

مدل‌سازی انرژی مصرفی در فرایند فرزکاری و بررسی تجربی انرژی مصرفی و زبری سطح در حالت‌های روانکاری کمینه و تر

مسعود بیات^۱، محمدمهدی ابوترابی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

*مسئول مکاتبات: abootorabi@yazd.ac.ir

چکیده

کاهش مصرف انرژی در تولید به دلیل تقاضای روز افزون مصرف‌کننده برای محصولات تولیدی جدید، افزایش قیمت انرژی، نوسان و عدم قطعیت در عرضه انرژی و سیاست‌های حکومتی یک نیاز ضروری است. در فرایندهای ماشین‌کاری و در سطح ماشین‌ابزار، بزرگ‌ترین سهم مصرف انرژی الکتریکی زمانی است که ماشین به یک حالت آماده به کار برسد و عملیات غیر برشی مانند فعال‌سازی اسپیندل و واحدهای کمکی را پشتیبانی کند. بنابر مطالعات انجام شده، انواع مدل‌سازی انرژی مصرفی در ماشین‌کاری پیشنهاد شده ولی در مورد کاربرد این مدل‌سازی‌ها مطالعات کمی صورت گرفته است. هدف مقاله حاضر، بررسی انرژی مصرفی ماشین ابزار فرز و ارائه یک روش عملی برای تخمین مصرف انرژی در فرایند ماشین‌کاری و همچنین مقایسه زبری سطح با در نظر گرفتن توان مصرفی در حالت‌های برش با روانکاری کمینه و تر است. هر جزء انرژی مصرفی با در نظر گرفتن ویژگی‌های توان و پارامترهای ماشین‌کاری تخمین زده می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش روانکاری کمینه از نظر میزان مصرف انرژی، کارآمد و بهینه است و باعث کاهش ۱۶/۳ درصدی انرژی مصرفی نسبت به روش روانکاری تر شده است. این نتیجه می‌تواند به طراحان برنامه‌ریزی فرایند کمک کند تا در انتخاب یک برنامه مؤثر از نظر انرژی مصرفی تصمیمات بهتری اتخاذ کنند. همچنین در حالت کمینه، زبری سطح به طور متوسط ۱۴٪ نسبت به روش تر کمتر است.

واژگان کلیدی

انرژی مصرفی
توان
زبری سطح
فرزکاری
روانکاری کمینه

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳

۱ مقدمه

توصیف مصرف انرژی، اولین قدم برای کاهش مصرف انرژی ماشین‌آلات و فرایندهای ماشین‌کاری است. علاقه بیشتر به تلاش برای کشف راه‌های جدید تجزیه، تحلیل و مدل‌سازی مصرف انرژی در ماشین‌کاری به دلیل نیازهای مرتبط با بهبود بهره‌وری انرژی است. فرایندهای ماشین‌کاری سنتی مانند تراشکاری، فرزکاری و سوراخکاری به طور گسترده در تولید مورد استفاده قرار می‌گیرند. محبوبیت آن‌ها به دلیل توانایی تولید هندسه‌های مختلف سه بعدی با دقت ابعادی بالا و هزینه مناسب است. برق، منبع اصلی انرژی برای ماشین‌های ابزار است. مصرف انرژی ماشین‌های ابزار شامل اسپیندل، حرکت محورها، مقاومت برشی ماده قطعه‌کار و موارد جانبی شامل پمپ سیال برش و کنترل‌کننده کامپیوتری می‌شود. کوردونوی [۳] مصرف انرژی در ماشین‌کاری را به دو دسته ثابت و متغیر دسته‌بندی کرد. بخش ثابت شامل دو زیر گروه شروع^۲ و راه‌اندازی^۳ و بخش متغیر شامل سروو موتور، کامپیوتر، اسپیندل، سیال برش و غیره است که به ماژول‌های ماشین ابزار بستگی دارد و تحت تأثیر نرخ براده برداری است. تخمین انرژی برش در فرایند برش مواد را می‌توان از طریق انرژی مخصوص برش هنگام تشکیل براده که حداقل انرژی مورد نیاز برای برداشتن حجم معینی از مواد را نشان می‌دهد انجام داد [۴]. در عمل، انرژی مصرف‌شده توسط عملیات ماشین‌کاری بسیار بیشتر از انرژی

یکی از مهم‌ترین فرایندها در ساخت و تولید، ماشین‌کاری است. در این روش با انجام کارهای مکانیکی و برشکاری بر روی قطعه، ماده تغییر شکل دائمی می‌یابد. مصرف انرژی در فرایندهای ساخت و تولید یکی از محرک‌های اصلی افزایش انتشار دی اکسید کربن است زیرا غالباً سوخت‌های فسیلی منبع تولید انرژی الکتریکی هستند. بخش تولید یکی از پایه‌های کلیدی رشد در بسیاری از کشورها و مصرف‌کننده عمده انرژی در جهان است؛ بنابراین صنایع باید هوشمندتر باشند تا میزان بهره‌وری را افزایش و شدت انرژی مصرفی و هزینه‌های تولید را کاهش دهند. آژانس بین‌المللی انرژی^۱ مصرف برق در جهان را در سال ۲۰۱۱ گزارش و اعلام کرد که بخش صنعت بالاترین مصرف‌کننده برق با ۴۲/۶٪ است [۱]. این مقدار بیانگر سهم بالای مصرف انرژی در بخش تولید است. ماشین‌کاری فرایندی است که به طور گسترده در صنایع تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بسیاری از کشورها، شرکت‌های کوچک تا متوسط بخش‌های مهمی از اقتصاد هستند و برای مدیریت انرژی و محیط زیست خود، نیاز به حمایت دارند. پیاده‌سازی بهره‌وری انرژی برای شرکت‌های کوچک و متوسط در اتحادیه اروپا و هند، ذخیره انرژی بالقوه ۲۲-۷ درصدی را به ارمغان آورده است [۲]. درک و

