



## Estimation of Energy Consumption in Milling Process with Minimum Quantity Lubrication and Comparison with Wet Cutting State

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Bayat M.<sup>1</sup> MSc,  
Abootorabi M.M.\*<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Bayat M, Abootorabi M.M. Estimation of Energy Consumption in Milling Process with Minimum Quantity Lubrication and Comparison with Wet Cutting State. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(6):1701-1708.

### ABSTRACT

Reducing energy consumption in production is an urgent need. In manufacturing processes, especially machining, more than 90% of the environmental impacts are due to energy consumption in machine tools. The purpose of the present study is to estimate and compare the energy consumption of AISI 316 steel milling process in conventional (wet) and minimum quantity lubrication (MQL) modes as well as the experimental measurement of energy consumption in each of these two modes. Studies have suggested different types of energy consumption modeling in machining but few studies have been conducted on the use of these modeling techniques and the minimum quantity lubrication method has been rarely compared with the wet state in terms of energy consumption. Empirical experiments were used to confirm the modeling performed to predict energy consumption in the milling process. The results show that the proposed method is efficient and practical for predicting energy consumption with 5% error. After confirming the modeling, using two levels for feed rate and spindle speed and applying full factorial design of experiments, energy and power consumption in MQL and wet cutting modes using the power meter connected to the input 3-phase power cable of the milling machine were experimentally measured. Energy consumption in the minimum quantity lubrication method was decreased by 16% compared to the wet state. The average power consumption in MQL milling is 33% lower than in wet milling.

**Keywords** Milling; Energy Consumption; Minimum Quantity Lubrication; Power; AISI 316 Steel

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Faculty, Technical & Engineering Complex, Yazd University, Yazd, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Technical & Engineering Complex, Yazd University, Safaieye, Yazd, Iran  
Phone: +98 (35) 31233024  
Fax: +98 (35) 38212781  
abootorabi@yazd.ac.ir

#### Article History

Received: February 14, 2020  
Accepted: March 9, 2020  
ePublished: June 20, 2020

### CITATION LINKS

[1] US: World electricity consumption in 2011; 2013 [2] Netherlands: SME energy checkup; making the most out of energy (SME ENERGYCHECKUP); 2017 [3] Concept Description for CECIMO's Self-Regulatory Initiative (SRI) for the Sector Specific Implementation of the Directive 2005/32/EC [4] A power assessment of machining tools [5] An environmental analysis of machining [6] Electrical energy requirements for manufacturing processes [7] An investigation into fixed energy consumption of machine tools [8] Optimization of process parameters using a response surface method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel [9] A study on energy efficiency improvement for machine tools [10] Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining [11] Strategies for minimum energy operation for precision machining [12] Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy [13] Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid [14] Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel [15] The effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in hard turning of 100Cr6 bearing steel with Nano-CBN tool [16] Manufacturing processes for engineering materials [17] MQL Handbook [18] Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL

## تخمین انرژی مصرفی در فرآیند فرزکاری با روانکاری کمینه و مقایسه با حالت برش تر

مسعود بیات MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی ابوترابی PhD\*

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### چکیده

کاهش مصرف انرژی در تولید یک نیاز ضروری است. در فرآیندهای تولید به ویژه ماشین کاری، بیش از ۹۰٪ اثرات زیست محیطی، ناشی از مصرف انرژی در ماشین های ابزار است. هدف مطالعه حاضر، تخمین و مقایسه انرژی مصرفی فرآیند فرزکاری فولاد AISI 316 در حالت های روانکاری معمولی (تر) و کمینه و همچنین اندازه گیری تجربی انرژی مصرفی در هر کدام از این دو حالت است. بنابر مطالعات انجام شده، انواع مدل سازی انرژی مصرفی در ماشین کاری پیشنهاد شده ولی در مورد کاربرد این مدل سازی ها مطالعات کمی صورت گرفته و روش روانکاری کمینه از نظر میزان مصرف انرژی با روش تر کمتر مقایسه شده است. به منظور تایید مدل سازی انجام شده برای پیش بینی انرژی مصرفی در فرآیند فرزکاری، از آزمایش های تجربی استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد روش ارائه شده برای پیش بینی میزان مصرف انرژی با توجه به خطای ۵ درصدی، کارآمد و عملی است. پس از تایید مدل سازی انجام شده، با استفاده از ۲ سطح برای نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل و به کارگیری روش طراحی آزمایش کامل، انرژی و توان مصرفی در حالت های برش کمینه و تر به صورت تجربی با استفاده از توان سنج متصل شده به کابل برق ورودی ۳ فاز دستگاه ماشین فرز اندازه گیری شد. مصرف انرژی در روش روانکاری کمینه نسبت به حالت تر ۱۶٪ کاهش یافته است. متوسط توان مصرفی در فرزکاری با روانکاری کمینه ۳۳٪ کمتر از فرزکاری در حالت تر است.

کلیدواژه ها: فرزکاری، انرژی مصرفی، روانکاری کمینه، توان، فولاد AISI 316

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

\*نویسنده مسئول: abootorabi@yazd.ac.ir

### مقدمه

با افزایش روزافزون جمعیت، تقاضای بیشتری برای محصولات به وجود آمده و این سوال را مطرح کرده است که چگونه صنایع تولیدی می توانند با افزایش تقاضای محصولات و درآمد حاصل از فروش، همزمان از پایداری محیط زیست حمایت کنند. مصرف انرژی در فرآیندهای ساخت و تولید یکی از عوامل اصلی افزایش انتشار دی اکسید کربن است زیرا غالباً سوخت های فسیلی منبع تولید انرژی الکتریکی هستند. بخش تولید یکی از پایه های کلیدی رشد در بسیاری از کشورها و مصرف کننده عمده انرژی در جهان است؛ بنابراین صنایع باید هوشمندتر باشند تا میزان بهره وری را افزایش و شدت انرژی مصرفی و هزینه های تولید را کاهش دهند. آژانس بین المللی انرژی مصرف برق در جهان را در سال ۲۰۱۱ گزارش و اعلام کرد که بخش صنعت بزرگ ترین مصرف کننده برق با ۴۲/۶٪ است [1]. این مقدار بیانگر سهم بالای مصرف انرژی در بخش

