

# مطالعه تجربی جهت گیری مسیر ابزار در فرزکاری قطعات جدارنازک یک سرگردار

بهزاد جباری پور<sup>۱</sup>، مهرداد مطلب پورعلی شاهی<sup>۲</sup>

۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، beh.jabbaripour@iauctb.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۵

## چکیده

انتخاب بهینه استراتژی‌های مسیر و جهت گیری ابزار در فرایند فرزکاری مسئله‌ای مهم در ماشینکاری قطعات جدارنازک مانند پره‌ها و ایرفویل‌هاست. انتخاب مناسب منجر به صرفه جویی در زمان ماشینکاری و بهبود کیفیت سطح قطعه کار و افزایش عمر ابزار می‌شود و علاوه بر بالا رفتن قابلیت تولید، هزینه‌ها را نیز کاهش می‌دهد. در این مقاله، آثار جهت گیری ابزار در ماشینکاری سطوح انحنا دار قطعات جدارنازک آلومینیومی یک سرگردار به وسیله فرایند فرزکاری سه محوره با فرز انگشتی سرکروی مورد بررسی قرار گرفته است تا بهترین صافی و یکپارچگی سطح ماشینکاری شده و کمترین مقادیر نیروهای ماشینکاری به دست آید. چهار استراتژی مورد بررسی عبارتند از: عرضی رو به داخل، عرضی رو به خارج، طولی رو به داخل و طولی رو به خارج. در حین فرزکاری نیروهای میانگین ماشینکاری در جهات مختلف اندازه گیری می‌شوند و توپوگرافی سطحی ماشینکاری شده به وسیله میکروسکوپ نوری ارزیابی می‌شود و در انتها روی نمونه‌ها تست زبری سنجی انجام می‌شود. براساس اندازه گیری نیروهای فرزکاری، زبری سنجی و بررسی توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده مشخص می‌شود که در فرزکاری سطوح انحنا دار قطعات جدارنازک آلومینیومی یک سرگردار، روش عرضی رو به داخل بهترین استراتژی فرزکاری و حالت طولی رو به خارج، غیرمطلوب ترین استراتژی مسیر حرکت ابزار فرزکاری می‌باشد.

## واژگان کلیدی

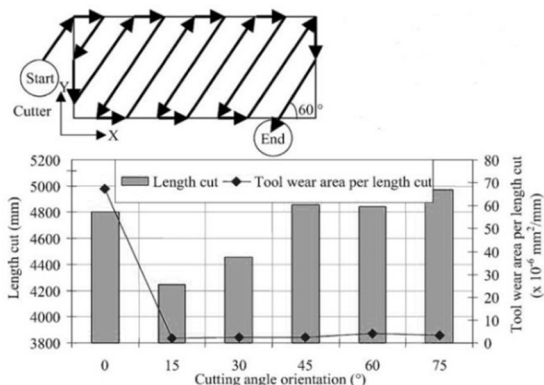
فرزکاری، جهت گیری مسیر ابزار، قطعات جدارنازک، توپوگرافی سطح، نیروهای ماشینکاری، زبری سطح

### ۱. مقدمه

در صنایع قالب سازی، هوافضا و خودروسازی استفاده می‌شود. در صنایع هوافضا، عمدتاً قطعات پیچیده ائرو دینامیکی با ابزار فرز

فرزکاری با ابزار سرکروی از جمله فرایندهای ماشینکاری است که به طور گسترده‌ای برای ماشینکاری سطوح پیچیده و منحنی شکل<sup>۱</sup>

شروع، کوتاه‌ترین مسیر برش به دست می‌آید [۴]. استراتژی‌های ماشینکاری قطعات جدارنازک<sup>۶</sup> باید از چند جنبه بررسی شوند. ماشینکاری سرعت‌بالای<sup>۷</sup> یک قطعه جدارنازک توسط اسمیت و همکاران (۱۹۹۸) آزمایش شده است [۵]. آنها نتیجه گرفتند که برای قطعه کار جدارنازک آلومینیومی مسیرهای ابزار باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نواحی مورد ماشینکاری به وسیله حداکثر مواد ماشینکاری نشده ممکن حمایت<sup>۸</sup> شوند و جهت ماشینکاری باید از ناحیه‌ای که کمتر حمایت شده است، به سمت ناحیه‌ای که بیشتر ساپورت شده امتداد پیدا کند.



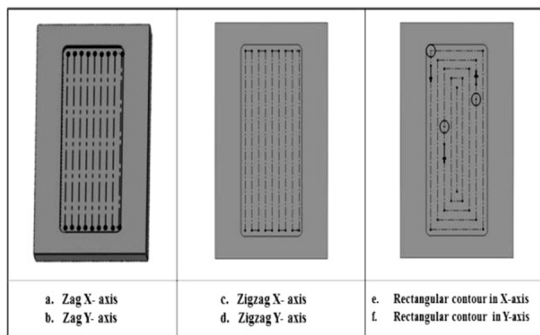
شکل ۱. اثر زاویه جهت ماشینکاری بر طول برش و مقدار سایش ابزار [۳]

در هنگام فرز کاری قطعات جدارنازک باید بیشترین توجه برای انتخاب سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش محوری بشود تا از تغییر فرم سازه جلوگیری شود. نیروهای برشی و دمای برشی کمتر و همچنین کاهش ارتعاشات چتر در ابزار برای کاهش تغییر شکل قطعه کار ضروری هستند. با نیروهای برشی کمتر خیز ابزار کاهش می‌یابد که سبب کاهش تغییر فرم قطعه نهایی می‌شود. دماهای برشی کمتر سبب کاهش کرنش‌های حرارتی القاشده به قطعه کار می‌شود [۶]. لایق و لازاوغلو (۲۰۱۷) مدل جدیدی برای پیش‌بینی توپوگرافی و زبری سطح ماشینکاری در فرز کاری پنج‌محوره با ابزار سرکروی ارائه نمودند [۷]. این مدل توپوگرافی و پروفیل زبری را بر اساس پارامترهای فرز کاری مانند نرخ پیشروی، تعداد دندانه‌ها، عمق برش محوری و شعاعی پیش‌بینی می‌کند. همچنین امکان شبیه‌سازی آثار زوایای تمایل ابزار روی کیفیت سطح را نیز می‌سازد. شکل ۲ نمونه شبیه‌سازی شده زبری سطح به ازای دور ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، عمق برش محوری ۰/۲ میلی‌متر، عمق برش شعاعی ۰/۵ میلی‌متر، زاویه انحراف ۳۰ درجه ابزار و نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دور را

