بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

اثر پارامترهای مؤثر بر خطاهای ماشینکاری چندمحورهٔ پره‌ها

نگارش:
بهنام مقدم

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

استاد راهنما:
دکترمحمد صدیقی

اسفند ۱۳۸۴

چکیده:

پیچیدگی هندسی و دقت موردنیاز در ساخت پره‌های کمپرسور، موجب عدم توانایی روشهای معمول ماشینکاری در تولید آنها می‌باشد. از این رو به نظر می‌رسد ماشینکاری چندمحوره، تنها راه حل موجود برای ساخت این قطعات پیچیده در صنایع هوایی باشد. ولی بدلیل وجود حرکت‌های دورانی در ماشینهای پنج‌محوره، در ساخت قطعات پیچیده با تکنولوژی چندمحوره، امکان بروز خطاهای اضافی مانند تداخل ابزار با سطح نیز وجود دارد. این خطاها معمولاً در روشهای تولید مسیر ابزار بوسیلهٔ سیستمهای CAD/CAM و در فرآیند برش روی ماشین‌ابزار ظاهر می‌شوند. از این رو در این پایان‌نامه پس از شناسایی منابع اصلی بوجودآورندهٔ خطا، یک روش برای ارزیابی دقت ماشینکاری سطوح پیچیده پیشنهادشده‌است. برای پیشگیری از خطاهای تداخل موضعی و سرتاسری ابزار با سطح پره، از شبیه‌سازی ماشینکاری در محیط نرم‌افزار Vericut استفاده شده‌است. مقایسهٔ دقت ابعادی مدل حاصل از ماشینکاری و مدل طراحی با استفاده از این نرم‌افزار با موفقیت انجام شد. بدین ترتیب نیاز به آزمایشات ماشینکاری و بازرسیهای ابعادی کاهش یافته و اجتناب از تداخل ابزار در فاز طراحی فرآیند و قبل از مرحلهٔ ساخت انجام می‌گیرد. استراتژی پیشنهادی همچنین در ماشینکاری پرهٔ کمپرسور بکارگرفته‌شد. در این راستا یک نمونه پره انتخاب و پس از استخراج برنامه‌های ماشینکاری از چند روش، عملیات ماشینکاری به کمک دستگاه CNC چهار و پنج‌محوره انجام گردید. اثر انواع تکنیک‌های فرزکاری و روشهای کنترل محور ابزار در کیفیت سطح پره نیز بررسی شدند. نتایج نشان دادند که صافی سطح در جهت پیشروی ابزار، در استراتژیهای ماشینکاری پنج‌محوره نسبت به حالت چهارمحوره بهتر است. اما در جهت عمود بر پیشروی، نتایج کاملاً برعکس است. ضمن اینکه اختلاف بسیار زیاد زمان ماشینکاری چهارمحوره نسبت به پنج‌محوره نشان دادکه استفاده از تکنولوژی چهارمحوره قابلیت تولید را افزایش می‌دهد.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم از راهنمایی‌های استاد گرامی جناب آقای دکتر صدیقی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری‌نموده‌اند، تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از حمایت و راهنمایی مدیریت و کارکنان مهندسی تدوین تکنولوژی صنعت ساخت موتورهای توربینی، به ویژه آقایان جلیلیان، رفیعی، باقری، زمانی و سایر همکاران عزیز در این قسمت قدردانی می‌نمایم. در انتها نیز از همهٔ دوستانی که با زحمات و محبتهای خود مرا در انجام و ارائه این پروژه یاری نموده‌اند سپاسگزارم.

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- پیشینهٔ پژوهش ۳

۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۶

فصل دوم: ماشینکاری چندمحوره

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- ماشینهای پنج محوره ۹

۲-۲-۱- دیاگرام زنجیره حرکتی ماشین ۱۰

۲-۲-۲- طبقه بندی ساختار حرکتی ماشینهای پنج محوره ۱۱

۲-۲-۳- انتخاب پیکربندی محورها ۱۷

۲-۳- کاربرد ماشینهای پنج محوره ۱۸

۲-۳-۱- موقعیت دهی پنج محوره ۱۸

۲-۳-۲- محیط تراشی پنج محوره ۱۹

۲-۴- مزایای ماشینکاری پنج محوره ۲۰

۲-۵- سینماتیک ماشینهای پنج‌محوره ۲۲

۲-۵-۱- مدلسازی حرکتی ماشینهای TRT ۲۲

۲-۵-۲- محاسبات مختصات ماشین ۲۴

۲-۶- نتیجه‌گیری ۲۶

فصل سوم: طراحی مسیر ابزار در ماشینکاری چندمحوره

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- هندسه‌های مورد استفاده در طراحی عملیات ماشینکاری ۲۸