تولید است. پیاده سازی روش های افزایش بهره وری انرژی برای شرکت های کوچک و متوسط در اتحادیه اروپا و هند قابلیت ذخیره انرژی ۷ تا ۲۲ درصدی را به ارمغان آورده است [2]. تلاش برای کشف راه های جدید تجزیه، تحلیل و مدل سازی مصرف انرژی در فرآیندهای ماشین کاری به دلیل نیاز به افزایش بهره وری انرژی است. فرآیندهای ماشین کاری سنتی مانند تراشکاری، فرزکاری و سوراخ کاری به طور گسترده در تولید مورد استفاده قرار می گیرند. محبوبیت آنها به دلیل توانایی تولید هندسه های مختلف سه بعدی با دقت ابعادی بالا و هزینه مناسب است. برق، منبع اصلی انرژی برای ماشین های ابزار است. محل های مصرف انرژی در ماشین های ابزار شامل اسپیندل، محورها، مقاومت برشی ماده قطعه کار و موارد جانبی شامل پمپ سیال برش و کنترل کننده کامپیوتری است. بیش از ۹۰٪ از اثرات زیست محیطی فرآیندهای تولیدی، ناشی از مصرف انرژی الکتریکی در ماشین های ابزار مختلف است. دی اکسید کربن زمانی آزاد می شود که الکتریسیته از منابع سوختی غنی از کربن تولید شود، بنابراین انرژی مصرف شده در فرآیند ماشین کاری را می توان برای محاسبه میزان کربن منتشر شده استفاده کرد [3]. کوردونوی [4] مصرف انرژی در ماشین کاری را به دو قسمت ثابت و متغیر دسته بندی کرد. بخش ثابت شامل دو زیر گروه شروع و راه اندازی و بخش متغیر شامل سروو موتور، کامپیوتر، اسپیندل، سیال برش و غیره است که به توانایی های ماشین ابزار بستگی دارد و تحت تاثیر نرخ براده برداری است. انرژی برشی در فرآیند برش مواد را می توان از طریق انرژی مخصوص برش هنگام تشکیل براده که انرژی مورد نیاز برای برداشتن حجم واحد از مواد را نشان می دهد، تخمین زد [5]. در عمل، انرژی مصرف شده توسط عملیات ماشین کاری بسیار بیشتر از انرژی محاسبه شده از طریق انرژی مخصوص برش است. ماشین ابزار متشکل از انواع عملگرها مانند جابجا کننده قطعه کار، سیستم خنک کار، سیستم حمل براده و مکانیزم تعویض ابزار است. این کارکردها نیازمند انرژی برای فعال کردن هستند. گوتوسکی و همکاران [6]، یک مدل پایه برای محاسبه میزان مصرف انرژی در برش ارائه دادند. آنها بیان کردند که مقدار انرژی مورد نیاز برای عمل برش یا مقداری از انرژی که در محل تماس ابزار با قطعه کار صرف برش و تغییر شکل ماده می شود، بخش بسیار کوچکی در مقایسه با کل انرژی مورد نیاز برای عملکرد ماشین ابزار است. این نتیجه به خاطر غالب بودن انرژی ثابت ماشین ابزار است. 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 [7]، بیان کردند که میزان مصرف انرژی در ماشین کاری را می توان با بهبود اجزای ماشین ابزار (سیستم هیدرولیکی، سیستم خنک کننده و روانکاری) و بهینه سازی برنامه ریزی تولید برای حداقل کردن زمان آماده به کار ماشین، کاهش داد. کمیاتلی و

روش‌های خشک و تر افزایش یافت. نیری و همکاران<sup>[15]</sup>، تاثیر روانکاری کمینه بر زبری سطح در سخت تراشی فولاد بلبرینگ 100Cr6 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 به‌طور متوسط به ترتیب ۴۲ و ۳۰٪ کاهش یافته است. مرور مقالات منتشرشده در زمینه انرژی مصرفی در فرآیندهای ماشین‌کاری نشان داد که بررسی تاثیر روانکاری کمینه بر انرژی مصرفی فرآیند فرزکاری و مقایسه با حالت تر نیاز به مطالعه بیشتر دارد. در این مقاله، روشی برای تخمین میزان مصرف انرژی در فرآیند فرزکاری با روانکاری کمینه ارائه و دقت آن با استفاده از یک آزمایش برش واقعی بررسی و نتایج با حالت برش تر مقایسه شده است. به‌طور کلی، در مورد کاربرد تخمین انرژی مصرفی در فرآیندهای برش، مطالعات کمی انجام شده است. نوآوری اصلی این مقاله، مقایسه روانکاری کمینه با روش تر از نظر میزان مصرف انرژی است.

### تخمین انرژی مصرفی براساس اجزای ماشین ابزار

در این تحقیق، برای تخمین انرژی مصرفی در فرآیند فرزکاری از مدل آرمچارون و ماتئیونگا<sup>[12]</sup> استفاده شد ولی روابطی به آن اضافه و اصلاحاتی صورت گرفت. در مدل‌سازی آنها، روانکاری کمینه و انرژی مصرفی توسط اجزای ثابت به‌صورت جزئی و جداگانه در نظر گرفته نشده است. در روش تخمین مصرف انرژی ماشین ابزار براساس اجزا، بایستی تک تک اجزا مصرف‌کننده انرژی را در نظر گرفت و انرژی مصرفی توسط آنها را با یکدیگر جمع کرد. انرژی مصرفی در یک ماشین ابزار کنترل عددی را می‌توان به انرژی مورد نیاز اجزا شامل اسپیندل، محورهای پیشروی، برش، پمپ سیستم روانکاری، سیستم تعویض ابزار و دیگر اجزا که مصرف انرژی ثابتی دارند به‌صورت رابطه ۱ تجزیه کرد:

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

که  $E_{total}$  انرژی مصرفی کل و  $E_{spindle}$ ،  $E_{feed}$ ،  $E_{cutting}$ ،  $E_{cool}$ ،  $E_{tool}$  و  $E_{fix}$  به‌ترتیب معرف انرژی مصرفی توسط اسپیندل، محورهای پیشروی، برش، سیستم روانکاری، سیستم تعویض‌کننده ابزار و انرژی مصرفی توسط اجزایی که انرژی مصرفی ثابت دارند است. در ادامه، هریک از این مولفه‌های مصرف انرژی شرح داده شده‌اند.

