ۸ نمونه تست EDM..... ۱۱۲

پیشگفتار

فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی[۱] یکی از پرکاربردترین فرآیندهای ماشینکاری غیر سنتی می‌باشد. تحقیقات و پژوهش‌ها در جهت پیشبرد و توسعه این فرآیند در حال گسترش و پیشرفت می‌باشد و کاربرد این فرآیند در صنعت نیز به طور چشمگیری در حال افزایش است. امروزه این فرآیند برای تولید انواع قالب‌های صنعتی، قطعات ماشین آلات، صنایع هوافضا و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. از مهمترین مزایای ماشینکاری تخلیه الکتریکی عدم تماس فیزیکی بین ابزار و قطعه‌کار و در نتیجه عدم تأثیر خواص مکانیکی قطعه‌کار نظیر استحکام، سختی چقرمگی بر فرآیند می‌باشد. از جمله مشکلات این فرآیند سرعت کم آن، سایش الکترود، زبری سطح بالا و همچنین اثرات زیست محیطی فرآیند به جهت استفاده از دی الکتریک‌های هیدروکربنی نظیر نفت سفید و پارافین می‌باشد. با توجه به عمر کم ماشینکاری تخلیه الکتریکی (کمتر از ۷ دهه) و همچنین پیچیدگی ذاتی در ماهیت فرآیند، تاکنون تلاش‌های بسیاری در جهت کشف کامل ماهیت و بهبود آن صورت گرفته است [۱]. در این راستا و در جهت رفع مشکلات بیان شده در سال‌های اخیر تحقیقات و پژوهش‌های گسترده‌ای انجام گرفته است که در آن‌ها به جای استفاده از ماده دی‌الکتریک مایع فرآیند، از دی‌الکتریک‌های گازی بهره گرفته شده است. به ماشینکاری تخلیه الکتریکی که دی‌الکتریک آن از نوع گاز باشد اصطلاحاً ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک[۲] و در صورت ترکیب دی‌الکتریک مایع و گاز، ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی نیمه خشک[۳] یا نزدیک به خشک[۴] گفته می‌شود.

با توجه به ماهیت ناشناخته ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی و همچنین عدم دسترسی به یک معادله دیفرانسیل از ورودی‌ها و خروجی‌ها، کنترل این فرآیند با روش‌های معمول انعطاف و کارآیی چندانی ندارد. سیستم‌های استنتاج فازی[۵] قابلیت بالایی در مدلسازی و کنترل سیستم‌های اغتشاشی[۶] ، خصوصاً برای فرآیندهای موسوم به جعبه سیاه[۷] که رابطه‌ی دقیق و معلومی میان ورودی‌ها و خروجی‌های آن موجود نباشد، داراست.

---

[۱] EDM: Electrical Discharge Machining

[۲] DEDM: Dry Electrical Discharge Machining (Dry EDM)

[۳] Semi Dry EDM

[۴] Near Dry

[۵] Fuzzy Inference System

[۶] stochastical systems

[۷] Black Box

در این تحقیق ضمن بیان اصول ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی سنتی، خشک و نیمه‌خشک اشاره‌ای مختصر به ساخت دستگاه ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی خشک شده است و برای مدلسازی و کنترل فرآیند چه در حالت سنتی و چه در حالت خشک یک سری آزمایش‌ها صورت گرفته که به طور کامل مورد بررسی و تحلیل آماری قرار گرفته است و پس از آن بررسی و مقایسه مدل‌های آماری و فازی و همچنین کنترل فازی فرآیند ارائه گردید. به منظور جامعیت پژوهش تمامی مراحل مدلسازی و کنترل برای ماشینکاری تخلیه‌الکتریکی -که بطور گسترده‌ای در صنایع مورداستفاده قرار می‌گیرد- نیز انجام شده است.

لازم به ذکر است این تحقیق برای اولین بار در کشور بر روی این فرآیند صورت می‌گیرد و با توجه به اهمیت ماشینکاری تخلیه الکتریکی و گسترش آن حتی در کارگاه‌های کوچک ایران و جهان، ضروریست تحقیقات لازم در جهت بهره بردن هرچه بهتر از این فرآیند، و بررسی جدیدترین پژوهش‌های صورت گرفته بر روی این فرآیند در کشور صورت پذیرد. طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های آماری طراحی آزمایش‌ها [۱] و تحلیل واریانس[۲] و روش سطح پاسخ [۳] که ابزاری شناخته شده و پرکاربرد در تحقیقات علمی هستند انجام شده و با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری مینیتب نسخه ۱۶[۴] طراحی، مدلسازی و بهینه‌سازی صورت گرفته است.

عمده مطالب این پایان نامه به هفت فصل زیر به انضمام پیوست تقسیم بندی می‌شود:

- در فصل اول سعی شده است مروری جامع بر منابع و پژوهش‌های اخیر صورت پذیرد.
- در فصل دوم توضیح مختصری پیرامون اصول ماشینکاری تخلیه الکتریکی و انواع آن مطرح شده است.
- در فصل سوم تکنیک‌های طراحی آزمایش و روش‌های آماری مختصراً معرفی شده‌اند.
- در فصل چهارم مقدمه‌ای بر منطق فازی و سیستم‌های استنتاجی مورد استفاده در محاسبات فازی گردآوری شده اند.
- فصل پنجم شامل معرفی تجهیزات و طراحی و نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج بدست آمده آنهاست.
- در فصل ششم به پردازش و تحلیل داده‌ها (اعم از مدلسازی و کنترل فازی) و نتایج آزمایش‌ها پرداخته شده است.
- در فصل هفتم نیز جمع‌بندی نتایج بدست آمده و ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی گردآوری شده است.

---

[۱] Design Of Experiment

[۲] ANOVA

[۳] Response Surfase Method

[۴] Minitab 16

معرفی الگوریتم سیستم‌های استنتاجی فازی- عصبی- تطبیقی[1] و دستورالعمل کاربردی در فضای نرم‌افزار MATLAB نیز در بخش پیوست ارائه شده است.

[1] ANFIS: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System