۳-۳- روشهای هدایت مسیر ابزار ۲۹
۳-۳-۱- هدایت مسیر ابزار با نقطه / منحنی ۳۰
۳-۳-۲- هدایت مارپیچی مسیر ابزار ۳۱
۳-۳-۳- هدایت ابزار در یک مرز بسته ۳۱
۳-۳-۴- هدایت مسیر ابزار روی سطح ۳۲
۳-۳-۵- هدایت ابزار با مسیر ابزار موجود ۳۳
۳-۴- استراتژی‌های کنترل محور ابزار در ماشینکاری چندمحوره ۳۴
۳-۴-۱- محور ابزار گذرنده از یک نقطه یا خط ۳۵
۳-۴-۲- محور ابزار گذرنده از یک منحنی ۳۷
۳-۴-۳- موقعیت‌دهی محور ابزار نسبت به سطح ماشینکاری ۳۸
۳-۴-۴- موقعیت‌دهی محور ابزار نسبت به سطح هادی ۴۰
۳-۴-۵- ماشینکاری پنج‌محوره با استراتژی محور مماس ۴۲
۳-۴-۶- ماشینکاری پنج‌محوره با استراتژی میانیابی ۴۴
۳-۴-۷- کنترل محور ابزار همانند مسیر ابزار موجود ۴۴
۳-۵- روشهای موقعیت‌دهی ابزار روی سطح ماشینکاری ۴۵
۳-۶- پارامترهای برش در ماشینکاری چندمحوره ۴۷
۳-۶-۱- تلرانس ماشینکاری ۴۷
۳-۶-۲- گام برش ۴۸
۳-۶-۳- ماکزیمم تغییر محور ابزار ۵۰
۳-۷- نتیجه‌گیری ۵۱

فصل چهارم: منابع خطا در ماشینکاری چندمحوره

۴-۱- مقدمه ۵۳
۴-۲- تعاریف و مفاهیم اولیه خطا ۵۳
۴-۲-۱- دقت و خطا ۵۳
۴-۲-۲- بودجه خطا ۵۴
۴-۲-۳- خطای حجمی ۵۴
۴-۳- منابع خطا و دسته‌بندی آنها ۵۵
۴-۳-۱- خطاهای ماشین ۵۵
۴-۳-۲- خطاهای قید و بند ۶۰
۴-۳-۳- خطای تغییر شکل ناشی از نیروهای برش در ابزار و قطعه‌کار ۶۱

۴-۳-۴- خطاهای حاصل از تعریف سطح هندسی ۶۴
۴-۳-۵- ارزیابی و کنترل خطای اسکالپ ۷۰
۴-۳-۶- میانیابی مسیر ابزار ۷۳
۴-۳-۷- خطاهای ناشی از تمایل ابزار ۸۳
۴-۳-۸- تغییرات زاویه‌ای ناگهانی ابزار ۸۶
۴-۴- اثر تکنیکهای براده‌برداری در صافی سطح و دقت ابعادی ۹۰
۴-۵- نتیجه‌گیری ۹۶

فصل پنجم: مطالعه تجربی اثر خطاهای ماشینکاری چند محوره و روشهای کاهش آنها در تولید پره‌ها

۵-۱- مقدمه ۹۸
۵-۲- هندسهٔ پره مورد مطالعه ۹۹
۵-۳- دستگاه CNC مورد استفاده ۱۰۲
۵-۴- طراحی ماشینکاری پره ۱۰۳
۵-۴-۱- طراحی مسیر ابزار با استفاده از استراتژیهای مختلف ۱۰۳
۵-۴-۲- پست‌کردن برنامه ۱۰۶
۵-۴-۳- شبیه‌سازی ماشینکاری ۱۰۸
۵-۴-۴- استراتژی‌های کنترل محور ابزار در ماشینکاری چندمحورهٔ پره‌های بلیسک ۱۱۰
۵-۵- عملیات ماشینکاری پره ۱۲۵
۵-۶- مقایسهٔ دقت ابعادی و صافی سطح پره‌ها ۱۲۶
۵-۶-۱- اندازه‌گیری CMM ۱۲۶
۵-۶-۲- اندازه‌گیری صافی سطح ۱۲۷
۵-۷- مقایسه و تحلیل نتایج ۱۲۸
۵-۸- نتیجه‌گیری ۱۳۱

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- جمع‌بندی ۱۳۳
۶-۲- دستاوردها ۱۳۳
۶-۳- پیشنهادهای آتی ۱۳۴