#### انرژی مصرفی اسپیندل

انرژی مصرفی اسپیندل  $E_{spindle}$ ، انرژی مورد نیاز در مجموعه اسپیندل برای حرکت دورانی است که رابطه مستقیم با دور اسپیندل دارد و به‌صورت رابطه ۲ تخمین زده می‌شود<sup>[12]</sup>:

$$E_{spindle} = P_{spindle} \times t_{spindle} \quad (2)$$

که  $P_{spindle}$  توان مصرفی اسپیندل و  $t_{spindle}$  زمان کل مورد نیاز برای فعالیت اسپیندل است.  $t_{spindle}$  از رابطه ۳ محاسبه می‌شود که اختلاف زمان روشن ( $t_{spindle\ start}$ ) و خاموش ( $t_{spindle\ end}$ ) شدن اسپیندل است. این توان مصرفی اسپیندل در حالتی است که اسپیندل در حال چرخش در سرعت مشخص است و هیچ عمل برش یا حذف مواد صورت نمی‌گیرد.

همکاران<sup>[8]</sup>، تاثیر پارامترهای سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری و شعاعی در فرزکاری فولاد کربنی را بررسی کردند و نشان دادند که برای دستیابی به تولید کربن پایین‌تر، میزان نرخ براده‌برداری باید افزایش یابد. موری و همکاران<sup>[9]</sup>، دو منبع عمده مصرف توان شامل اسپیندل و محورهای جابجایی و ایجاد نیروی برش برای غلبه بر مقاومت برشی قطعه‌کار را مطرح کردند. با استفاده از هماهنگ‌سازی حرکت محور و اسپیندل، یک استراتژی کنترلی برای کاهش توان مصرفی ارائه و بیان شد که با کاهش مقاومت و زمان برش، انرژی برشی کاهش می‌یابد اما این شرایط بهینه برش نباید منجر به سایش زودتر ابزار و یا کیفیت غیرقابل قبول سطح قطعه‌کار شود. هی و همکاران<sup>[10]</sup>، یک مدل برای تخمین میزان مصرف انرژی با توجه به برنامه کنترل عددی (NC) در ماشین‌کاری ارائه دادند و نتیجه گرفتند که این روش به انتخاب یک برنامه بهینه از نظر انرژی کمک می‌کند. دیاز و همکاران<sup>[11]</sup>، با مقایسه ماشین‌کاری معمولی و ماشین‌کاری سرعت بالا نتیجه گرفتند که ماشین‌کاری سرعت بالا به‌دلیل کاهش زمان، از نظر میزان مصرف انرژی موثرتر است. آرمچارون و ماتئیونگا<sup>[12]</sup> عوامل مهم موثر بر میزان انرژی مصرفی در دستگاه فرز و تاثیر استراتژی‌های ماشین‌کاری یا مسیرهای حرکت ابزار بر آن را مورد بحث قرار دادند. مدل‌سازی صورت‌گرفته در سطح ماشین ابزار بود و انرژی مصرف‌شده توسط ماشین ابزار در سیستم کنترل، واحد خنک‌کاری، روانکاری، موتور اسپیندل، فرآیند تولید و غیره در نظر گرفته شد. مدل‌سازی صورت‌گرفته در سطح فرآیند به‌دلیل در نظر گرفتن تمام اجزای مصرف‌کننده انرژی در ماشین ابزار از دقت مناسبی برخوردار است اما، ویژگی‌های دقیق سیستم پیشروی در تنظیمات مختلف دستگاه به خوبی مشخص نشده است. آنها نشان دادند که استراتژی‌های حرکت کانتور و مارپیچ، میزان مصرف انرژی را در مقایسه با مسیر حرکت ابزار به‌صورت زیگزاگ تا پنج برابر کاهش می‌دهد. در این مطالعه، اثر جنس قطعه‌کار و وزن ملحقات محورهای پیشروی بر انرژی مصرفی توسط سیستم پیشروی دستگاه فرز در نظر گرفته نشده است.

روش کار سیستم روانکاری کمینه به این صورت است که حجم بسیار کمی از روانکار با هوا مخلوط می‌شود و با فشار هوا و سرعت زیاد توسط نازل به محل ماشین‌کاری پاشیده می‌شود. در نتیجه در طول ماشین‌کاری، یک لایه نازک از روانکار روی محل تماس قطعه‌کار و ابزار وجود خواهد داشت که باعث کاهش دمای ابزار و قطعه‌کار و شکل‌گیری بهتر براده می‌شود. خان و همکاران<sup>[13]</sup>، دریافتند که ماشین‌کاری همراه با روش روانکاری کمینه می‌تواند نیروهای برش در تراشکاری فولاد AISI 9310 را بین ۵ تا ۱۵٪ کاهش دهد. حسن‌پور و همکاران<sup>[14]</sup>، تاثیر روش‌های روانکاری خشک، تر و کمینه را در فرزکاری فولاد آلیاژی ۴۳۴۰ مورد بررسی قرار دادند. 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

تخمین زد که  $P_{cool}$  توان موتور پمپ روانکار یا توان مصرفی پمپ هوای فشرده است و  $(t_{coe} - t_{cos})$  نشان‌دهنده زمان فعالیت موتور پمپ روانکار در حالت روانکاری تر یا مدت زمان فعالیت پمپ هوای فشرده در شرایط روانکاری کمینه است [12]:

$$E_{cool} = P_{cool} \times (t_{coe} - t_{cos}) \quad (10)$$

در مدل‌سازی صورت‌گرفته در پژوهش *آرمچارون* و *ماتیونگا* [12] تفاوت انرژی مصرفی در حالت روانکاری کمینه و تر در نظر گرفته نشده است و بنابراین باید اصلاحاتی در آن صورت گیرد. با توجه به اینکه سیستم روانکاری کمینه دارای پمپ هوای فشرده است باید توجه کرد که مقدار توان مصرفی فقط در بازه زمانی که پمپ هوای فشرده فعال است محاسبه می‌شود ولی در حالت روانکاری تر، زمان عملکرد پمپ سیال برابر با کل زمان ماشین‌کاری است.