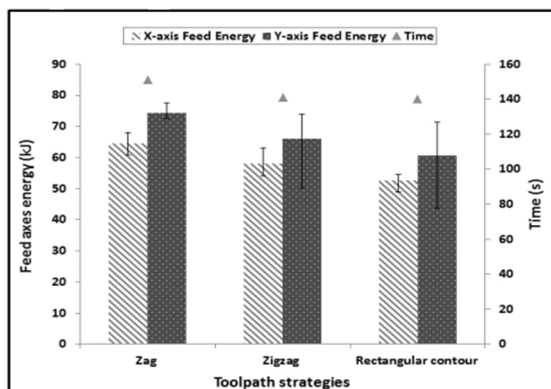
سرکروی ماشینکاری می‌شوند. دلیل اصلی استفاده از ابزارهای فرز سرکروی در ماشینکاری، سطوح انحنادار آن است که به آسانی قابلیت تطبیق روی سطوح سه‌بعدی را دارند [۱]. به دلیل امکان ایجاد زاویه تمایل<sup>۲</sup> ابزار نسبت به سطح قطعه کار ماشینکاری شونده در فرز کاری پنج‌محوره نسبت به فرز کاری سه‌محوره، صافی سطح قطعه ماشینکاری شده در حالت پنج‌محوره بیشتر از سطح حاصل از فرز کاری سه‌محوره می‌باشد. علاوه بر آن، در فرز کاری پنج‌محوره به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری ابزار در جهت‌گیری و توانایی ایجاد زاویه نسبت به سطح قطعه کار، می‌توان انواع سطوح پیچیده را ماشینکاری نمود. در حالی که با فرز کاری سه‌محوره نمی‌توان چنین زاویه تمایلی را در هنگام ماشینکاری اعمال نمود [۲]. توپوگرافی سطح ماشینکاری شده تأثیر زیادی بر عملکرد قطعه تولیدی در حین بارگذاری دینامیکی در طی سیکل کاری دارد؛ به گونه‌ای که وقتی عیوب سطح ماشینکاری شده زیاد باشد، این نقاط به عنوان محل‌های تمرکز تنش به‌شمار می‌روند و سبب ضعف قطعه کار در مقابل بارگذاری دینامیکی و احیاناً شکست یا گسیختگی قطعه کار می‌شود. از طرفی نیروهای ماشینکاری در تعیین تلورانس‌های ابعادی قطعه کار مهم‌اند و نیروهای برشی کم به‌طور ایده‌آل در جهت محور ابزار برای اطمینان از دقت و صحت ابعادی قطعه کار ضروری هستند و علاوه بر آن کاهش نیروهای برشی سبب کاهش استهلاک ماشین ابزار می‌شود. از طرفی، نرخ سایش ابزار برشی را نیز کاهش می‌دهد و در نتیجه منجر به کاهش هزینه‌های کلی ماشینکاری می‌شود [۳].

استراتژی‌های فرز کاری مورب<sup>۳</sup> و افست<sup>۴</sup> مزایا و معایب خود را دارند. اگرچه روش مورب مسیر ابزار کوتاه‌تری را تولید می‌کند، اما علائم ماشینکاری دوکپه‌ای<sup>۵</sup> که روی دیواره‌های ماشینکاری شده باقی می‌ماند، به‌طور کامل از بین نمی‌روند، در حالی که با استراتژی افست، کپه‌ها عمدتاً قابل حذف هستند و سطح هموارتری تولید می‌شود. در شکل ۱ فرز کاری مورب با زاویه جهت‌گیری شصت درجه نمایش داده شده است. همچنین اثر جهت‌گیری ابزار برش بر طول برش و سایش ابزار را نشان می‌دهد. عموماً سایش ابزار و طول برش با افزایش زاویه مسیر ماشینکاری افزایش می‌یابد و این نتایج نشان می‌دهد جهت‌گیری زاویه‌ای برش، اثر قابل توجهی بر طول برش و سایش ابزار دارد [۳]. فرای و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند که با فرز کاری مورب به موازات طولانی‌ترین وجه قطعه کار و با انتخاب مناسب نقطه

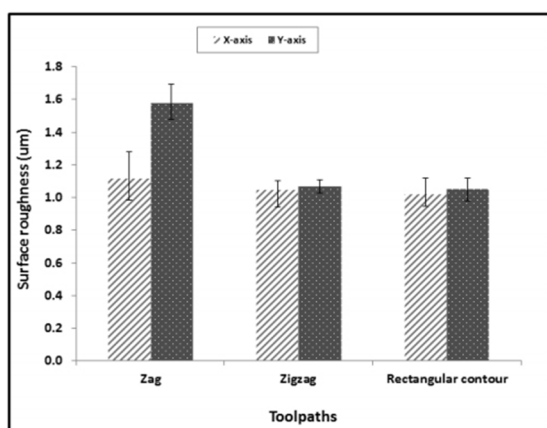
فرزکاری پنج‌محوره با استفاده از ابزار فرز انگشتی سرکروی کاربردی روی تیتانیوم انجام دادند و آثار زاویه چرخش محور ابزار و زاویه تمایل محور ابزار را روی یکپارچگی سطح قطعه کار بررسی نمودند [۹].