مراجع ۱۳۶

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱- ماشین ابزار پنج‌محوره ۱۰
شکل ۲-۲- دیاگرام زنجیرهٔ حرکتی ماشین پنج‌محوره ۱۰
شکل ۲-۳- ماشین $XYZA'B'$ ۱۲
شکل ۲-۴- ماشین XBYAZ ۱۲
شکل۲-۵- ماشین $X'Z'CAY$ ۱۴
شکل۲-۶- ماشین $B'C'ZYX$ ۱۴
شکل۲-۷- ماشین $Z'X'C'BY$ ۱۵
شکل۲-۸- ماشین $Z'A'B'YX$ ۱۵
شکل۲-۹- انواع ماشینهای پنج‌محوره: الف) محورهای دورانی روی میز ب) محورهای دورانی روی اسپیندل ج) محورهای دورانی روی میز و اسپیندل ۱۷
شکل۲-۱۰- موقعیت دهی پنج محور ۱۸
شکل۲-۱۱- محیط‌تراشی پنج محوره ۱۸
شکل۲-۱۲- کاربرد ماشینکاری چندمحوره در صنایع مختلف ۱۹
شکل۲-۱۳- حرکت همزمان بیش از سه محور و ماشینکاری قطعات خمیده با ابزار سر تخت ۲۰
شکل۲-۱۴- استفاده از ابزار کوتاهتر در ماشینکاری پنج محوره ۲۱
شکل۲-۱۵- تغییرات سطح تماس ابزار در ماشینکاری سه‌محوره و کاهش آن با ماشینکاری چندمحوره ۲۱
شکل۲-۱۶- داده‌های موقعیت ابزار فرز سرگرد در ماشینکاری پنج‌محوره ۲۲
شکل۲-۱۷- سینماتیک ماشین فرز پنج‌محورهٔ TRT ۲۳
شکل۲-۱۸- سیستم‌های مختصات برای ماتریس انتقال ۲۴
شکل۳-۱- سطوح هادی و ماشینکاری ۲۹
شکل۳-۲-کاربرد سطوح ممنوع در ماشینکاری ۲۹
شکل۳-۳- هدایت ابزار به روش الف) نقطه ب) منحنی ۳۰
شکل ۳-۴- هدایت مارپیچی مسیر ابزار ۳۱

شکل ۳-۵- هدایت ابزار در یک مرز بسته ۳۲
شکل۳-۶- هدایت ابزار روی سطح هادی ۳۳
شکل۳-۷- هدایت ابزار با مسیر ابزار موجود ۳۳
شکل۳-۸- بردار محور ابزار ۳۴
شکل۳-۹- ماشینکاری با محور ثابت و محور متغیر ۳۴
شکل۳-۱۰- ماشینکاری با محور ثابت الف) بردار واحد ب) نقاط انتهایی خط ج) دو نقطه د) مختصات کروی ه) مماس بر منحنی ۳۵
شکل۳-۱۱- محور ابزار گذرنده از یک نقطه در ماشینکاری پنج‌محوره ۳۶
شکل۳-۱۲- محور ابزار گذرنده از یک خط در ماشینکاری پنج‌محوره ۳۶
شکل۳-۱۳- کنترل چهارمحورهٔ ابزار گذرنده از نقطه ۳۶
شکل۳-۱۴- کنترل پنج‌محورهٔ ابزار گذرنده از نقطه ۳۷
شکل۳-۱۵- ماشینکاری با محور ابزار گذرنده از یک منحنی الف) پنج‌محوره ب) چهارمحوره ۳۷
شکل۳-۱۶- محور ابزار عمود بر سطح ماشینکاری ۳۸
شکل۳-۱۷- ماشینکاری چهارمحوره و زوایای محور ابزار نسبت به سطح ماشینکاری ۳۹
شکل۳-۱۸- زاویهٔ پیشروی در ماشینکاری چهار و پنج‌محوره ۳۹
شکل۳-۱۹- زوایای محور ابزار در ماشینکاری چهارمحوره الف) زاویهٔ پیشروی ب) زاویهٔ جانبی ۴۰
شکل۳-۲۰- زوایای پیشروی و جانبی در ماشینکاری پنج‌محوره ۴۰
شکل۳-۲۱- محور ابزار عمود بر سطح هادی برای سطوح پیچیده ۴۱
شکل۳-۲۲- بردار تصویرگر الف)عمود بر سطح هادی ب)همراستا با محور ابزار و موازی با سطح مماس ۴۲
شکل۳-۲۳- کنترل محور ابزار مماس بر سطح هادی ۴۳
شکل۳-۲۴- محور ابزار مماس بر سطح ماشینکاری ۴۳
شکل۳-۲۵- محور ابزار میانیابی شده ۴۴
شکل۳-۲۶- محور ابزار همانند مسیر ابزار موجود ۴۵
شکل۳-۲۷- موقعیت‌دهی ابزار به روش ON و TANTO ۴۵
شکل۳-۲۸- موقعیت‌دهی ON و TANTO در ماشینکاری سطح هادی ۴۶
شکل۳-۲۹- موقعیت‌دهی ON و TANTO در صورت یکی بودن سطح هادی و ماشینکاری ۴۶
شکل۳-۳۰- تلرانس ماشینکاری و تعیین مجزای مقادیر تلرانس مثبت و منفی ۴۷
شکل۳-۳۱- محاسبهٔ نقاط موقعیت ابزار با درنظرگرفتن تلرانس و انحنای موضعی سطح ۴۸
شکل۳-۳۲- گام برش در مسیر ابزار ۴۹
شکل۳-۳۳- نادیده گرفتن هندسهٔ ماشینکاری بخاطر گام برش بزرگ ۴۹
شکل۳-۳۴- شناسایی دقیق هندسهٔ ماشینکاری با کاهش گام برش ۵۰

