مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۳۱۸-۳۲۲

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای سنگ‌زنی خزشی پره توربین گازی

حامد اسماعیلی[۱]، حامد ادیبی[۲*]، سیدمهدی رضاعی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، hadibi@aut.ac.ir

چکیده

پره‌های توربین‌های گازی معمولا پس از ریخته‌گری یا فورج نیاز است که در مناطقی از ریشه و شرود به مقدار حدود ۳ میلی‌متر ماشین‌کاری شود. سنگ‌زنی خزشی بهترین روش برای ماشین‌کاری این نواحی معرفی گردیده است. بهینه‌سازی پارامترهای سنگ‌زنی از مهمترین چالش‌های صنعتی می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا مدل ریاضی برای ارتباط دادن پارامترهای ورودی و خروجی فرآیند توسط روش پاسخ سطح استخراج شده است و سپس بهینه‌سازی این مدل انجام گرفته است. هدف از بهینه‌سازی، انتخاب پارامترهای سنگ‌زنی خزشی شامل سرعت پیشروی چرخ سنگ، عمق بار و سرعت شعاعی درسر برای دست‌یابی به حداقل مقدار انرژی مخصوص و بهترین صافی سطح است. این کار، صنایع سازنده پره‌های توربین گازی را قادر می‌سازد تا بهترین پارامترهای سنگ‌زنی خزشی را انتخاب کرده و اتوماسیون فرآیند تولید توسط این مقادیر بهینه می تواند برنامه‌ریزی گردد.

کلید واژگان: پره توربین گازی، مدل سازی و بهینه‌سازی، روش پاسخ سطح، انرژی مخصوص، زبری سطح

Modelling and optimization of creep feed grinding parameters for gas turbine blades

Hamed Esmaeili , Hamed Adibi* , Seyed Mehdi Rezaei

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technonlogy, Tehran, Iran
* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, hadibi@aut.ac.ir

ABSTRACT

Gas turbine blades needs machining of root profile after forging or casting. Creep feed grinding is the best way for machining of these areas. Optimization of grinding parameters is one the industrial challenges. In the first part of the present work, a mathematical relationship between input and output parameters of the process have been developed by Response Surface Methodology. Then, optimization of this model was conducted. The goal of optimization is selecting the grinding parameters including work speed, depth of cut and radial dressing speed to achieve minimum amount of specific grinding energy and surface roughness. The present work enables the industries to have the optimum values of creep feed grinding variables for turbine blades and conducting the process can be automated based on optimal values.

Keywords: Gas Turbine Blade, Optimization, Response Surface Methodology, Specific Energy, Surface Roughness.

۱- مقدمه

توربین‌های گازی نقش مهمی در سیستم‌های انتقال هوایی و تولید انرژی الکتریکی ایفا می‌نمایند. به‌منظور محدودیت‌هایی نظیر راندمان، قیمت و اثرات محیطی، درجه حرارت کاری توربین باید افزایش یابد. در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی در خنک‌کاری و متالوژی مواد پره‌های توربین صورت گرفته است. پره‌های توربین‌های گازی با عملکرد بالا نوعا به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که از خزش مواد در حین کارکرد طولانی در دمای بالا جلوگیری شود. معمولا از آلیاژهای پایه نیکل برای ساخت قطعات پرتنش مانند پره‌های متحرک و صفحات توربین استفاده می‌شود [۷].

ماشین‌کاری سوپرآلیاژهای پایه نیکل به روش‌های سنتی مانند فرزکاری و خان‌کشی بسیار مشکل است. معمولا پس از ریخته‌گری یا فورج پره‌های توربین نیاز می‌باشد که در مناطقی از ریشه و شرود تا عمقی حدود ۳ میلی-متر ماشین‌کاری گردد. سنگ‌زنی خزشی بهترین روش برای ماشین‌کاری این نواحی معرفی گردیده است.