¹IEA (International Energy Agency) ²start up ³run time

نتایج نشان داد که همواره زبری سطح در روش روانکاری کمینه، نسبت به دو روش خشک و تر کمتر بود و با افزایش عمق برش و سرعت برشی، راندمان روش روانکاری کمینه نسبت به روش های خشک و تر افزایش یافت. نیری و همکاران [۱۵] تأثیر روانکاری کمینه بر زبری سطح در سخت تراشی فولاد بلبرینگ 6Cr100 با ابزار نانو سی بی ان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که زبری سطح در روش روانکاری کمینه نسبت به دو روش خشک و تر به طور متوسط به ترتیب ۴۲٪ و ۳۰٪ کاهش یافته است. در این مقاله، روشی برای تخمین میزان مصرف انرژی در فرایند ماشین کاری ارائه و دقت آن با استفاده از یک مثال واقعی بررسی شده است. علاوه بر این، اثر شرایط روانکاری بر انرژی مصرفی و زبری سطح قطعه کار بصورت تجربی بررسی و همچنین مروری بر اثر استراتژی های مختلف ماشین کاری بر توان مصرفی انجام شده است.

۲ مدل سازی انرژی مصرفی در ماشین کاری

با توجه به اینکه ماشین های کنترل عددی دارای اجزاء زیادی هستند که هر یک به صورت جداگانه در حال انجام فعالیت است، از این رو انرژی مصرفی زیادی دارند. مصرف انرژی در یک ماشین کنترل عددی را می توان به انرژی مورد نیاز اجزا شامل اسپیندل، محور پیشروی، پمپ خنک کننده، سیستم تعویض ابزار و دیگر اجزا که مصرف انرژی ثابت دارند به صورت رابطه (۱) تجزیه کرد [۱۶، ۱۷].

$$E_{total} = E_{spindle} + E_{feed} + E_{tool} + E_{cool} + E_{fix} \quad (1)$$

که E_{total} انرژی مصرفی کل و $E_{spindle}$ ، E_{feed} ، E_{tool} ، E_{cool} و E_{fix} به ترتیب معرف انرژی مصرفی توسط اسپیندل، محور پیشروی، تعویض کننده ابزار، سیستم خنک کاری و انرژی مصرفی ثابت هستند. انرژی مصرف شده توسط اسپیندل به نرخ براده برداری از قطعه کار وابسته است. جریان انرژی از موتور اسپیندل به ابزار یا قطعه کار در شکل ۱ نشان داده شده است. مصرف انرژی اسپیندل را می توان به انرژی مورد نیاز برای فعال سازی حرکت خود اسپیندل E_m و انرژی مورد نیاز برای برش قطعه کار E_c تقسیم بندی کرد. مقدار $E_{spindle}$ را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$E_{spindle} = E_m + E_c = \int_{t_{ms}}^{t_{me}} P_m \cdot dt + \int_{t_{cs}}^{t_{ce}} P_c \cdot dt \quad (2)$$

که P_m توان مورد نیاز برای حرکت دورانی اسپیندل و P_c توان مورد نیاز برای برش قطعه کار است. t_{ms} و t_{me} به ترتیب زمان شروع و توقف چرخش اسپیندل و t_{cs} و t_{ce} به ترتیب زمان شروع و پایان برش است. انرژی پیشروی E_{feed} مورد نیاز برای حرکت میز یا ابزار برش در مسیر خطی داده شده است که این شامل موتورهای پیشروی محورهای X ، Y و Z است. این حرکت ها توسط کدهای G01، G02 و G03 برای پیشروی معین و G00 برای پیشروی سریع کنترل می شوند. قسمت اصلی مصرف انرژی در سیستم تعویض کننده ابزار، ناشی از چرخش تعویض کننده ابزار است. موتور با چرخش تعویض کننده، ابزار مورد نظر را به محل صحیح فراخوانی می کند. انرژی