شکل۳-۳۵- ماکزیمم تغییر محور ابزار و اثر آن بر تعداد گامهای برش ۵۱
شکل۴-۱- خطای حجمی مدار بسته ۵۵
شکل۴-۲- تغییرشکل‌های حرارتی روی ماشین‌ابزار ۵۹
شکل۴-۳- تغییر شکل قطعه‌کار در ماشینکاری محیطی تیغه‌های نازک ۶۱
شکل۴-۴- مدلهای تغییرشکل ابزار ۶۳
شکل۴-۵- منحنی Cubic spline ۶۵
شکل۴-۶- گذار بین دو منحنی Bezier ۶۷
شکل۴-۷- منحنی‌های B-spline و واکنش آنها به مرتبه منحنی ۶۸
شکل (۴-۸) تأثیر تکرار یک گره بر منحنی B-spline ۶۹
شکل ۴-۹- جهت و حرکت ابزار و پارامترهای مسیر ابزار ۷۲
شکل۴-۱۰- اثر هندسهٔ ابزار و زاویهٔ تمایل آن بر ارتفاع اسکالپ ۷۳
شکل۴-۱۱- مسیر ابزار NURBS در ماشینکاری با محورابزار ثابت ۷۴
شکل۴-۱۲- روش معمول در ماشینکاری مسیر منحنی ۷۶
شکل ۴-۱۳- خطای وتری ۷۷
شکل۴-۱۴- سطح خمیده محدب/ مقعر- نقاط CL و CC ۷۹
شکل۴-۱۵- جهت ابزار و زوایای آن در روی سطح ۷۹
شکل۴-۱۶- مسیرهای تئوری و خطای انحراف مسیر CC در ماشینکاری پنج‌محوره ۸۰
شکل۴-۱۷- تداخل ابزار در ماشینکاری پنج‌محوره (الف) کندن موضعی (ب) برخورد سراسری ۸۳
شکل ۴-۱۸- خطای تمایل ابزار ۸۵
شکل۴-۱۹- علامت‌های نقطه‌ای روی پره توربین در اثر دوران ابزار(A) در ماشینکاری پنج‌محوره ۸۷
شکل۴-۲۰- مسیر حلقه‌ای ابزار در فضا در اثر زوایای دوران نامناسب ۸۸
شکل۴-۲۱- یک سری از دوران‌های مناسب برای تغییر جهت ابزار ۸۸
شکل۴-۲۲- حالتهای حرکت زاویه‌ای ابزار در بالای برآمدگی ۸۹
شکل۴-۲۳- تکنیکهای براده‌برداری (الف) ماشینکاری موافق و (ب) ماشینکاری مخالف ۹۱
شکل۴-۲۴- تغییر ضخامت براده در (الف) ماشینکاری موافق (ب) ماشینکاری مخالف ۹۲
شکل۴-۲۵- بلیسک روتور کمپرسور و ماشینکاری پنج‌محورهٔ پره‌های آن ۹۳
شکل۴-۲۶-سطح پرهٔ تولیدشده باماشینکاری پنج‌محوره(الف)ماشینکاری موافق(ب)ماشینکاری مخالف ۹۳
شکل۴-۲۷-مقایسه زبری سطح در جهت پیشروی ۹۴
شکل۴-۲۸-مقایسه زبری سطح در جهت عمود بر پیشروی ۹۴
شکل۴-۲۹- پرهٔ سکتور و ماشینکاری سه‌محورهٔ آن ۹۵
شکل۴-۳۰- مقایسه زبری سطح در جهت عمود بر پیشروی ۹۵