#### انرژی مصرفی تعویض‌کننده ابزار

مصرف انرژی در سیستم تعویض‌کننده ابزار ناشی از مکانیزم چرخش تعویض‌کننده است. موتور با چرخش تعویض‌کننده، ابزار مورد نظر را به محل صحیح فراخوانی می‌کند. انرژی مصرفی تعویض‌کننده ابزار را می‌توان با رابطه ۱۱ تخمین زد [12]:

$$E_{tool} = n \times P_{tool} \times t_{tool} \quad (11)$$

که  $P_{tool}$  توان مصرفی موتور تعویض‌کننده ابزار،  $t_{tool}$  مدت زمان فعالیت تعویض‌کننده ابزار و  $n$  تعداد تعویض ابزار است.

#### انرژی مصرفی توسط اجزای ثابت

مصرف انرژی فن‌ها، سیستم کنترل و سایر اجزایی که انرژی ثابتی مصرف می‌کنند تا ماشین در حالت عملیاتی باقی بماند، در این دسته قرار می‌گیرد. مصرف انرژی سیستم فن و کنترل را می‌توان طبق رابطه ۱۲ تخمین زد [12]:

$$E_{fix} = (P_{control} + P_{fan}) \times (t_e - t_s) \quad (12)$$

که  $P_{fan}$  و  $P_{control}$  به ترتیب توان مصرفی سیستم کنترل و فن و  $(t_e - t_s)$  نشان‌دهنده مدت زمان فعالیت آنها است. با توجه به اینکه هر ماشین کنترل عددی دارای اجزای ثابت مصرف‌کننده انرژی است، متفاوت با مدل‌سازی قبلی صورت گرفته در تحقیق *آرمچارون* و *ماتیونگا* [12]، بخش انرژی مصرفی ثابت به صورت جزئی‌تر در نظر گرفته شد و رابطه مربوطه اصلاح شد.

#### مواد و روش‌ها

به منظور تایید مدل‌سازی انجام‌شده برای پیش‌بینی انرژی مصرفی در فرآیند فرزکاری، از آزمایش تجربی استفاده شد. جهت انجام آزمایش‌ها، قطعه‌کار از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 316 با ابعاد طول و عرض ۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر انتخاب و مسیرهای ماشین‌کاری طراحی شدند که در شکل ۱ نشان داده شده است. فولادهای سری ۳۰۰ رایج‌ترین نوع فولادهای زنگ‌نزن هستند که در بین آنها فولاد ۳۱۶ کاربرد وسیعی دارد. فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ که شامل ۱۸٪ کروم و ۸٪ نیکل است، به نام فولاد ۸-۱۸ نیز شناخته می‌شود. در تمامی آزمون‌ها از ابزار فرزکاری انگشتی از جنس HSS با قطر ۹ میلی‌متر استفاده شد. برای انجام آزمون‌ها و مقایسه مقدار انرژی

$$t_{spindle} = t_{spindle \text{ end}} - t_{spindle \text{ start}} \quad (3)$$

#### انرژی مصرفی محورهای پیشروی

انرژی پیشروی  $E_{feed}$ ، انرژی مورد نیاز برای حرکت میز یا ابزار برش در مسیر خطی مشخص و شامل موتورهای پیشروی محورهای X، Y و Z است. این حرکت‌ها توسط کدهای G01، G02، G03 برای پیشروی معین و G00 برای پیشروی سریع کنترل می‌شوند. انرژی پیشروی را می‌توان با استفاده از معادله ۴ با جمع‌کردن انرژی پیشروی محورهای مختلف محاسبه کرد:

$$E_{feed} = \sum_{i=1}^m \int_{t_{i \text{ start}}}^{t_{i \text{ end}}} P_{feedi} \cdot dt \quad (4)$$

که  $P_{feedi}$  توان مورد نیاز برای جابجایی محور  $i$ ام و  $m$  تعداد محور ماشین ابزار است. انرژی مورد نیاز پیشروی را می‌توان برای پیشروی سریع  $(E_{feed}^r)$  از رابطه ۵ و برای پیشروی معین  $(E_{feed}^f)$  از رابطه ۶ محاسبه کرد [12]:

$$E_{feed}^r(\text{start} \rightarrow \text{end}) = \int_{t_{x \text{ start}}}^{t_{x \text{ end}}} P_{feedx}^r \cdot dt + \int_{t_{y \text{ start}}}^{t_{y \text{ end}}} P_{feedy}^r \cdot dt + \int_{t_{z \text{ start}}}^{t_{z \text{ end}}} P_{feedz}^r \cdot dt \quad (5)$$

که  $P_{feedx}^r$ ،  $P_{feedy}^r$  و  $P_{feedz}^r$  به ترتیب توان مورد نیاز برای حرکت سریع محورهای X، Y و Z است.

$$E_{feed}^f(\text{start} \rightarrow \text{end}) = \int_{t_{x \text{ start}}}^{t_{x \text{ end}}} P_{feedx}^f \cdot dt + \int_{t_{y \text{ start}}}^{t_{y \text{ end}}} P_{feedy}^f \cdot dt + \int_{t_{z \text{ start}}}^{t_{z \text{ end}}} P_{feedz}^f \cdot dt \quad (6)$$

که  $P_{feedx}^f$ ،  $P_{feedy}^f$  و  $P_{feedz}^f$  به ترتیب توان مورد نیاز برای حرکت تغذیه محورهای X، Y و Z است.