محاسبه شده از انرژی مخصوص برش است. ماشین ابزار متشکل از انواع عملگرها مانند جابجاکنده قطعه کار، خنک کار، حمل براده و تعویض ابزار است. تمام این کارکردها نیازمند انرژی برای فعال کردن هستند. گوتوسکی و همکاران یک مدل پایه برای محاسبه میزان مصرف انرژی در برش ارائه دادند. آن ها بیان کردند که مقدار انرژی مورد نیاز برای برش واقعی، بخش بسیار کوچکی در مقایسه با کل انرژی مورد نیاز برای عملکرد ماشین ابزار است. این موضوع به خاطر غالب بودن انرژی ثابت ماشین ابزار است [۵]. مصرف انرژی در عملیات ماشین کاری را می توان با انتخاب ماشین ابزارهایی که توان مصرفی ثابت پایینی دارند، کاهش داد. با این حال در عمل، برخی از صنایع قدرت انتخاب و سرمایه گذاری محدودی دارند و می خواهند از منابع و ماشین آلات موجود خود استفاده کنند. بنابراین بهبود بهره وری انرژی با استفاده از منابع موجود یک نیاز فوری برای صنعت است. لی و همکاران بیان کردند که میزان تقاضای انرژی را می توان با بهبود اجزای ماشین ابزار (سیستم هیدرولیکی، سیستم خنک کننده و روانکاری) و با بهینه سازی برنامه ریزی تولید در فرایندهای ماشین کاری (به حداقل رساندن زمان آماده به کار) کاهش داد [۶]. کمپاتلی و همکاران تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق های محوری و شعاعی برش در فرزندکاری فولاد کربنی را بررسی کردند و نشان دادند که برای دستیابی به تولید کربن پایین تر، میزان نرخ براده برداری باید افزایش یابد [۷]. موری و همکاران دو دلیل عمده برای مصرف توان شامل: (۱) اسپیندل و محورهای جابجایی (۲) ایجاد نیروی برش برای غلبه بر مقاومت برشی را مطرح کردند. با استفاده از هماهنگ سازی حرکت محور و اسپیندل، یک استراتژی کنترلی برای کاهش توان مصرفی توسعه داده و بیان شد که با کاهش مقاومت و زمان برش، انرژی برشی کاهش می یابد [۸]. با این حال، بیان شده است که این شرایط برش بهینه نباید منجر به سایش زودتر ابزار و یا کیفیت غیر قابل قبول ماشین کاری شود. هی و همکاران یک مدل برای تخمین میزان مصرف انرژی مربوط به برنامه کنترل عددی NC در ماشین کاری را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها نتیجه گرفتند که این روش به انتخاب یک برنامه NC مؤثر از نظر انرژی کمک خواهد کرد [۹]. دیاز و همکاران به مقایسه ماشین کاری معمولی با ماشین کاری سرعت بالا پرداختند. ماشین کاری سرعت بالا به دلیل کاهش زمان، از نظر میزان مصرف انرژی مؤثرتر بود [۱۰]. در ماشین کاری با روانکاری کمینه (MQL) یا نزدیک به خشک، سیال خنک کننده، مخلوطی از هوا و روغن به صورت اسپری است که به صورت متناوب به منطقه ماشین کاری پاشیده می شود. در روش های معمول روانکاری، به مقدار زیادی سیال روانکار برای روانکاری مؤثر نیاز است؛ اما هزینه های زیاد تهیه، نگهداری و دفع این سیالات برشی، در کنار قوانینی که به دلایل تأثیرات مخرب زیست محیطی این مواد روز به روز سخت گیرانه تر می شوند، صنعت را به استفاده هرچه کمتر از سیال های برشی سوق می دهد [۱۱]. روانکاری کمینه جایگزین مناسبی برای روانکاری معمولی (تر) در فرایند ماشین کاری است [۱۲، ۱۳]. یکی از مشخصه های مهم قطعه کار، زبری سطح آن است. دست یابی به زبری سطح پایین همواره یکی از دغدغه های مهم صنعت گران است. حسن پور و همکاران [۱۴] تأثیر روش های روانکاری خشک، تر و کمینه را در فرزندکاری فولاد آلپاژی ۴۳۴۰ مورد بررسی قرار دادند.

مصرفی تعویض‌کننده ابزار را می‌توان توسط رابطه (۳) تخمین زد.

$$E_{\text{tool}} = P_{\text{tool}} \times t_{\text{tool}} \quad (3)$$

که P_{tool} معرف توان مصرفی موتور تعویض‌کننده ابزار و t_{tool} مدت زمان چرخش تعویض‌کننده ابزار است. تخمین انرژی مصرفی در پمپ‌های روانکاری را می‌توان با استفاده از رابطه (۴) انجام داد.

$$E_{\text{cool}} = P_{\text{cool}} \times (t_{\text{coe}} - t_{\text{cos}}) \quad (4)$$

که P_{cool} توان موتور پمپ روانکار و $(t_{\text{coe}} - t_{\text{cos}})$ نشان‌دهنده زمان فعالیت موتور پمپ روانکار است که توسط کد NC کنترل می‌شود. مصرف انرژی فن‌ها، سیستم سرووها و سایر اجزایی که دارای مصرف انرژی ثابت هستند تا ماشین در حالت عملیاتی باقی بماند، در این دسته قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در صورتی که دستگاه دارای مصرف‌کننده دیگری باشد که مصرف توان ثابتی دارد، می‌توان آن را در بخش انرژی مصرفی ثابت در نظر گرفت.

جدول ۱: شرایط و پارامترهای برشی

شرایط روانکاری	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت اسپیندل (rpm)
تر	۲۰	۱۰۰۰
کمیینه	۴۰	۱۸۰۰

در این تحقیق از دو نوع روانکاری مختلف استفاده شد. در سیستم روانکاری کمیینه، فقط کمپرسور مصرف‌کننده توان است. برای انجام آزمون‌ها و مقایسه مقدار انرژی مصرفی در شرایط روانکاری کمیینه و تر، ۸ مسیر به طول ۱۰۰ میلی‌متر و برای انجام آزمون تأییدکننده مدل‌سازی، با توجه به شکل ۲ مسیر L شکل به طول و عرض ۱۲۰ میلی‌متر انتخاب شد.