شکل۵-۱- روتور کمپرسور به شکل بلیسک ۹۹
شکل ۵-۲- پروفیل پره و اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن ۱۰۰
شکل۵-۳- دسته‌بندی پره‌ها از لحاظ شکل هندسی و روش ماشینکاری ۱۰۱
شکل ۵-۴- ماشین پنج‌محوره مورد استفاده ۱۰۲
شکل ۵-۵- عدم امکان ماشینکاری عمود بر سطح ناشی از فضای کم مابین پره‌ها ۱۰۴
شکل ۵-۶- روش استاندارد تولید برنامه‌های کنترل عددی ۱۰۶
شکل ۵-۷- پیش بینی خطاهای برخورد ابزار با ماشین و متعلقات آن در محیط Vericut ۱۰۹
شکل۵-۸- استراتژی محور ابزار گذرنده از یک منحنی در نرم‌افزار Surfcam ۱۱۱
شکل ۵-۹- مسیر ابزار طراحی شده با کنترل محور ابزار گذرنده از یک منحنی ۱۱۲
شکل۵-۱۰- فاصله نقطهٔ لولای محورهای دورانی از مرکز ماشینکاری ۱۱۲
شکل۵-۱۱- استفاده از Linearization برای کنترل بیشتر تلرانس مسیر ابزار ۱۱۳
شکل ۵-۱۲- تیزشدن لبه فرار پره در اثر تداخل موضعی ابزار در ماشینکاری چهارمحوره ۱۱۴
شکل۵-۱۳- مسیر ابزار در ماشینکاری چهارمحوره نسبت به سطح ماشینکاری ۱۱۵
شکل ۵-۱۴- تغییرات انحنا در پروفیل مدل پره ۱۱۵
شکل۵-۱۵- مدل پروفیلهای افست شده الف-مدل یک پروفیل ب-مدل مقاطع مختلف ۱۱۶
شکل۵-۱۶- سطح هادی حاصل از افست ثابت مقاطع و مسیرابزار تولیدشده به‌کمک آن ۱۱۸
شکل۵-۱۷- سطح هادی حاصل از افست متغیر مقاطع و مسیرابزار تولیدشده به‌کمک آن ۱۱۸
شکل۵-۱۸- چین‌خوردگیهای مشاهده‌شده در مسیر ابزار و اثر آن بر روی سطح ۱۱۹
شکل۵-۱۹- آنالیز سطح پره و تغیر انحنای آن در لبه ۱۱۹
شکل۵-۲۰- اصلاح ماشینکاری با کاهش زاویه تمایل ۱۱۹
شکل۵-۲۱- مسیرابزار تولید شده با استفاده از روش پنج‌محوره کنترل محور ابزار نسبت به سطح هادی و چروکهای مسیر در لبهٔ پره ۱۲۱
شکل ۵-۲۲- ماشینکاری پنج‌محوره و افزایش احتمال برخورد ابزار با پره‌های مجاور ۱۲۱
شکل۵-۲۳- اصلاح خطاهای مسیر ابزار با استفاده از استراتژی محور مماس ۱۲۱
شکل ۵-۲۴- برخورد ابزار در ماشینکاری پره‌های بسیار پیچیده با کنترل ابزار نسبت به سطح ۱۲۲
شکل ۵-۲۵- ناتوانی روش محور مماس در ماشینکاری سطوح بسیار پیچیده ۱۲۲
شکل۵-۲۶- اثرات نامطلوب ناشی از تغییر زاویه‌ای ناگهانی ابزار ۱۲۳
شکل ۵-۲۸- نمایی از پره‌های تولیدی با استراتژی‌های مختلف ۱۲۵
شکل۵-۲۹- پروفیل زبری سطح ۱۲۷
شکل۵-۳۰- مناطق اندازه‌گیری زبری سطح پره ۱۲۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول۴-۱- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم 2618 ۹۳
جدول۴-۲- پارامترهای ماشینکاری پره‌های روتور در مرحلهٔ پرداخت به صورت پنج‌محوره ۹۳
جدول۴-۳- پارامترهای ماشینکاری سکتور ۹۵
جدول ۵-۱- پارامترهای طراحی مسیر ابزار ۱۱۱
جدول۵-۲- مقایسه تعداد گامهای مسیر ابزار و اصلاح مسیر در پست‌پروسسور ۱۱۳
جدول۵-۳- مقایسهٔ مقاطع مختلف قطعات ماشیتکاری با قطعهٔ اصلی ۱۲۶
جدول ۵-۴- مقایسهٔ زبری سطح و زمان پرداختکاری یک پره و تأثیر استراتژیهای مختلف بر آنها ۱۲۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

سطوح خمیده و پیچیده به طور وسیعی در صنایع هوافضا، خودروسازی، توربوماشین‌ها وصنایع قالب‌سازی استفاده می‌شوند. قطعاتی از قبیل پره‌های کمپرسور معمولاً دارای اشکال پیچیده و توزیع انحنای نامنظمی هستند که سبب بروز مشکلاتی در برنامه‌نویسی ماشینکاری کنترل عددی می‌شوند. در عمل، هر چند ماشینکاری پنج‌محوره نسبت به ماشینکاری سه محوره دارای مزایای بسیاری از قبیل قابلیت تولید بالاتر و پرداخت سطح بهتر می‌باشد، ولی مسائل تکنیکی پیچیده‌تری را پدید می‌آورد. این مشکلات شامل پشتیبانی عملیاتی ناکافی بوسیلهٔ سیستم‌های CAD/CAM، الگوریتم‌های بسیار پیچیده برای اجتناب از کندن سطح و تشخیص خطاهای ماشینکاری سطوح پیچیده ناشی از روشهای برنامه‌نویسی کنترل عددی می‌باشد.

در قطعاتی مانند پره‌های کمپرسور، برای تضمین دینامیک سیال قابل قبول، انحراف فرم بین طراحی و ماشینکاری باید کنترل شود. همچنین به منظور راندمان بالاتر، دقت و پرداخت سطح بهتری موردنیاز می‌باشد.