#### انرژی مصرفی در حین برش

انرژی برشی  $E_{cutting}$ ، انرژی مصرفی برای برش قطعه‌کار در حین ماشین‌کاری است که با ضرب توان برشی  $P_{cutting}$  در مدت زمان برش توسط معادله ۷ تخمین زده می‌شود [12]:

$$E_{cutting} = P_{cutting} \times t_{cutting} \quad (7)$$

که  $t_{cutting}$  زمان برش است و براساس مسیر حرکت ابزار و مقدار پیشروی تخمین زده می‌شود. توان مصرفی برای برش را با استفاده از انرژی مخصوص برش  $(k)$  و با توجه به معادله ۸ می‌توان به دست آورد [12]:

$$P_{cutting} = k \times Q \quad (8)$$

که  $Q$  نرخ براده‌برداری برحسب میلی‌متر مکعب بر ثانیه و  $k$  انرژی مخصوص برش برحسب وات ثانیه بر میلی‌متر مکعب است که به شرایط برش و جنس قطعه‌کار بستگی دارد. هنگام برش ماده با ابزار ساییده‌شده، انرژی مخصوص برش افزایش می‌یابد. انرژی مصرفی در حین برش، با جایگذاری رابطه ۸ در رابطه ۹ به صورت زیر به دست می‌آید [12]:

$$E_{cutting} = k \times Q \times t_{cutting} \quad (9)$$

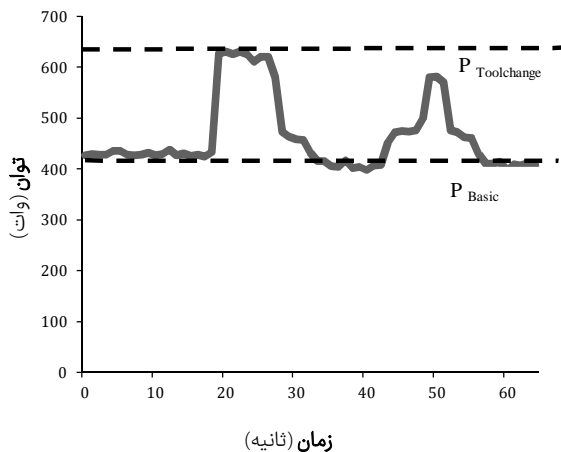
مقدار  $k$  در این مطالعه با توجه به جنس قطعه‌کار یعنی فولاد AISI 316، برابر ۴/۳۵ وات ثانیه بر میلی‌متر مکعب در نظر گرفته شد [16].

#### انرژی مصرفی سیستم روانکاری

انرژی مصرفی در پمپ روانکاری را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۰

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

دستگاه فرز مورد استفاده دارای سیستم روانکاری کمینه نبود و بنابراین سیستم روانکاری کمینه به صورت جداگانه بر روی دستگاه فرز نصب شد. در سیستم روانکاری کمینه، فقط کمپرسور هوای فشرده مصرف کننده توان است. با استفاده از کاتالوگ ماشین ابزار و پلاک‌های مشخصات نصب شده بر روی اجزای دستگاه فرز مورد نظر و روابط ذکر شده، مقادیر توان‌های تئوری محاسبه شد. توان‌های مصرفی واقعی نیز از دستگاه توان سنج استخراج شد. با ضرب توان در مدت فعالیت بخش مورد نظر، انرژی مصرفی توسط هر جزء به دست آمده است. با توجه به مشخصات دستگاه، در دور ۱۲۰۰ دور در دقیقه، توان مصرفی اسپیندل برابر ۱۳۵۰ وات و با توجه به مشخصات پمپ سیال برشی، این پمپ دارای توان مصرفی ثابت ۳۰۰ وات است. به عنوان نمونه‌ای از اندازه‌گیری‌های انجام شده، نمودار ۱ توان مصرفی توسط تعویض کننده ابزار که از دستگاه توان سنج به دست می‌آید را نشان می‌دهد. به دلیل استفاد از اجزای پنوماتیک و موتور الکتریکی در سیستم تعویض ابزار، نمودار ۱ دارای پله است. موتور تعویض کننده ابزار طبق اسناد دستگاه دارای توان مصرفی تئوری ۲۰۰ وات بود و مقدار عملی آن از نمودار ۱ برابر ۲۲۰ وات اندازه‌گیری شد.

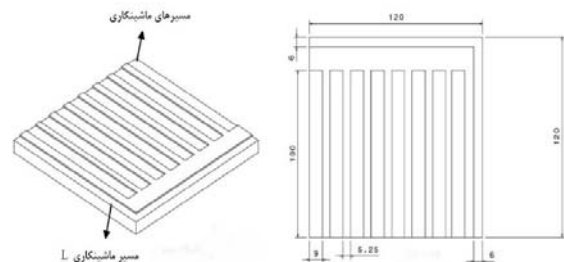


نمودار ۱) مصرف توان واقعی توسط تعویض کننده ابزار

### نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها و استخراج داده‌های به دست آمده از دستگاه توان سنج، نتایج مورد تحلیل قرار گرفت. برای ارزیابی مدل‌سازی انجام شده برای محاسبه توان مصرفی فرآیند فرزکاری، در نمودار ۲ توان مصرفی تخمین زده شده به کمک روابط تئوری و توان واقعی

مصرفی در شرایط روانکاری کمینه و تر، ۸ مسیر به طول ۱۰۰ میلی‌متر و برای انجام آزمون تایید کننده مدل‌سازی، با توجه به شکل ۱ مسیر با شکل به طول و عرض ۱۲۰ میلی‌متر انتخاب شد. پارامترهای برشی متغیر در آزمایش‌های تجربی برای مقایسه میزان مصرف انرژی در شرایط روانکاری کمینه و تر در جدول ۱ ذکر شده است. انتخاب مقادیر پارامترهای برشی بر اساس پیشنهاد کارخانه سازنده ابزار انجام شده است. از روش فاکتوریل کامل برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شد. آزمایش‌های ۸ گانه برای دقت بیشتر و بررسی قابلیت تکرارپذیری دو بار تکرار شدند که نتایج به یکدیگر نزدیک بود و میانگین آنها ثبت شد.