شکل ۴. مسیرهای ابزار براساس استراتژی‌های مختلف فرزکاری [۸]



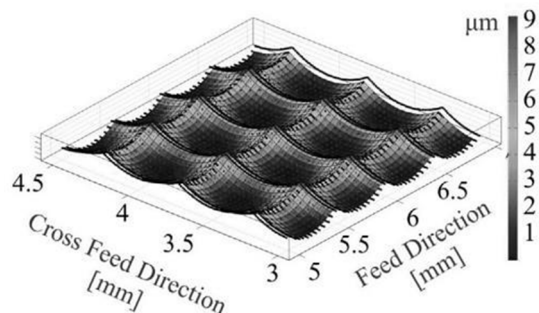
شکل ۵. انرژی مصرفی ماشین فرز براساس استراتژی‌های فرزکاری و محورهای مختلف پیشروی [۸]



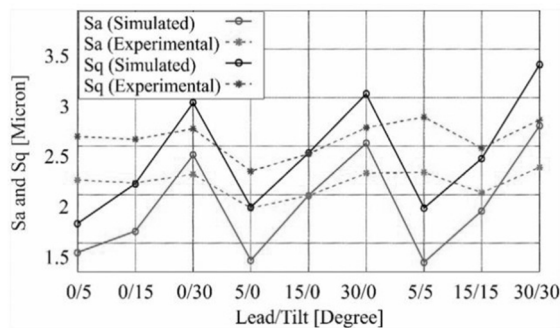
شکل ۶. زبری سطح قطعه کار بر اساس استراتژی‌های فرزکاری و محورهای مختلف پیشروی [۸]

نتایج آنها نشان داد که زاویه چرخش و زاویه تمایل محور ابزار تأثیر مهمی بر بافت سطحی قطعه کار می‌گذارد و همچنین

نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ قابل مشاهده است که این مدل قابلیت پیش‌بینی توپوگرافی سطح را با حداکثر خطای ۲۰ درصد دارد.



شکل ۲. زبری سطح پیش‌بینی شده برای دور ۲۵۰۰ دور بر دقیقه، عمق برش محوری ۰/۲ میلی‌متر، عمق برش شعاعی ۰/۵ میلی‌متر، زاویه انحراف ۳۰ درجه و نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دور [۷]



شکل ۳. مقایسه مقادیر تئوری و تجربی زبری سطح برای نرخ پیشروی ۱ میلی‌متر بر دور [۷]

ادم و ماتیونگا (۲۰۱۷) اثر جهت‌گیری ابزار روی انرژی الکتریکی مصرفی ماشین فرز در ماشینکاری فولاد ۱۰۱۸ را بررسی نمودند [۸]. آنها اظهار کردند با انتخاب استراتژی‌های مناسب فرزکاری در فرایند پاکت تراشی می‌توان تا حدود ۲۹ درصد انرژی الکتریکی مصرفی دستگاه و تا حدود ۵۰ درصد زبری سطح ماشینکاری‌شده را کاهش داد و همچنین مشاهده کردند که استراتژی با کمترین میزان مصرف انرژی الکتریکی ماشین فرز، منجر به بهترین صافی سطح قطعه کار می‌گردد. شکل ۴ مسیرهای ابزار براساس استراتژی‌های مختلف فرزکاری بکار گرفته شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های ۵ و ۶ انرژی مصرفی ماشین فرز و زبری سطح قطعه کار براساس استراتژی‌های فرزکاری و محورهای مختلف پیشروی را به ازای مسیرهای ابزار بیان شده نشان می‌دهند. پان و همکاران (۲۰۱۶) آزمایش‌های

مهار<sup>۱۱</sup> می‌شوند، با ماشین فرز کنترل عددی سهمحوره انجام شده است.

## ۲. تجهیزات، طراحی و انجام آزمایشات جهت گیری ابزار فرز کاری

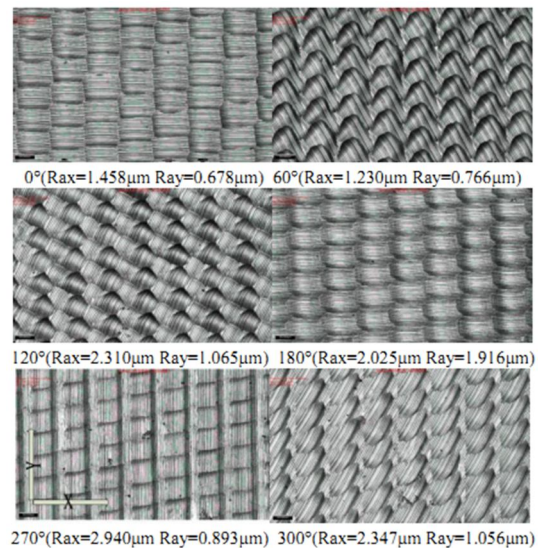
### ۲-۱. تجهیزات، ابزار و مواد مورد استفاده