اما از آنجاییکه در ماشینکاری پنج محورهٔ سطوح خمیده منابع خطای بسیاری از قبیل خطاهای هندسی و حرارتی ماشین، خطاهای تغییرشکل ناشی از نیروهای برش، خطاهای مسیر تماس ابزار برش، خطای اسکالپ[1] در ایجاد مسیر ابزار و بسیاری از خطاهای دیگر وجوددارند، شناسایی این خطاها و پارامترهای مؤثر بر آنها قبل از انجام ماشینکاری واقعی اهمیت بسیاری دارد.

از سوی دیگر، به منظور کاهش زمان طراحی فرآیند ماشینکاری نیز، رفته‌رفته روشهای تحلیلی و نرم‌افزاری جایگزین ماشینکاری واقعی می‌شوند. دراین روشها برخی خطاهای رایج مانند برخورد ابزار پیش‌بینی می‌شوند و پارامترهای مؤثر جهت اجتناب از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین بایستی از استراتژیهای ماشینکاری چندمحوره‌ای استفاده کرد که ضمن تأمین دقت وکیفیت قابل‌قبول، بتوانند با تولید قطعه در زمان کمتر قابلیت تولید را نیز افزایش‌دهند.

[1] Scallop

۱-۲- پیشینهٔ پژوهش

تحقیقات زیادی در زمینهٔ خطاهای موجود در ماشینهای پنج‌محوره صورت‌گرفته‌است که عمدهٔ این فعالیتها را می‌توان در زمینه‌های مدلسازی خطاها، بررسی اجزای خطا، اندازه‌گیری خطاهای ماشین‌ابزار، تعیین حد مجاز برای هر مؤلفهٔ خطا و خطاهای تولید مسیر ابزار در سیستم CAM و ماشینهای CNC برشمرد. ضمن اینکه محققین بسیاری تلاش کرده‌اند سیستمهایی را برای جبران این خطاها بکاراندازند.

بررسی منابع خطا و روشهایی برای رفع خطا در ماشین‌ابزارها توسط Ramesh و همکارانش[۱] مورد مطالعه قرارگرفت. گزارش آنها بیشتر بر روی جزئیات اندازه‌گیری‌ها و روشهای جبران خطای استفاده‌شده در گذشته تمرکز یافته‌است. از این بررسی دریافت می‌شود که در تحقیقات گذشته مرحلهٔ اول در جبران خطا یعنی مدلسازی خطا مورد غفلت واقع شده‌است. در این تحقیق خطاهای ناشی از نیروی برش و همچنین خطاهای وابسته به فیکسچر مورد بررسی قرارگرفته و روشهایی نیز برای کاهش آنها پیشنهاد می‌شود. Weck [۲] شرحی از تغییر شکلها و خطاهای ثابت یا متناوب برای حرکت در طول یک یا چند محور خطی ارائه کرده‌است. براین‌اساس هر محور یک خطای موقعیت، دو خطای مستقیم‌بودن و سه خطای زاویه‌ای دارد. در نتیجه۲۱ تغییرشکل مجزا برای ماشین سه‌محوره حاصل‌می‌شود. وی همچنین یک طبقه‌بندی سیستماتیک از خطاها و راههایی برای اندازه‌گیری آنها تهیه‌نمود. یک مدلسازی کلی از خطاهای ماشین پنج‌محوره توسط Soons [۳] و همکارانش صورت گرفته‌است. آنها مدل پیشنهادی خود را بر اساس روابط سینماتیک زنجیرهٔ حرکتی ابزار و قطعه‌کار بنا نهادند. برای هر حلقهٔ زنجیره، خطاهای انتقالی و دورانی به عنوان تغیر اضافه‌شده مطرح می‌شوند. Srivastava [۳] روشی را بر اساس بررسی مستقیم تغییرشکل اجزاء و اتصالات بکار گرفت. در این روش انتقالها و دوران‌ها بصورت ماتریسهای وابسته به زمان مدلسازی می‌شوند. در نتیجه یک خطای کلی به عنوان تابعی از همهٔ خطاها حاصل‌می‌شود. استراتژی جبران خطا نیز بر اساس محاسبهٔ خطای موقعیت ابزار و اصلاح دستور CNC بنا شده‌است.