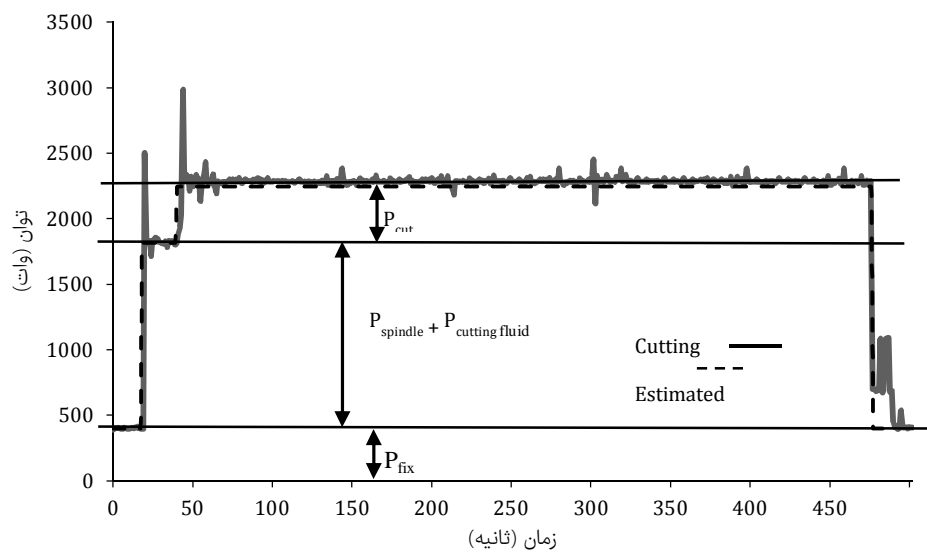
شکل ۱) قطعه کار مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

جدول ۱) پارامترهای برشی ورودی آزمایش‌های تجربی

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

برای آزمون تایید مدل‌سازی، پارامترهای سرعت پیشروی ۳۵ میلی‌متر بر دقیقه، سرعت برشی ۱۲۰۰ دور در دقیقه و شرایط روانکاری تر انتخاب شد. پس از انجام آزمون تایید مدل‌سازی، انرژی مصرفی واقعی با حالت تئوری مقایسه و با اطمینان از میزان خطای کم روابط تئوری و تایید دقت مدل‌سازی، آزمایش‌های دیگر انجام شد. برای عملیات فرزکاری از دستگاه فرز مدل VMC-850 (مونتاژ شرکت ماشین‌سازی تبریز؛ ایران) و برای اندازه‌گیری توان مصرفی ماشین ابزار از دستگاه توان سنج مدل KEW-6315 (شرکت KYORITSO؛ ژاپن) استفاده شد. برای اندازه‌گیری جریان، ولتاژ مصرفی و دیگر پارامترهای ماشین باید اتصالات دستگاه توان سنج را به ورودی سه فاز دستگاه فرز متصل کرد تا جریان و ولتاژ مصرفی به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شود. این دستگاه توان مصرفی ماشین ابزار را هر ۱ ثانیه یک بار داده برداری می‌کند. برای اتصال دستگاه توان سنج به ماشین فرز از کلمپ مخصوص جریان و ولتاژ استفاده شد. داده‌ها توسط نرم‌افزار مخصوص دستگاه توان سنج که توسط سازنده دستگاه ارائه شده است، ذخیره و سپس به خروجی نرم‌افزار اکسل تبدیل می‌شود. ابتدا آزمایش‌ها در شرایط تر و سپس در حالت روانکاری کمینه انجام گرفت. پارامترهای سیستم روانکاری کمینه مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد. در همه آزمایش‌های شیار تراشی، عمق برش محوری ثابت و برابر ۰/۵ میلی‌متر بود.

حاصل از دستگاه توان سنج نشان داده شده است. مدل تئوری به دلیل در نظر گرفتن تغییر دینامیکی توان ناشی از نوسان جریان برق و همچنین تقاضای بیشتر برق به علت روشن و خاموش شدن اجزای دستگاه مانند اسپیندل، سیستم خنک کار و غیره دارای محدودیت‌هایی است و به همین دلیل روی نمودار مربوط به آن پیک‌هایی مشاهده می‌شود. به دلیل استفاده از یک ابزار در آزمایش‌های تجربی، ضریب  $n$  در رابطه ۱۱ برابر یک در نظر گرفته شده است. نزدیکی دو نمودار و مقدار اندک خطا در نمودار ۲ نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق است. میزان انرژی مصرفی واقعی و تخمین زده شده برای قسمت‌های مختلف ماشین ابزار و برش در جدول ۳ ارایه شده است. مصرف انرژی کل ۲۴۶/۸ وات ساعت تخمین زده شده ولی مقدار واقعی آن ارزیابی کند.



نمودار ۲) مقایسه توان مصرفی تخمین زده شده و واقعی با پارامترهای سرعت پیشروی ۳۵ متر بر دقیقه، سرعت برشی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و شرایط روانکاری تر

کمینه نسبت به آزمایش‌های دارای سیستم روانکاری تر کمتر است. کمپرسور هوای فشرده مورد استفاده در روانکاری کمینه دایم در حال کار نیست و توان مصرفی آن تابعی از مدت زمان عملکردش است. چون در ماشین‌کاری با روانکاری کمینه، نفوذ سیال به سطح مشترک ابزار و قطعه کار بهتر صورت می‌گیرد [17]، اثرات روانکاری بهبود و اصطکاک بین ابزار و قطعه کار کاهش یافته و در نتیجه نیروی ماشین‌کاری و توان مصرفی ماشین ابزار نیز کمتر می‌شود. از نمودار ۳ می‌توان نتیجه گرفت که متوسط توان مصرفی در شرایط روانکاری کمینه نسبت به روانکاری تر ۳۳٪ کمتر است. تفاوت توان مصرفی در دو حالت روانکاری به این دلیل است که پمپ سیال برشی موجود در دستگاه فرز در حالت روانکاری کمینه استفاده نمی‌شود و مقدار توان مصرفی کمپرسور از مقدار توان مصرفی پمپ سیال برشی کمتر و مدت زمان کمتری نیز فعال است. با توجه به طول مسیر برش ۱۰۰ میلی‌متر در هر آزمایش و میزان پیشروی هر مسیر که در جدول ۴ ذکر شده است، برای ماشین‌کاری هر ۴ مسیر برش در روانکاری تر یا کمینه، زمان تقریبی ۱۵ دقیقه است. مجموع