در این بخش از تحقیقات، به منظور انجام تست جهت گیری های ابزار فرز کاری روی سطح انحنا دار قطعات یک سرگردار، از ماشین فرز کنترل عددی سهمحوره همزمان<sup>۱۲</sup> استفاده شده است. این ماشین دارای حداکثر دور اسپیندل ۶۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. در تست های فرز کاری انجام شده، جهت انجام عملیات خشن کاری از ابزار فرز انگشتی سرتخت دو لبه اینسرتی کاربیدی<sup>۱۳</sup> و با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است و به منظور عملیات پرداخت کاری در تست ها از ابزار فرز انگشتی سرکروی کاربیدی پوشش دار دو لبه اینسرتی<sup>۱۴</sup> استفاده شده است که به منظور اطمینان از صحت نتایج آزمایشات بعد از هر عمل پرداخت، اینسرت ها تعویض می‌شوند. برای قطعه کار از بلوک های آلومینیومی ۷۰۷۵ = با ابعاد ۳۰×۳۰×۸۰ میلی‌متر استفاده شده است که در مراحل خشن تراشی و پرداخت کاری روی چهار عدد از این بلوک ها تست های مورد نظر انجام شده است. جهت اندازه گیری نیرو از دینامومتر<sup>۱۵</sup> استفاده شده است و برای بررسی زبری سطح ماشینکاری شده از زبری-سنج پرتابل<sup>۱۶</sup> استفاده شده است. به منظور مشاهده توپوگرافی سطحی حاصل از ماشینکاری و مقایسه آنها با هم از میکروسکوپ نوری<sup>۱۷</sup> که دارای حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر می‌باشد، استفاده شده است. گفتنی است که در مشاهدات میکروسکوپی ثبت شده در این تحقیق، از بزرگنمایی ۵۰ برابر استفاده شده است. در شکل ۹ تصویری از این میکروسکوپ نمایش داده شده است.

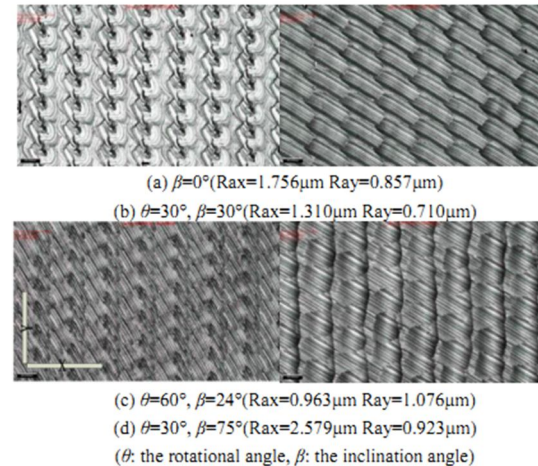
### ۲-۲. طراحی آزمایشات جهت گیری ابزار در حین فرز کاری

به منظور بررسی چهار جهت کلی فرز کاری سطوح انحنا دار مانند پره ها و انتخاب حالت بهینه که کمترین نیروهای ماشینکاری را تولید کند و از طرفی دارای بهترین توپوگرافی و صافی سطح ماشینکاری شده باشد، شرایط تستی طراحی می‌شود که در ادامه تشریح می‌شود. چهار جهتی که بررسی خواهند شد، همان طور که در شکل ۱۰ آورده شده است عبارتند از: عرضی رو به داخل، عرضی رو به خارج، طولی رو به داخل و طولی رو به خارج.

بیان کردند که با افزایش زاویه تمایل، تنش پسماند کاهش می‌یابد، اما به دلیل مقادیر کمتر کارسختی، تغییرات جهت گیری ابزار اثر معناداری بر تغییرات ریزسختی قطعه کار ندارد. شکل های ۷ و ۸ تغییرات بافت سطحی را به ترتیب در اثر تغییرات زاویه چرخش محور ابزار و تغییرات زاویه تمایل محور ابزار نشان می‌دهد.



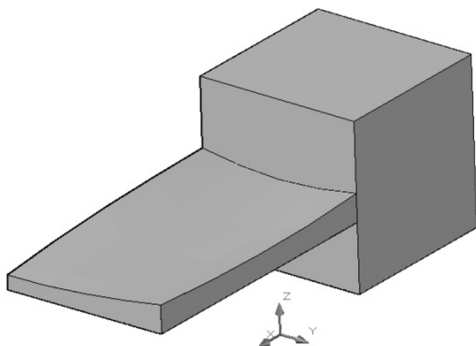
شکل ۷. تغییرات بافت سطحی در اثر تغییرات زاویه چرخش محور ابزار [۹]



شکل ۸. تغییرات بافت سطحی در اثر تغییرات زاویه تمایل محور ابزار [۹]

در پژوهش حاضر، آثار جهت حرکت (جهت گیری) ابزار برش<sup>۹</sup> در ماشینکاری قطعات جدارنازک یک سرگردار با سطوح منحنی به کمک فرز کاری سهمحوره با ابزار انگشتی سرکروی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا به بهترین صافی و یکپارچگی سطح قطعه کار رسید. به دلیل عدم دسترسی به ماشین فرز کنترل عددی<sup>۱۰</sup> پنج محوره، آزمایش استراتژی های جهت ماشینکاری روی سطوح انحنا دار قطعات جدارنازک آلومینیومی که به صورت یک سرگردار

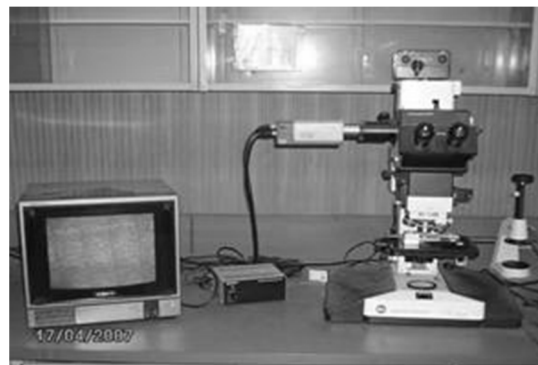
پیچ ۱۲ به سوراخ رزوه شده موجود بر سطح دینامومتر کلمپ می‌شود. چون قطعه‌کار پیچ شده است، فقط یک سطح آن فرزکاری می‌گردد؛ زیرا برخلاف فرز پنج‌محوره قابلیت چرخش قطعه‌کار در حین ماشینکاری وجود ندارد و به دلیل سه‌محوره بودن ماشین فرز محور ابزار همواره عمود بر سطح ماشینکاری‌شونده است. برای اینکه قابلیت تطبیق ابزار با سطح ماشینکاری‌شونده وجود داشته باشد، از ابزار سرکروی استفاده شده است.