پیش‌بینی نیروهای برش و خطاهای ماشینکاری در ماشینکاری سطوح خمیده با ابزار سرگرد توسط Ikua و Tanaka [۴و۵] مورد بررسی قرار گرفت. آنها نیروهای برش را بر اساس تئوری برش مایل ارزیابی کردند. سپس اثرات این نیروها روی تغییرشکل ابزار و خطاهای ماشینکاری ناشی از آن در قسمتهای مختلف سطح را محاسبه نمودند. همچنین تأثیر شرایط برش مختلف و انواع سبک‌ها و روشهای ماشینکاری بر روی نیروهای برش و خطاهای ماشینکاری مورد مطالعه قرارگرفتند. نتایج تئوری و عملی این تحقیق نشان‌داد که زاویهٔ موقعیت ابزار فرز، مؤلفه‌هایی از نیروی برش را که در خطاهای ماشینکاری مؤثرند، تحت تأثیر قرارمی‌دهد و بطورکلی خطای ماشینکاری با افزایش این زاویه کاهش‌می‌یابد. Tsai و Liao [۶] یک مدل نیرو- برش مناسب برای تحلیل خطاهای ابعادی در ماشینکاری محیطی قطعات نازک ارائه‌کردند. آنها با مدلسازی ابزار شیار مارپیچی به صورت یک تیر یک سرگیردار از قبل‌تابیده‌شده توانستند هندسهٔ ویژه و رفتار ساختاری برش را بطور دقیق شبیه‌سازی‌کنند. سپس با استفاده از روش اجزاء محدود پس از تعیین انحراف‌های ابزار و قطعه‌کار، مقدار خطای ابعادی سطح قطعه را در نقاط مختلف محاسبه و پیش‌بینی نمودند. از این بررسی دریافت‌شد که در ماشینکاری محیطی قطعات انعطاف‌پذیر حتی زمانی که نرخ برداشت فلز خیلی پایین است، خطاهای ابعادی سطح بسیار جدی می‌باشند.توصیف خطای موقعیت ابزار در فرزکاری توسط Landon و همکارانش [۷] انجام‌گرفت. آنها با درنظرگرفتن تغییر شکل مجموعهٔ ابزار- ابزارگیر- اسپیندل خطای موقعیت ابزار و در نتیجه خطاهای حاصل در فرزکاری را مدلسازی نمودند. سپس از این مدل برای پیش‌بینی خطاهای ماشینکاری بر حسب نوع آن و همچنین برای جبران آنها استفاده‌نمودند.

خطاهای معمول در حین ماشینکاری پنج‌محوره توسط Bohez [۸] به صورت اجمالی مورد بررسی قرار گرفته‌است. وی ضمن برشمردن خطاهای سیستماتیک در ماشینهای پنج‌محوره، خطاهای حادث‌شده بخاطر تولید مسیر پنج‌محوره در سیستم‌های CAD/CAM و CNC را مورد تحلیل قرارمی‌دهد. همچنین یک استراتژی جدید برای اندازه‌گیری و جبران این خطاها پیشنهاد می کند. Menq و Lim [۹] طرحی جامع برای ماشینکاری دقیق سطوح پیچیده ارائه‌نمودند. آنها با استفاده از استراتژی سطح کنترل، خطاهای ابعادی بوجودآمده در

ماشینکاری سطوح خمیده با ابزار سرگرد را جبران‌کردند. در روش پیشنهادی آنها خطاهای ماشینکاری در اثر تغییرشکلهای برش با بکارگیری یک مدل تولید سطح پیش‌بینی‌شده و با استفاده از سطح کنترل جدید و یک تابع حساسیت، خطاهای ابعادی نزدیک به صفر قابل دستیابی هستند. بدین ترتیب نیاز به آزمایشات ماشینکاری و بازرسیهای ابعادی حذف‌شده و جبران خطاهای ابعادی در فاز طراحی فرآیند و قبل از مرحلهٔ ساخت انجام‌می‌گیرد. استراتژی پیشنهادی همچنین در تولید پره توربین بکارگرفته‌شد و با استفاده از استراتژی سطح کنترل با روش تابع حساسیت، ماکزیمم خطای ابعادی سطح از $\pm 340\mu m$ به $\pm 10\mu m$ کاهش داده شد. Edling و همکارانش [۱۰] یکی از خطاهای رایج در ماشینکاری پنج‌محورهٔ پره‌ها را مورد مطالعه قراردادند. آنها علت پدیدآمدن نقاط دایره‌ای در هنگام انتقال ابزار از یک قسمت سطح به قسمت دیگر را بررسی‌کردند و با مطالعهٔ روشهای تولید سطح در نرم‌افزارهای CAD موفق شدند این خطا را مقداری کاهش دهند. اما هیچگاه نتوانستند آن را به طور کامل برطرف نمایند. Bohez و همکارانش [۱۱] توانستند با بهینه‌سازی دورانهای ابزار در مجاورت نقاط ایستا این خطا را به میزان زیادی برطرف نمایند. آنها یک الگوریتم جدید برای ماشینکاری پنج‌محوره و به منظور کاهش خطای حرکتی نزدیک نقاط ایستای سطح ماشینکاری در نظرگرفتند. این الگوریتم با تشخیص جهت ابزار، بر اساس یک سری از جوابهای روابط سینماتیک معکوس، دورانهای موردنیاز را طراحی‌کرده و خطاهای حرکتی از قبیل کندن سطح را به حداقل کاهش‌می‌دهد. خطاها بخاطر تولید مسیر ابزار در سیستمCAD/CAM و سیستم میانیاب CNC در ماشینکاری پنج‌محوره بسیار مهم هستند. Raman و Aekambaram [۱۲] تولید مسیر ابزار با سیستم CAM را با کاهش خطای میانیابی اصلاح‌کردند. آنها فرض نمودند که مسیر واقعی ابزار روی ماشین و بین دو نقطهٔ موقعیت ابزار خطی است. الگوریتم آنها قطر ابزار و خطاهای تابع قطر ابزار، تعداد نقاطCL و طول مسیر ابزار را درنظرمی‌گیرد. تحلیل و کنترل خطاهای هندسی در ماشینکاری پنج‌محورهٔ سطوح خمیدهٔ بزرگ توسط Peng و همکارانش [۱۳] انجام گرفته‌است. آنها با درنظرگرفتن رابطهٔ بین خطاهای هندسی و پارامترهای طراحی مسیر ابزار، روشهایی برای کنترل این خطاها ارائه‌نمودند. خطاهای غیرخطی که بخش اعظم خطاهای هندسی در طول ماشینکاری پنج‌محوره را