جدول ۳) مقایسه انرژی مصرفی واقعی و تخمین زده شده برای قسمت‌های مختلف ماشین ابزار و برش

بخش	انرژی واقعی (Wh)	انرژی تخمین زده شده (Wh)
$E_{fix}$	۱/۷	۱/۵
$E_{spindle}$	۱۵۰	۱۵۷/۵
$E_{cutting-fluid}$	۳۵	۳۵
$E_{feed (-y)}$ $E_{feed (+x)}$	۳	۲/۵
$E_{cutting}$	۴۴/۵	۵۰/۳
مجموع مقادیر	۲۳۴/۲	۲۴۶/۸

مدل‌سازی میزان مصرف انرژی می‌تواند برای ارزیابی مسیرهای مختلف ابزار یا همان استراتژی‌های ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه در مورد اثر روانکاری کمینه بر توان مصرفی ماشین ابزار و مقایسه آن با حالت تر تحقیقات کمی صورت گرفته است، این موضوع در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. شرایط آزمایش‌های تجربی انجام شده در جدول ۴ و میزان توان مصرفی در هر آزمایش در نمودار ۳ نشان داده شده است. نمودار ۳ نشان می‌دهد که میزان توان مصرفی در آزمایش‌های با سیستم روانکاری

### نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر روش‌های روانکاری تر و کمینه بر انرژی مصرفی در فرآیند فرزکاری فولاد زنگ‌نزن AISI 316 مورد بررسی قرار گرفت. یک روش پیش‌بینی میزان مصرف انرژی در فرآیند ماشین‌کاری سنتی ارائه شد و سپس مدل‌سازی با استفاده از یک مثال واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به خطای ۵ درصدی نسبت به مقدار واقعی، می‌توان برای مطالعات دیگر نیز از این مدل‌سازی انرژی مصرفی برای فرآیند فرزکاری استفاده کرد. پس از تایید مدل‌سازی انجام‌شده، با تغییر پارامترهای ورودی نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل و به‌کارگیری روش طراحی آزمایش کامل، انرژی و توان مصرفی در حالت‌های برش کمینه و تر به‌صورت تجربی با استفاده از توان‌سنج متصل‌شده به کابل برق ورودی ۳ فاز دستگاه ماشین‌فرز اندازه‌گیری شد. در مجموع، ۸ آزمایش برش مختلف که هر یک ۲ بار تکرار شدند انجام گرفت و میانگین توان مصرفی در هر آزمایش ثبت شد. با استفاده از مدل‌سازی صورت‌گرفته، انرژی مصرفی در یک مسیر ماشین‌کاری یکسان با پارامترهای برشی مختلف در حالت‌های روانکاری تر و کمینه محاسبه و با نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شد. مجموع انرژی مصرفی ماشین ابزار در حالت روانکاری کمینه نسبت به روش روانکاری تر ۱۶/۳٪ کمتر است. متوسط توان مصرفی در فرزکاری کمینه ۳۳٪ کمتر از فرزکاری در حالت روانکاری تر (معمولی) است. روش روانکاری کمینه با توجه به پژوهش‌های پیشین باعث کاهش نیروهای ماشین‌کاری و افزایش عمر ابزار و کیفیت سطح می‌شود. با توجه به نتایج این تحقیق، روش روانکاری کمینه از نظر توان مصرفی نیز بهینه است و نسبت به روش روانکاری تر، انرژی کمتری مصرف می‌کند و باعث کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. بررسی اثر نرخ جریان سیال و فشار هوا بر انرژی مصرفی در برش با روانکاری کمینه، بررسی توان مصرفی ماشین ابزار با در نظر گرفتن سایش ابزار، بررسی انواع مسیرهای حرکتی ابزار یا استراتژی‌های ماشین‌کاری در شرایط روانکاری کمینه به‌منظور کاهش توان مصرفی، ایجاد یک پایگاه داده برای تخمین انرژی مصرفی ماشین‌کاری در شرایط برشی مختلف و مدل‌سازی انرژی مصرفی در دیگر ماشین‌آلات صنعتی مانند پرینترهای سه‌بعدی، دستگاه تزریق و غیره می‌تواند موضوعاتی برای ادامه این تحقیق در آینده باشد.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

**تاییدیه اخلاقی:** نویسندگان رعایت کامل اصول اخلاقی را مد نظر گرفته و هنگام استفاده از منابع علمی به آن به‌عنوان مرجع اشاره کرده‌اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان آن انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

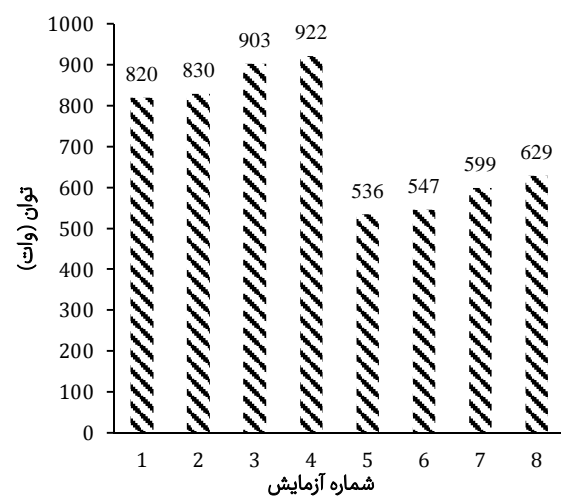
**سهم نویسندگان:** مسعود بیات (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدمهدی ابوترابی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰٪).