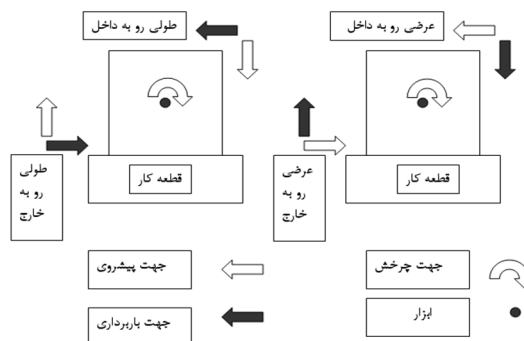
شکل ۱۱. نمونه مدل قطعه‌کار طراحی شده جهت فرزکاری سطح آن

## ۲-۳. انجام آزمایشات جهت‌گیری ابزار در حین فرزکاری و ارائه نتایج

جهت عملیات خشن‌کاری، یک طرف بلوک‌های آلومینیومی در گیره بسته می‌شود که خود گیره نیز روی دینامومتر، که روی میز ماشین فرز قرار می‌گیرد، بسته می‌شود. گفتنی است مدل‌سازی ماشینکاری<sup>۲۰</sup> قطعه‌کار به کمک نرم‌افزار مسترکام<sup>۲۱</sup> انجام شده است و به کمک پورت<sup>۲۲</sup>، فایل کدهای خروجی نرم‌افزار مسترکام به کنترلر ماشین فرز فرستاده می‌شود. شرایط خشن‌کاری قطعات آلومینیومی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین در شکل ۱۲ تصویری از عملیات خشن‌کاری قطعه‌کارها نمایش داده شده است. پس از عملیات خشن‌کاری روی چهار بلوک آلومینیومی، برای تست جهت‌های ماشینکاری در ادامه چهار حالت فرزکاری مطابق شکل ۱۰ و براساس پارامترهای برشی موجود در جدول ۲ آزمایش می‌شود. در شکل ۱۳ تصویری از حالت ماشینکاری طولی رو به خارج و حالت ماشینکاری عرضی رو به داخل و همچنین نحوه بستن قطعه‌کارها روی دینامومتر در حین تست‌ها نشان داده شده است. در ادامه برای چهار جهت فرزکاری اشاره‌شده در جدول ۲، مؤلفه‌های نیروهای ماشینکاری در دو جهت ایکس و ایگرگ<sup>۲۳</sup> و تصاویر توپوگرافی سطحی مربوطه و مقدار عددی زبری سطح



شکل ۹. تصویری از میکروسکوپ نوری مورد استفاده در آزمایشات



شکل ۱۰. چهار جهت منتخب برای فرزکاری قطعات یک‌سرگردار با سطوح منحنی

منظور از فرزکاری رو به داخل؛ یعنی از قسمت آزاد قطعه‌کار ماشینکاری‌شونده تا قسمت گیردار و منظور از فرزکاری رو به خارج یعنی از قسمت گیردار تا قسمت آزاد قطعه‌کار. منظور از ماشینکاری عرضی یعنی اینکه جهت پیشروی ابزار در امتداد عرض قطعه‌کار باشد و منظور از ماشینکاری طولی یعنی اینکه جهت پیشروی ابزار در امتداد طول قطعه‌کار باشد. به دلیل عدم دسترسی به فرز پنج‌محوره جهت انجام تست‌های جهت‌گیری ابزار و برای اینکه بتوان به‌گونه‌ای این تست را انجام داد تا قطعه‌کار به‌صورت یک پرّه کوتاه که در ماشین فرز پنج‌محوره فقط از یک طرف بسته شده است، مدل گردد، نمونه مدل کد<sup>۱۸</sup> مورد نظر در محیط نرم‌افزار مکانیکال<sup>۱۹</sup> مدل‌سازی شده است، که سطحی می‌باشد که یک طرف آن دارای انحنای به‌صورت مقعر است و طول قسمت انحنا دار ۵۰ میلی‌متر و عرض قسمت انحنا دار ۳۰ میلی‌متر و حداکثر ضخامت آن حدود ۸ میلی‌متر و مقدار انحنای در سطح، برابر ۳ میلی‌متر است. مدل قطعه‌کار در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. قطعه‌کار در عملیات پرداخت، به‌صورت مدل تیر یک‌سرگردار ماشینکاری می‌شود و انتهای ضخیم‌تر آن با یک

ماشینکاری شده ارائه می‌گردند و در بخش تحلیل نتایج با توجه به این داده‌ها، بهترین جهت فرزکاری معرفی می‌گردد. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نیروهای اندازه‌گیری شده در جهات ایکس و ایگرگ توسط دستگاه دینامومتر در حین عملیات فرزکاری مربوط به دو

حالت (عرضی رو به داخل و طولی رو به خارج) از چهار جهت مختلف ماشینکاری آورده شده‌اند و این تصاویر که به صورت طیف نیرو می‌باشند، به صورت نمونه‌ای دلخواه از کل بازه اندازه‌گیری شده نیرو، انتخاب شده‌اند.

جدول ۱. شرایط خشن کاری در حین فرزکاری قطعات آلومینیومی

استراتژی ماشینکاری	دور اسپیندل	سرعت پیشروی	عمق برش محوری	اضافه پرداخت	حالت فرزکاری	نوع فرزکاری
مارپیچ	۱۷۵۰ دور بر دقیقه	۰/۳۵ میلی‌متر بر دندانه	۰/۴ میلی‌متر	۰/۸ میلی‌متر	با مایع خنک‌کار	فرزکاری موافق