جدول ۲: پارامترهای سیستم روانکاری کمیینه

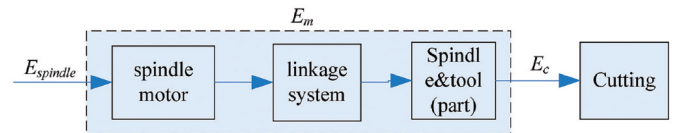
نوع روانکار	محل اعمال اسپری	روش پاشش سیال	دبی سیال (ml/h)	فشار هوا (bar)
روغن خودرو SAE1040	سطح قطعه	خارجی	۳۰	۶

پارامترهای برشی متغیر در آزمایش‌های تجربی برای مقایسه میزان مصرف انرژی در شرایط روانکاری کمیینه و تر در جدول ۳ ذکر شده است. برای اندازه‌گیری جریان، ولتاژ مصرفی و دیگر پارامترهای ماشین ابزار باید اتصالات دستگاه توان سنج را به ورودی سه فاز دستگاه فرز متصل کرد تا جریان و ولتاژ مصرفی به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شود. در همه آزمایش‌های شیار تراشی، عمق برش محوری ثابت و برابر ۰/۵ میلی‌متر بود.

جدول ۳: سطوح پارامترهای ورودی آزمایش‌های تجربی

شماره آزمایش	حالت روانکاری	سرعت اسپیندل (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)
۱	تر	۱۰۰۰	۲۰
۲	تر	۱۰۰۰	۴۰
۳	تر	۱۸۰۰	۲۰
۴	تر	۱۸۰۰	۴۰
۵	کمیینه	۱۰۰۰	۲۰
۶	کمیینه	۱۰۰۰	۴۰
۷	کمیینه	۱۸۰۰	۲۰
۸	کمیینه	۱۸۰۰	۴۰

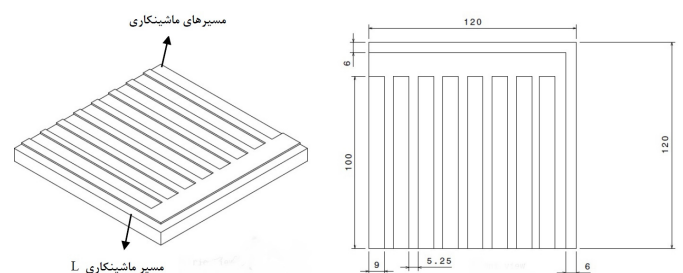
برای آزمون تأیید مدل‌سازی، پارامترهای سرعت پیشروی $35 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ، سرعت 1200 rpm و شرایط روانکاری تر انتخاب شد. پس از انجام آزمون تأیید مدل‌سازی، انرژی مصرفی واقعی با حالت تئوری مقایسه و با اطمینان از میزان خطای کم روابط تئوری و تأیید دقت مدل‌سازی، آزمایش‌های دیگر انجام شد. در شکل ۳ پروفایل توان مصرفی اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده در ماشین‌کاری قطعه‌کار در آزمون تأیید سازی مدل نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است پروفایل توان مصرفی فرایند فرزکاری، اجزا انرژی مصرفی شده ثابت، اسپیندل، برش و مایع خنک‌کار قابل مشاهده است. پس از انجام آزمایش‌ها، مقادیر میانگین زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج اندازه‌گیری شده است. برای هر نمونه دو بار زبری سطح اندازه‌گیری و میانگین اندازه‌های به‌دست‌آمده به عنوان زبری



شکل ۱: جریان انرژی در اسپیندل [۱۶].

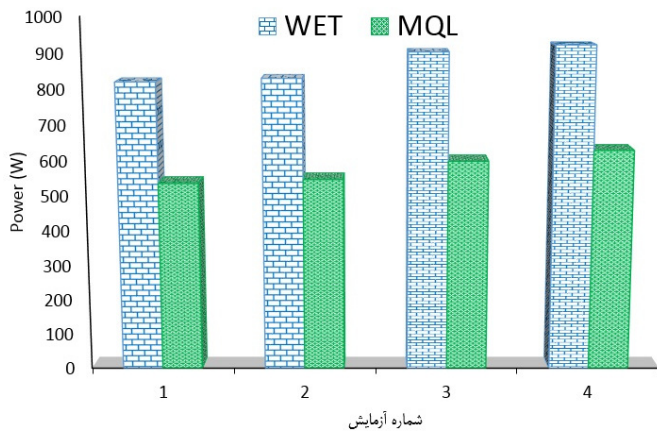
۳ بررسی تجربی اثر روانکاری کمیینه بر انرژی مصرفی و کیفیت سطح

در این قسمت، فرزکاری یک قطعه نمونه برای برآورد مصرف انرژی، مورد بررسی قرار گرفته است. جهت انجام آزمایش‌ها، قطعه‌کار از جنس فولاد ضد زنگ AISI 316 همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده در ابعاد ۱۲۰ میلی‌متر طول و عرض طراحی گردید. ابزار فرز انگشتی از جنس HSS با قطر ۹ میلی‌متر انتخاب شد. شرایط برش در جدول ۱ ذکر شده است. جهت انجام آزمایش‌ها از دستگاه فرز مدل VMC-850 مونتاژ شرکت ماشین‌سازی تبریز و برای اندازه‌گیری توان مصرفی توسط ماشین ابزار از دستگاه توان سنج مدل KEW-6315 ساخت شرکت Kyoritso استفاده شد. پارامترهای سیستم روانکاری کمیینه مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد. ابتدا آزمایش‌ها در شرایط تر و سپس در حالت روانکاری کمیینه انجام گرفت.