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

انرژی مصرفی ماشین ابزار در حالت استفاده از روانکاری کمینه برای ۴ آزمایش صورت گرفته برابر ۵۷۷/۷۵ وات ساعت است. کمپرسور هوای فشرده مورد استفاده دارای توان مصرفی ۴۵۰۰ وات و مدت زمان عملکرد آن ۱۲۰ ثانیه برای ۴ برش است، بنابراین انرژی مصرفی کمپرسور حدوداً ۱۵۰ وات ساعت است که با اضافه‌کردن آن به انرژی مصرفی برای برش‌ها در شرایط کمینه، عدد ۷۲۷/۷۵ وات ساعت به‌عنوان مجموع انرژی مصرفی در حالت روانکاری کمینه به‌دست می‌آید. در شرایط برش تر، مجموع کل انرژی مصرفی به‌دست‌آمده از توان‌سنج برای ۴ آزمایش ۸۶۸/۷۵ وات ساعت است. یعنی انرژی مصرفی در شرایط روانکاری کمینه ۱۶/۳٪ کمتر از حالت روانکاری تر است. این نتیجه به‌دست‌آمده نوآوری اصلی این پژوهش است و نشان می‌دهد که روانکاری کمینه علاوه‌بر داشتن اثر مثبت روی عمر ابزار، کیفیت سطح و نیروهای برشی [18]، از نظر میزان مصرف انرژی نیز نسبت به روانکاری تر مناسب‌تر است و می‌تواند به کاهش هزینه تولید قطعات کمک کند. در این تحقیق، اندازه‌گیری و کنترل پارامترهای فشار هوا و دبی سیال مورد استفاده در روانکاری کمینه انجام نشده است. بررسی اثر نرخ جریان سیال و فشار هوا بر انرژی مصرفی در شرایط روانکاری کمینه می‌تواند موضوع مناسبی برای تحقیقات آینده باشد.

جدول ۴) شرایط آزمایش‌های ۸ گانه تجربی

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



نمودار ۳) توان مصرفی در آزمایش‌های تجربی

- minimizing power consumption in the milling of carbon steel. *Journal of Cleaner Production*. 2014;66:309-316.
- 9- Mori M, Fujishima M, Inamasu Y, Oda Y. A study on energy efficiency improvement for machine tools. *CIRP Annals*. 2011;60(1):145-148.
- 10- He Y, Liu F, Wu T, Zhong FP, Peng B. Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012;226(2):255-266.
- 11- Diaz N, Helu M, Jarvis A, Tonissen S, Dornfeld D, Schlosser R. Strategies for minimum energy operation for precision machining [Internet]. California: Green manufacturing and sustainable manufacturing partnership; 2009 [Cited 2009 July 8]. Available from: <https://escholarship.org/uc/item/794866g5#main>
- 12- Aramcharoen A, Mativenga PT. Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy. *Journal of Cleaner Production*. 2014;78:63-74.
- 13- Khan MMA, Mithu MAH, Dhar NR. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(15-16):5573-5583.
- 14- Hassanpour H, Rasti R, Sadeghi MH, Saadatbakhsh MH, Omiddodman AR. Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(14):50-60. [Persian]
- 15- Nayeri MR, Abootorabi Zarchi MM, Haddad Zade M. The effect of minimum quantity lubrication on surface roughness in hard turning of 100Cr6 bearing steel with Nano-CBN tool. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(3):263-269, 2017 [Persian]
- 16- Kalpakjain S, Schmid SR. *Manufacturing processes for engineering materials*. 6<sup>th</sup> Edition. London: Pearson; 2016.
- 17- Walker T. *MQL Handbook*. Michigan: Unist Inc; 2013. pp. 1-40.
- 18- Sarikaya M, Güllü A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*. 2014;65:604-616.
- 1- [iea.org](http://iea.org) [Internet]. US: World electricity consumption in 2011; 2013 [Cited 2013 August 31]. Available from: [www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/country/Worldproduct/electricityandheat](http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/country/Worldproduct/electricityandheat).
- 2- Damink H [Internet]. Netherlands: SME energy checkup; making the most out of energy (SME ENERGYCHECKUP); 2017 [Cited 2016 February 12]. Available from: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/sme-energycheckup>
- 3 CECIMO, 2009. Concept Description for CECIMO's Self-Regulatory Initiative (SRI) for the Sector Specific Implementation of the Directive 2005/32/EC [Cited Unknown November 11] Available from: [https://www.eupnetwork.de/fileadmin/user\\_upload/Produktgruppen/Lots/Working\\_Documents/Lot\\_ENTR\\_05\\_machine\\_tools/draft\\_self\\_regulation\\_machine\\_tools\\_2009-10.pdf](https://www.eupnetwork.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Working_Documents/Lot_ENTR_05_machine_tools/draft_self_regulation_machine_tools_2009-10.pdf)
- 4- Kordonowy DN. A power assessment of machining tools [Dissertation]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology; 2002.
- 5- Dahmus JB, Gutowski TG. An environmental analysis of machining. In: ASME 2004 international mechanical engineering congress and exposition. ASME 2004 International mechanical engineering congress and exposition; 2004 Jan 1; American Society of Mechanical Engineers; 2004. pp. 643-652.
- 6- Gutowski T, Dahmus J, Thiriez A, editors. Electrical energy requirements for manufacturing processes. 13<sup>th</sup> CIRP international conference on life cycle engineering; 2006 May 31-2 Jun; Lueven, Belgium. Lueven: CIRP International Leuven; 2006. pp. 623-628.
- 7- Li W, Zein A, Kara S, Herrmann C. An investigation into fixed energy consumption of machine tools. In: Hesselbach J, Herrmann Ch, editors. *Glocalized solutions for sustainability in manufacturing*. Braunschweig 2011: Proceedings of the 18<sup>th</sup> CIRP international conference on life cycle engineering, Technical University of Braunschweig; 2011 May 2-4; Braunschweig, Germany. Berlin: Springer; 2011. pp. 268-273.
- 8- Campatelli G, Lorenzini L, Scippa A. Optimization of process parameters using a response surface method for