جدول ۲. شرایط پرداخت کاری در حین فرزکاری قطعات آلومینیومی

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم
عرضی رو به داخل	عرضی رو به خارج	طولی رو به داخل	طولی رو به خارج
مورب یک طرفه	مورب یک طرفه	مورب یک طرفه	مورب یک طرفه
موافق	موافق	موافق	موافق
خشک	خشک	خشک	خشک
۱۰۰۰ دور بر دقیقه	۱۰۰۰ دور بر دقیقه	۱۰۰۰ دور بر دقیقه	۱۰۰۰ دور بر دقیقه
۰/۱ میلی‌متر بر دندانه	۰/۱ میلی‌متر بر دندانه	۰/۱ میلی‌متر بر دندانه	۰/۱ میلی‌متر بر دندانه
۰/۵ میلی‌متر	۰/۵ میلی‌متر	۰/۵ میلی‌متر	۰/۵ میلی‌متر
۰/۸ میلی‌متر	۰/۸ میلی‌متر	۰/۸ میلی‌متر	۰/۸ میلی‌متر
۳۵ میلی‌متر	۳۵ میلی‌متر	۳۵ میلی‌متر	۳۵ میلی‌متر
جهت ماشینکاری	جهت ماشینکاری	جهت ماشینکاری	جهت ماشینکاری
استراتژی ماشینکاری	استراتژی ماشینکاری	استراتژی ماشینکاری	استراتژی ماشینکاری
نوع فرزکاری	نوع فرزکاری	نوع فرزکاری	نوع فرزکاری
حالت فرزکاری	حالت فرزکاری	حالت فرزکاری	حالت فرزکاری
دور اسپیندل	دور اسپیندل	دور اسپیندل	دور اسپیندل
سرعت پیشروی	سرعت پیشروی	سرعت پیشروی	سرعت پیشروی
عمق برش شعاعی	عمق برش شعاعی	عمق برش شعاعی	عمق برش شعاعی
عمق برش محوری	عمق برش محوری	عمق برش محوری	عمق برش محوری
مقدار پیش آمدگی ابزار	مقدار پیش آمدگی ابزار	مقدار پیش آمدگی ابزار	مقدار پیش آمدگی ابزار

برای انجام تست زبری سنجی نمونه‌های فرزکاری شده تحت هر حالت، مسیر حرکت پروب زبری سنجی عمود بر جهت پیشروی ابزار<sup>۳۴</sup> در حین فرزکاری بوده است. همچنین در شکل ۱۶ تصاویر مربوط به توپوگرافی سطح ماشینکاری شده به ازای جهات مختلف حرکت ابزار نمایش داده شده است.

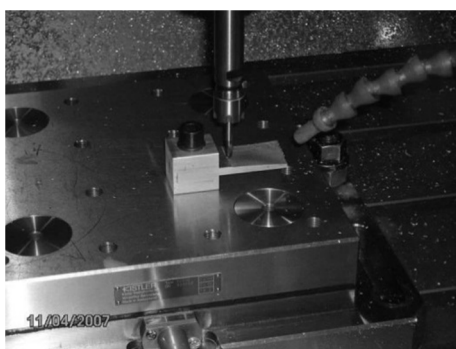
### ۳. تحلیل مقادیر نیروهای ماشینکاری و زبری سطح

در پرداخت کاری سطح انحنادار قطعات یک‌سرگردار، چهار جهت فرزکاری عرضی رو به داخل، عرضی رو به خارج، طولی رو به داخل و طولی رو به خارج مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج نیروهای میانگین ماشینکاری و زبری سطح برای هر حالت در جدول ۳ ارائه شده‌اند. با توجه به اطلاعات جدول ۳ و همچنین تصاویر توپوگرافی سطوح ارائه شده در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که با افزایش نیروهای ماشینکاری، مقدار زبری سطح افزایش

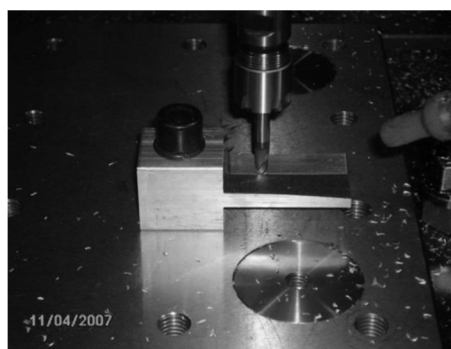
می‌یابد و علاوه بر آن کیفیت توپوگرافی سطحی نیز کاهش می‌یابد. نقاط یا لکه‌های تاریک در تصاویر توپوگرافی سطحی، فرورفتگی‌ها و دره‌های سطحی و نقاط یا لکه‌های روشن در تصاویر توپوگرافی، برجستگی‌های سطح ماشینکاری شده را نشان می‌دهد که با افزایش نیروهای میانگین ماشینکاری، غیریکنواختی و ناهمگونی در توپوگرافی سطحی بیشتر می‌شود، از اینرو مقدار زبری سطح فرزکاری شده افزایش می‌یابد یا به عبارتی صافی سطح کاهش می‌یابد. با توجه به نیروهای فرزکاری و نتایج زبری سنجی و توپوگرافی سطحی مشخص می‌شود که برای فرزکاری قطعات یک‌سرگردار با سطوح منحنی، روش فرزکاری عرضی رو به داخل، بهترین حالت و روش طولی رو به خارج، غیرمطلوب‌ترین حالت است و از لحاظ ترتیب اولویت، حالات فرزکاری عبارتند از: عرضی رو به داخل، طولی رو به داخل، عرضی رو به خارج و طولی رو به خارج.