شکل ۲: قطعه کار مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی.

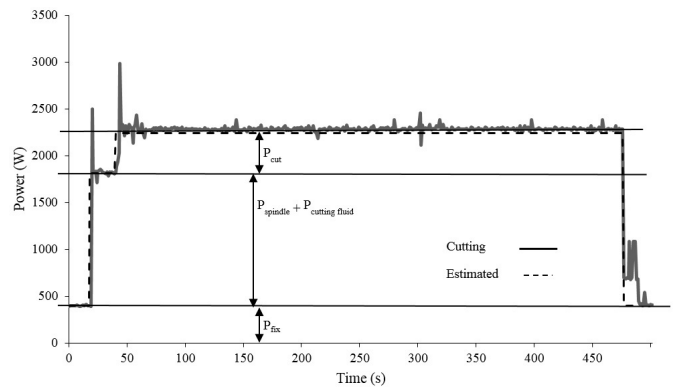
پدیده است.



شکل ۴: توان مصرفی در آزمایش‌های تجربی.

برای بررسی میزان تأثیر هر پارامتر بر خروجی می‌توان از نمودار اثرات اصلی که در شکل ۵ با استفاده از نرم افزار مینی تب رسم شده است، استفاده نمود. تأثیر پارامترهای ورودی آزمایش‌ها بر زبری سطح میانگین در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود روانکاری کمینه باعث کاهش میانگین زبری سطح نسبت به روانکاری تر شده است. پس اندازه‌گیری زبری سطح حاصل از آزمایش‌ها در حالت کمینه، زبری سطح به طور متوسط ۱۴٪ نسبت به روش تر کمتر است. همچنین افزایش سرعت برشی یا سرعت دورانی اسپیندل باعث کاهش زبری سطح و افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش زبری سطح شده است. در روش تر به دلیل غیریکنواخت بودن و کم بودن میزان نفوذ سیال به منطقه برش و افزایش دمای ناحیه برش، زبری سطح قطعه در نقاط مختلف یکنواخت نبوده و زبری سطح نهایی افزایش یافته است. علت کاهش زبری سطح در روش روانکاری کمینه، بهبود نفوذ ذرات ریز سیال به منطقه برش توسط هوای فشرده است که باعث کاهش اصطکاک بین سطوح ابزار و قطعه و بهبود انتقال گرما از منطقه برش می‌شود. تغییر سرعت برشی بسته به مقدار عددی آن سبب تغییر دمای ناحیه برش، میزان تغییر شکل پلاستیک، اصطکاک و همچنین تشکیل یا عدم تشکیل لبه انباشته می‌شود که هر یک از این پارامترها سبب تغییر در زبری سطح قطعه‌کار می‌شوند. بطور کلی، روند مشاهده شده در شکل ۵ در مورد نحوه اثر پارامترهای سرعت برشی و نرخ پیشروی بر زبری سطح، با اکثر تحقیقات مشابه در این زمینه مطابقت دارد [۱۸، ۱۹]. در شکل ۶ تأثیر همزمان سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی بر توان برشی مشاهده می‌شود. با افزایش نرخ پیشروی توان مصرفی افزایش یافته است. همچنین با افزایش سرعت برشی مقدار توان مصرفی با شیب بیشتری نسبت به نرخ پیشروی افزایش یافته است که نشان دهنده اثر بیشتر سرعت اسپیندل بر توان مصرفی است. علت این موضوع، سهم بیشتر موتور اسپیندل نسبت به موتور محورهای پیشروی در مصرف توان است. در شکل ۷ نیز تأثیر همزمان سرعت دورانی اسپیندل و نرخ پیشروی بر زبری سطح نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ پیشروی زبری سطح افزایش و با افزایش سرعت اسپیندل، زبری سطح کاهش یافته است.

سطح متوسط Ra ثبت شد. پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج داده‌های به‌دست‌آمده از دستگاه توان سنج، نتایج مورد تحلیل قرار گرفت. نزدیکی دو نمودار و مقدار اندک خطا در شکل ۳ نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی انجام‌شده در این تحقیق است.



شکل ۳: پروفایل مصرفی واقعی و تئوری توان ماشین ابزار در آزمون تأیید مدل‌سازی.