تشکیل‌می‌دهند، بررسی‌شده و یک روش برای کنترل خطای مسیر نقاط تماس برش پیشنهادمی‌شود. همچنین موضوع کاهش خطای اسکالپ در ماشینکاری سطوح خمیده نیز مورد بررسی قرارگرفته‌است. Bohez و همکارانش [۱۴] خطاهای مطرح‌شده در فایل موقعیت برش و واحد پردازش[1] را با استفاده از تخمین سطح با مسیرابزار قوس‌دار واقعی بجای استفاده از تخمین پاره‌خطی به حداقل رساندند. آنها یک الگوریتم CAM برای سطح ایجادشده با ماشینکاری پنج‌محوره ارائه‌کردند و هنگامی که منطقهٔ تماس ابزار و قطعه‌کار بجای یک نقطه یک منحنی بود، خطای هندسی را اصلاح نمودند [۱۵].

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه پس از بیان تاریخچه‌ای از تحقیقات انجام‌گرفته در زمینهٔ خطاهای ماشینکاری، در فصل دوم به معرفی ماشینکاری چندمحوره می‌پردازیم. انواع ماشینهای پنج‌محوره، چگونگی حرکات خطی و دورانی این ماشینها، و مزایای استفاده از ماشینکاری پنج‌محوره را شرح خواهیم‌داد. سپس با توجه به کاربرد ماشینهای پنج‌محوره با دومحور دورانی روی میز در صنایع هوایی، معادلات انتقال داده‌های موقعیت ابزار به سیستم مختصات ماشین برای این نوع از دستگاهها محاسبه خواهندشد.

در فصل سوم با معرفی هندسه‌های مورد استفاده برای طراحی عملیات ماشینکاری و انواع مختلف روشهای هدایت مسیر ابزار به شرح استراتژی‌های کنترل محور ابزار در ماشینکاری چندمحوره می‌پردازیم. همچنین روشهای موقعیت‌دهی ابزار روی سطح و پارامترهای برش در ماشینکاری چندمحوره را نیز مورد مطالعه قرارمی‌دهیم.

در فصل چهارم منابع اصلی خطاهای ماشینکاری و بخصوص ماشینکاری پنج‌محوره را مورد مطالعه قرار داده و اثر این خطاها بر روی سطح قطعه‌کار را بررسی می‌نماییم. همچنین با انجام آزمایشات ماشینکاری واقعی بر روی دو نمونه پره از جنس‌های مختلف، اثر تکنیک‌های ماشینکاری موافق و مخالف را بر کیفیت سطح پره‌ها مشاهده خواهیم کرد.

[1] Post-processor

در فصل پنجم با بکارگیری روشهای مختلف کنترل محور ابـزار در ماشـینکاری پـره‌هـا، خطاهـایی ماننـد برخورد و سایش ساقهٔ ابزار را برای دو نمونه پره، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌نماییم تا بتوانیم بدون انجام تست‌های ماشینکاری واقعی، مـسیر ابـزار مناسـب ماشـینکاری را طراحـی‌نمـاییم. همچنـین بـا انجـام عملیـات ماشینکاری با برنامه‌های تهیه‌شده و مقایسه نتایج اندازه‌گیری زبری‌سطح و زمان انجام عملیات، استراتژیهای برتر در ماشینکاری پره‌ها را شناسایی خواهیم‌کرد. ضمن اینکه با بکارگیری پارامترهای ماشینکاری مناسب، خطاهـای ناشی از تغییرات ناگهانی محور ابزار را کاهش خواهیم‌داد. در نهایت در فـصل شـشم، نتـایج و دسـتاوردهای ایـن پروژه بیان شده و پیشنهاداتی برای ادامهٔ کار در این زمینه ارائه‌می‌گردد.

فصل دوم

ماشینکاری چندمحوره