شکل ۱۲. خشن کاری قطعات آلومینیومی

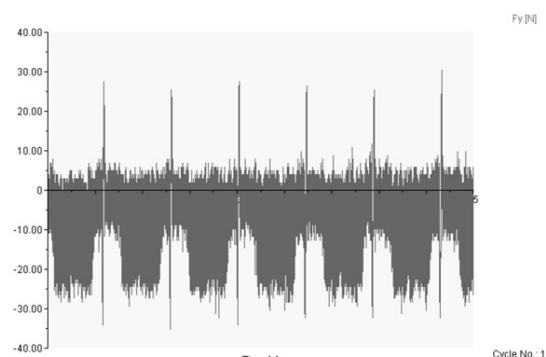
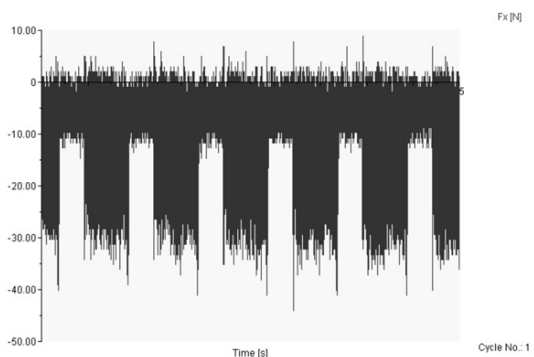


(ب)

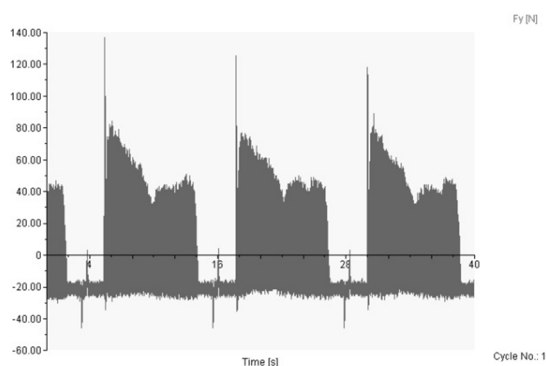
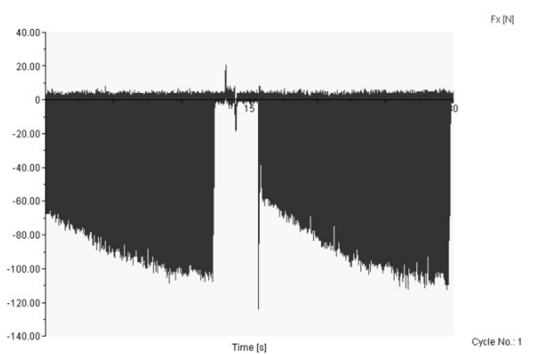


(الف)

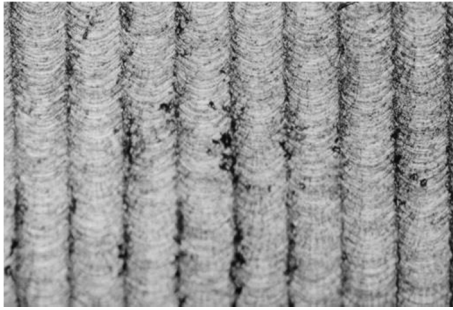
شکل ۱۳. جهت گیری های مختلف ابزار در پرداخت کاری قطعات یک سرگردار؛ (الف) طولی رو به خارج، (ب) عرضی رو به داخل



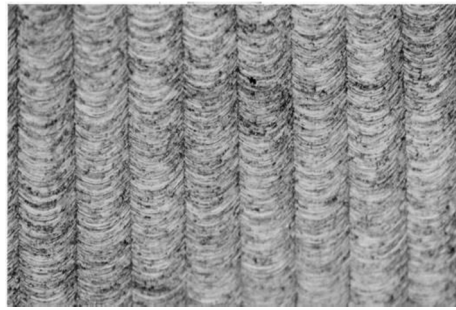
شکل ۱۴. مولفه های نیروهای ایکس و ایگرگ در حالت فرز کاری عرضی رو به داخل



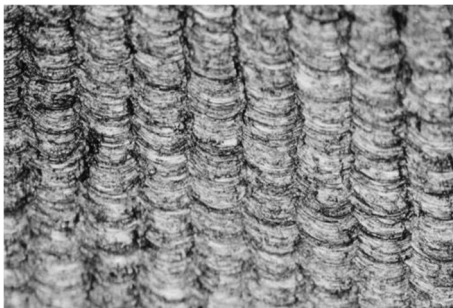
شکل ۱۵. مولفه های نیروهای ایکس و ایگرگ در حالت فرز کاری طولی رو به خارج



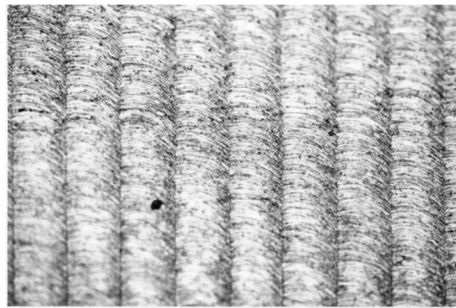
ب) توپوگرافی سطح نمونه فرزکاری شده به روش عرضی رو به خارج



الف) توپوگرافی سطح نمونه فرزکاری شده به روش عرضی رو به داخل



د) توپوگرافی سطح نمونه فرزکاری شده به روش طولی رو به خارج



ج) توپوگرافی سطح نمونه فرزکاری شده به روش طولی رو به داخل

شکل ۱۶. توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده در اثر جهت‌گیری‌های مختلف ابزار فرزکاری (بزرگنمایی ۵۰ برابر)

جدول ۳. نتایج حاصل از تست‌های جهت‌گیری‌های مختلف ابزار فرزکاری

حالت	نیروی میانگین ماشینکاری (نیوتن)	زبری سطح (میکرومتر)
عرضی رو به داخل	۴۲/۵	۲/۶۶۲
عرضی رو به خارج	۱۰۳	۳/۳۱۴
طولی رو به داخل	۷۴	۳/۰۹۳
طولی رو به خارج	۱۴۱	۳/۹۷۳