مصرف انرژی کل ۲۴۶/۸ Wh تخمین زده شده ولی مقدار واقعی آن ۲۳۴/۲ Wh است. تفاوت مقادیر تخمین زده شده و واقعی ۵٪ است که می‌تواند به دلیل فرسوده شدن دستگاه و تجهیزات آن و پیشرفت سایش ابزار هنگام برش و در نتیجه افزایش انرژی مخصوص برش باشد. برای مقایسه میزان مصرف انرژی در حالت‌های روانکاری کمینه و تر، در آزمایش‌های ذکر شده در جدول ۲ توان مصرفی دستگاه فرز توسط دستگاه توان سنج اندازه‌گیری و ثبت گردید. با توجه به شکل ۴، توان مصرفی در سیستم روانکاری کمینه نسبت به سیستم روانکاری تر که جزء تجهیزات ماشین کنترل عددی است، کمتر است. دلیل این امر عدم نیاز به پمپ و سایر تجهیزات در سیستم روانکاری کمینه و تنها نیاز به یک کمپرسور هوای فشرده است. لازم به ذکر است به دلیل اینکه کمپرسور هوای فشرده دائم در حال کار نیست و توان مصرفی آن تابعی از مدت زمان عملکردش است، فقط مدت زمانی که برای ماشین‌کاری قطعه استفاده شده، در نظر گرفته شده است. چون در ماشین‌کاری با استفاده از روانکاری کمینه، نفوذ سیال به سطح مشترک ابزار و قطعه‌کار بهتر صورت می‌گیرد، اثرات روانکاری بهبود و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار کاهش یافته و در نتیجه نیروی ماشین‌کاری و توان مصرفی ماشین کمتر می‌شود. با توجه به شکل ۴ متوسط توان مصرفی در شرایط روانکاری کمینه از روانکاری تر حدوداً ۳۳ درصد کمتر است. همانطور که اشاره شد این تفاوت به این دلیل است که توان مصرفی پمپ سیال برشی در حالت روانکاری کمینه لحاظ نمی‌شود و مقدار توان مصرفی کمپرسور نیز از مقدار توان مصرفی پمپ سیال برشی کمتر و مدت زمان کمتری نیز فعال است و در مجموع نسبت به سیستم روانکاری تر، ماشین ابزار در حالت روانکاری کمینه توان مصرفی کمتری دارد.

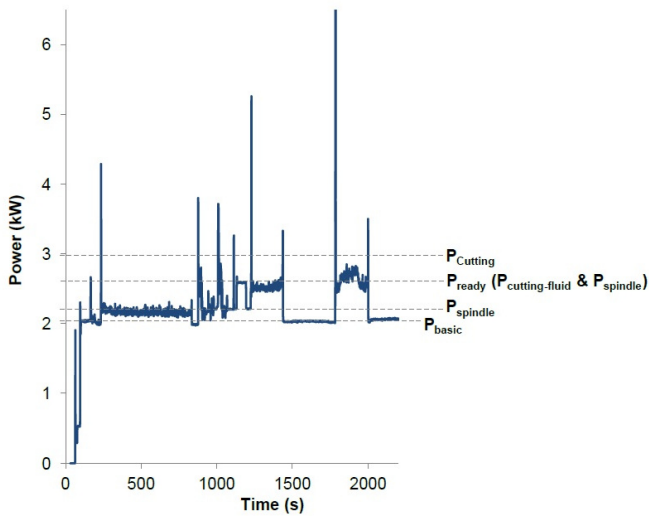
بر اساس نتایج بدست آمده حالت روانکاری کمینه ۱۶/۳٪ کمتر از شرایط روانکاری تر انرژی مصرف می‌کند. علاوه بر انرژی مصرفی، زبری سطح قطعه‌کار در آزمایش‌های مختلف انجام شده با شرایط ذکر شده در جدول ۲ نیز مورد تحقیق قرار گرفته است. هدف از تحلیل آزمایش‌های مهندسی، بررسی فاکتورهای مؤثر بر یک پدیده و تعامل رابطه بین این فاکتورها بر تغییر

SP اندازه‌گیری شد.

جدول ۴: شرایط برشی در آزمایش‌های بررسی اثر استراتژی ماشین‌کاری بر انرژی مصرفی [۱۷].

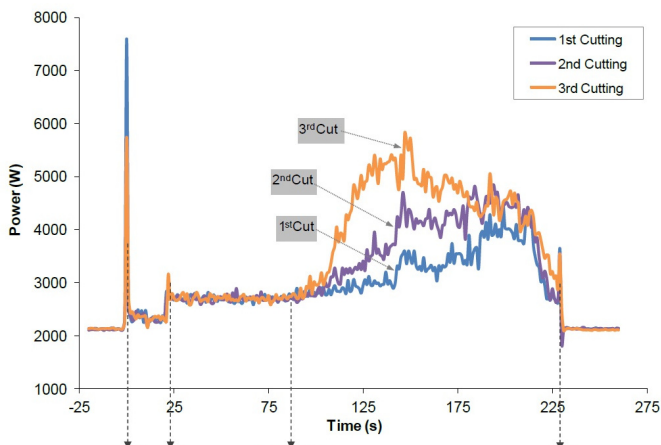
پارامترها	
۸۳°	سرعت اسپیندل (rpm)
۲۵° و ۵°	نرخ پیشروی (mm/min)
۰/۵	عمق برشی (mm)
خنک‌کننده معمولی	شرایط محیطی

شکل ۸ مربوط به پروفایل توان مصرفی فرایند فرزکاری، انرژی مصرف‌شده توسط نیاز اولیه ماشین، اسپیندل، برش، پیشروی و مایع برشی نشان داده شده است.

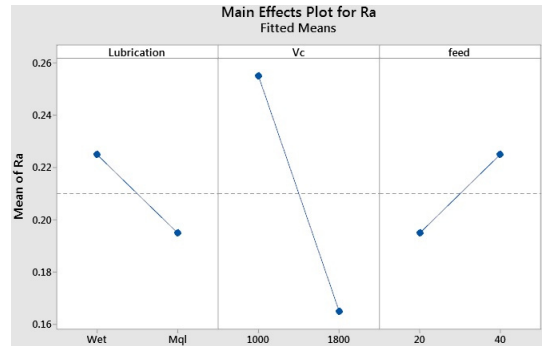


شکل ۸: پروفایل مصرف توان ماشین ابزار در فرزکاری [۱۷].