ممکن حمایت شوند و جهت ماشینکاری باید از ناحیه‌ای که کمتر ساپورت شده است، به سمت ناحیه‌ای که بیشتر ساپورت شده است، امتداد پیدا کند و نتایج حاصل از تحقیق جاری با نتایج اسمیت و همکارش [۵] و همچنین لی و همکارش [۱۰] مطابقت دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، آثار جهت حرکت ابزار برشی در فرزکاری سه‌محوره قطعات آلومینیومی ۷۰۷۵ یک‌سرگردار بررسی شد. سطح قطعه‌کار انحنا دارد، لذا از ابزار فرز انگشتی سرکروی استفاده شده است. هدف از این تست‌ها این بوده است که جهت‌گیری بهینه ابزار برشی در حین فرزکاری تعیین گردد تا بتوان به بهترین صافی

علت این مسئله تغییر سطح تماس براده - ابزار در حین فرزکاری سطوح انحنا دار در جهات مختلف ماشینکاری می‌باشد. اصولاً افزایش سطح تماس منجر به زیاد شدن بار براده<sup>۲۵</sup> و در پی آن افزایش نیروهای ماشینکاری می‌شود. لی و همکارش (۲۰۰۴) اعلام نمودند که نیروهای برشی در مسیرهای عرضی ابزار کمتر از نیروهای برشی در مسیرهای طولی ابزار است [۱۰]. هرچند که آنها دلیل خاصی برای این امر ذکر نکردند، اما به نظر می‌رسد دلیل اصلی آن سطح تماس ابزار - براده می‌باشد. اسمیت و همکارش (۱۹۹۸) نیز در فرزکاری قطعات جدارنازک آلومینیومی به این نتیجه رسیده‌اند که مسیرهای ابزار باید به گونه‌ای انتخاب شوند که نواحی مورد ماشینکاری به وسیله حداکثر مواد ماشینکاری نشده



انحنادار قطعات جدارنازک آلومینیومی یکسرگردار، روش عرضی رو به داخل بهترین استراتژی فرزکاری و حالت طولی رو به خارج، غیرمطلوب‌ترین استراتژی مسیر حرکت ابزار فرزکاری می‌باشد. علت این مسئله تغییر سطح تماس براده - ابزار در حین فرزکاری سطوح انحنادار در جهات مختلف ماشینکاری می‌باشد. مسیرهای ابزار باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که نواحی مورد ماشینکاری به‌وسیلهٔ حداکثر مواد ماشینکاری نشده ممکن حمایت شوند و جهت ماشینکاری باید از ناحیه‌ای که کمتر ساپورت شده است، به سمت ناحیه‌ای که بیشتر ساپورت شده است، امتداد پیدا کند.

سطح و مطلوب‌ترین توپوگرافی سطح ماشینکاری شده رسید و نیروهای ماشینکاری کاهش یابند. در حین عملیات ماشینکاری نیروهای برشی به‌وسیلهٔ دینامومتر اندازه‌گیری شدند و سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری، توپوگرافی سطح قطعات ماشینکاری شده مورد بررسی قرار گرفت. در مرحلهٔ بعد، تست‌های زبری‌سنجی روی نمونه‌های ماشینکاری انجام شد و مقدار زبری سطح حاصل از فرزکاری تحت هر حالت نیز به‌دست آمد. براساس اندازه‌گیری نیروهای فرزکاری، زبری‌سنجی و بررسی توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده مشخص می‌شود که در فرزکاری سطوح

## ۵. مآخذ

- [1] H. Erdim, I. Lazoglu, Feedrate scheduling strategies for free-form surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 747–757, 2006.
- [2] T. S. Lim, C. M. Lee, S. W. Kim, D. W. Lee, Evaluation of Cutter Orientations in 5-Axis High Speed Milling of Turbine Blade, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 130-131, pp. 401-406, 2002.
- [3] C. K. Toh, A study of the Effects of Cutter Path Strategies and Orientations in Milling, *Journal of Materials processing technology*, Vol. 152, pp. 346-356, 2004.
- [4] C. G. Fry, T. L. Fry, S. Raman, Experimental verification of tool wear effects in alternate path traversal in milling, *Proceedings of the 1999 ASME Energy Sources Technology Conference*, Houston, TX, USA, pp. 145–154, 1999.
- [5] S. Smith, D. Dvorak, Tool path strategies for high speed milling aluminum workpieces with thin webs, *Mechatronics*, Vol. 8, pp. 291–300, 1998.
- [6] E. I. Agba, D. Ishee, J. T. Berry, High speed machining of unsupported thin-walled structures, *The 3Th International Conference on Machining and Grinding*, MR99-204, Cincinnati, OH, USA, pp. 343–346, 1999.
- [7] E. Layegh, I. Lazoglu, 3D surface topography analysis in 5-axis ball-end milling, *CIRP Annals 1579 - Manufacturing Technology*, pp. 22-26, 2017.
- [8] I. F. Edem, P. T. Mativenga, Energy demand reduction in milling based on component and tool path orientations, *Procedia Manufacturing*, Vol. 7, pp. 253-261, 2017.
- [9] Y. Pan, Y. Changfeng, X. Shaohua, Z. Dinghua, D. Xingtang, Effect of Tool Orientation on Surface Integrity during Ball End Milling of Titanium Alloy TC1, *Procedia CIRP*, Vol. 56, pp. 143-148, 2016.
- [10] C. M. Lee, S. W. Kim, The optimal cutter orientation in ball end milling of cantilever-shaped thin plate, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153–154, pp. 900–906, 2004.

## پی‌نوشت

1. Free Form
2. Inclination angle
3. Raster
4. Offset
5. Scallop
6. Thin-Walled
7. High Speed Machining (HSM)

8. Supported
9. Cutter Orientation
10. Computer Numerical Control (CNC)
11. Clamp
12. CNC-VMC -FANUC-18 M
13. Korloy
14. YG- K-2

- 
15. Kistler 9255B
  16. Mahr-Perthometer M2
  17. Struerz
  18. CAD
  19. Mechanical
  20. CAM
  21. Mastercam
  22. RS 232
  23. Spiral
  24. Pick Feed
  25. Chip Load