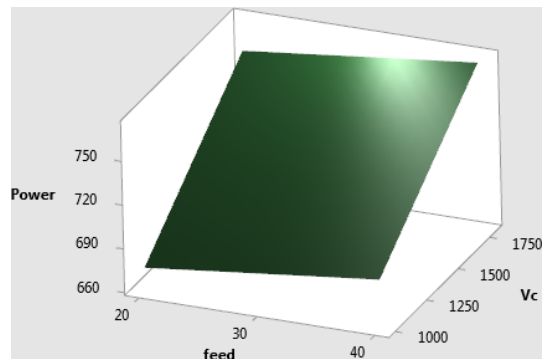
شکل ۹ پروفایل توان را برای سه آزمون برش بر روی قطعه فولادی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹ مصرف انرژی در شرایط برش یکسان با سایش ابزار افزایش می‌یابد که به علت تأثیر انرژی برش مخصوص است. شرایط ابزار و قطعه‌کار تأثیر زیادی بر انرژی برش مخصوص برش دارد. سایش ابزار موجب افزایش نیروی برشی و در نتیجه مصرف توان و انرژی بیشتر می‌شود.



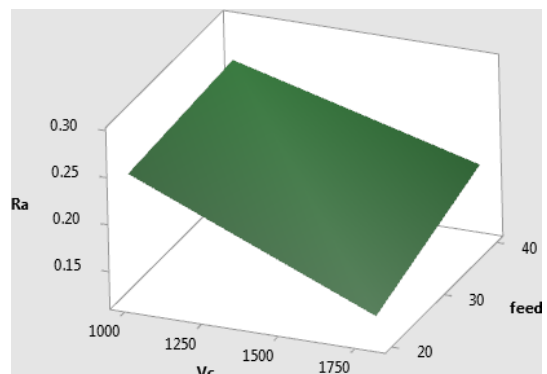
شکل ۹: پروفایل توان مصرفی در فرزکاری در سه آزمون برش متوالی [۱۷].



شکل ۵: تأثیر پارامترهای ورودی بر زبری سطح.



شکل ۶: تأثیر همزمان سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی بر توان مصرفی.



شکل ۷: تأثیر همزمان سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی بر کیفیت سطح.

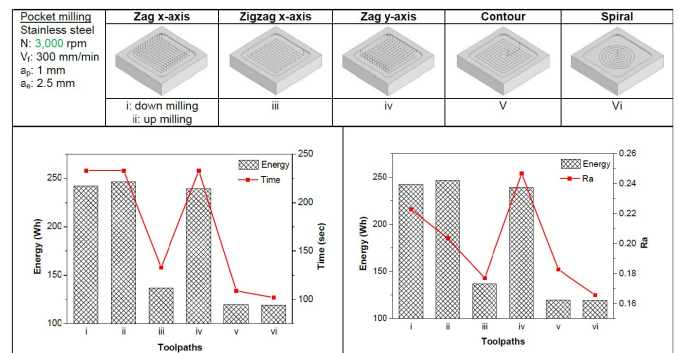
۱.۳ بررسی اثر استراتژی‌های ماشین‌کاری بر انرژی مصرفی در یک فرایند برش واقعی

در بخش قبل، اثر نوع روانکاری، سرعت برشی و پیشروی بر انرژی مصرفی فرایند برش و زبری سطح قطعه‌کار توسط نویسندگان مقاله بصورت تجربی بررسی و نتایج مربوط به انرژی با روابط تئوری در یک حالت خاص (آزمون تأیید) مقایسه شد. در این بخش، اثر استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری بر انرژی مصرفی در فرایند فرزکاری که در مرجع [۱۷] ذکر شده است ارائه می‌شود. در این مطالعه فولاد ضد زنگ T316L به عنوان قطعه‌کار به اندازه ۱۵۰ میلی‌متر عرض و طول و ۲۰ میلی‌متر ارتفاع استفاده شد. شرایط برش در جدول ۴ ذکر شده است. مصرف برق بر روی دستگاه فرز مدل Hi-tachi Seiki VG45 با استفاده از دستگاه توان‌سنج مدل ELITEpro

مراجع

- [1] IEA. World Electricity Consumption in 2011, 2011. www.iea.org/statistics/statisticsearch/report/?country=WORLD&product=electricityandheat&year=2011.
- [2] Hao, C. W. Smes can do bit for energy conservation, too siew, 2011. sg/node/666.
- [3] Kordonowy, David Nathaniel. *A power assessment of machining tools*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [4] Dahmus, Jeffrey B and Gutowski, Timothy G. An environmental analysis of machining. in *ASME 2004 international mechanical engineering congress and exposition*, pp. 643-652. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2004.
- [5] Gutowski, Timothy, Dahmus, Jeffrey, and Thiriez, Alex. Electrical energy requirements for manufacturing processes. in *13th CIRP international conference on life cycle engineering*, vol. 31, pp. 623-638. Leuven, Belgium, 2006.
- [6] Li, Wen, Zein, André, Kara, Sami, and Herrmann, Christoph. An investigation into fixed energy consumption of machine tools. in *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*, pp. 268-273. Springer, 2011.
- [7] Campatelli, Gianni, Lorenzini, Lorenzo, and Scippa, Antonio. Optimization of process parameters using a response surface method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel. *Journal of cleaner production*, 66:309-316, 2014.
- [8] Mori, Masahiko, Fujishima, Makoto, Inamasu, Yasuhiro, and Oda, Yohei. A study on energy efficiency improvement for machine tools. *CIRP annals*, 60(1):145-148, 2011.
- [9] He, Yan, Liu, Fei, Wu, Tao, Zhong, FP, and Peng, Bo. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(2):255-266, 2012.
- [10] Diaz, Nancy, Helu, Moneer, Jarvis, Andrew, Tonissen, Stefan, Dornfeld, David, and Schlosser, Ralf. Strategies for minimum energy operation for precision machining. 2009.
- [11] Lawal, Sunday Albert, Choudhury, Imtiaz Ahmed, and Nukman, Yusoff. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, 41:210-221, 2013.
- [12] Fratila, Domnita and Caizar, Cristian. Application of taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of almg3. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7):640-645, 2011.
- [13] Sarıkaya, Murat and Güllü, Abdulkadir. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in cnc turning under mql. *Journal of Cleaner Production*, 65:604-616, 2014.
- [14] Hassanpour, Hamed, Sadeghi, Mohammad Hossein, et al. Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel. *Modares Mechanical Engineering*, 14(14):50-60, 2015.

شکل ۱۰ میزان مصرف انرژی در فرزکاری با استراتژی‌های مختلف برش را نشان داده است. در شرایط برش یکسان (سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش) مصرف انرژی به انتخاب مسیر حرکت ابزار و حالت برش وابسته است. ارزیابی‌ها نشان داد که در عملیات فرزکاری، استراتژی‌های کانتور تراشی^۴ و مارپیچ^۵، در مقایسه با استراتژی‌های زیگزاک^۶، کمترین مصرف انرژی را دارا است. استراتژی‌های کانتور تراشی و مارپیچ باعث کاهش مصرف انرژی به اندازه یک پنجم نسبت به فرزکاری زیگزاک می‌شود. این مطالعه نشان داد که فرصت‌های قابل توجهی برای کاهش تقاضای انرژی در ماشین‌کاری با انتخاب مسیر ابزار مناسب یا بهینه‌سازی مسیرهای ابزار وجود دارد. تأثیر استراتژی‌های ماشین‌کاری بر زمان برش به وضوح در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. در شکل ۱۰ نشان داده شده است که استراتژی‌های ماشین‌کاری که بهترین سطح را تولید می‌کنند، مصرف انرژی را نیز کاهش داده است. نوع فرزکاری موافق یا مخالف اثر معناداری بر مصرف انرژی نداشته است ولی زبری سطح فرزکاری مخالف کمتر از فرزکاری موافق است.



شکل ۱۰: مصرف انرژی در استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری [۱۷].

۴ نتیجه‌گیری

مدل‌سازی میزان مصرف انرژی در فرایند ماشین‌کاری نیاز به مدل‌سازی اجزای مختلف ماشین ابزار دارد. روش روانکاری کمینه نسبت به روش‌های روانکاری خشک و تر (معمولی) روشی جدیدتر در روانکاری است و با توجه به پژوهش‌های پیشین از نظر عملکردی مناسب است. با توجه به نتایج این تحقیق روش روانکاری کمینه از نظر توان مصرفی نیز بهینه است و نسبت به روش روانکاری تر، توان کمتری مصرف می‌کند. مجموع توان مصرفی ماشین ابزار در حالت روانکاری کمینه نسبت به روش روانکاری تر ۱۶/۳ درصد کمتر است. مقایسه توان مصرفی تجربی در یک فرایند برش واقعی، با توان تئوری محاسبه‌شده از روابط مربوط به مدل‌سازی نشان داد که مدل‌سازی معرفی‌شده در این مقاله برای تخمین مصرف انرژی یا توان در فرایند فرزکاری از دقت بالایی برخوردار است. همچنین در حالت کمینه، زبری سطح به طور متوسط ۱۴٪ نسبت به روش تر کمتر است. سایش ابزار نقش مهمی در افزایش تقاضای انرژی دارد. انتخاب استراتژی (مسیر) حرکت ابزار تأثیر قابل توجهی در زمان فرایند دارد و می‌تواند به صرفه جویی قابل توجه انرژی در فرایند ماشین‌کاری منجر شود.

^۴contour ^۵spiral ^۶zigzag

- impact of toolpath strategy. *Journal of Cleaner Production*, 78:63-74, 2014.
- [18] Heydari, Behbood, Abootorabi Zarchi, Mohammad Mahdi, et al. The effect of workpiece hardness and cutting parameters on surface roughness in dry hard turning of x210cr12 cold tool steel. *Modares Mechanical Engineering*, 17(6):241-247, 2017.
- [19] Özel, Tugrul, Hsu, Tsu-Kong, and Zeren, Erol. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened aisi h13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(3-4):262-269, 2005.
- [15] Nayeri, Mohammad Reza, Abootorabi Zarchi, Mohammad Mahdi, and Haddad Zadeh, Mohammad. The effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in hard turning of 100cr6 bearing steel with nano-cbn tool. *Modares Mechanical Engineering*, 17(3):263-269, 2017.
- [16] He, Yan, Liu, Fei, Wu, Tao, Zhong, FP, and Peng, Bo. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(2):255-266, 2012.
- [17] Aramcharoen, Ampara and Mativenga, Paul T. Critical factors in energy demand modelling for cnc milling and