سنگ‌زنی یکی از تکنیک‌های پرداخت‌کاری می‌باشد. در طی تولید پره‌های توربین از سوپر آلیاژهای پایه نیکل، تولید یک سطح بدون عیب و یک پروفیل با دقت ۰/۰۲۰ میلی‌متر در ریشه پره، اهمیت زیادی دارد. در تولیدات صنعتی با تنظیم دقیق پارامترهای فرآیند سنگ‌زنی خزشی می‌توان به این هدف دست یافت [۴].

چند مورد از مزایای سنگ‌زنی خزشی نسبت به سنگ‌زنی پاندولی به شرح زیر است [۱-۴]:

- ✓ حجم براده بیشتری بین هر بار درس کردن چرخ، ماشین‌کاری می‌گردد.
- ✓ پروفیل چرخ به‌طور یکنواخت ساییده می‌شود که باعث حفظ شکل پروفیل می‌گردد.
- ✓ ظرفیت تولید بیشتری در این روش قابل دست‌یابی است.
- ✓ ماشین‌کاری پره‌های توربین توسط این فرایند نه تنها بیانگر توانایی این روش به‌عنوان یک فرایند براده‌برداری با حجم زیاد است بلکه قابلیت آن را برای رسیدن به دقت ابعادی و تلرانس‌های بسته نیز نشان می‌دهد. زیرا تلرانس‌های ریشه پره توربین معمولا تا $\pm 5\mu m$ تعریف شده است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

H. Esmaeili , H. Adibi , S. M. Rezaei, Modelling and optimization of creep feed grinding parameters for gas turbine blades, *Modares Mechanical Engineering*, *Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 318-322, 2015 (in Persian فارسی)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.79.9]

✓ یکی دیگر از مزایای استفاده از سنگ‌زنی خزشی به جای فرزکاری این است که پروفیل مورد نظر به‌راحتی روی چرخ سنگ قرار داده می‌شود. در صورت استفاده از درسری که به‌صورت پیوسته با چرخ سنگ در تماس است همواره سنگ تیز مانده و در عین‌حال پروفیل روی پیشانی سنگ دائما حفظ می گردد.

تفاوت‌های فرآیند سنگ‌زنی خزشی نسبت به سنگ‌زنی پاندولی به شرح زیر است [۸،۱]:

a) سرعت پیشروی: سرعت پیشروی در سنگ‌زنی پاندولی معمولا ۵-۲۵m/min ولی در سنگ‌زنی خزشی ۱۰-۱۰۰ mm/min می‌باشد.

b) عمق برش: در سنگ‌زنی پاندولی عمق برش بسیار کم معمولا ۲-۲۵μm ولی در سنگ‌زنی خزشی این عمق ۱-۱۰mm می‌باشد.

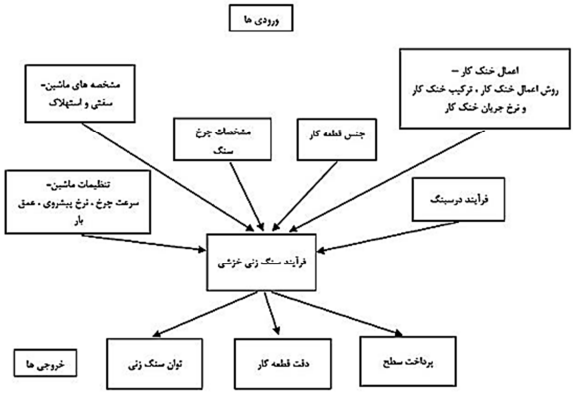
c) قوس درگیری چرخ با قطعه‌کار: قوس درگیری در سنگ‌زنی پاندولی معمولا در بازه ۱-۳mm می‌باشد، درحالی‌که در سنگ‌زنی خزشی حداقل قوس درگیری ۱۰ برابر این مقدار می‌باشد.

سنگ‌زنی خزشی را می‌توان فرایندی ذکر کرد که شامل یک‌سری ورودی و خروجی مشخص می‌باشد (شکل ۱). پیش‌بینی تاثیر دقیق ورودی‌ها بر خروجی‌ها و روابط بین آن‌ها کار مشکلی است.

۲- روش انجام آزمایش سنگ‌زنی خزشی

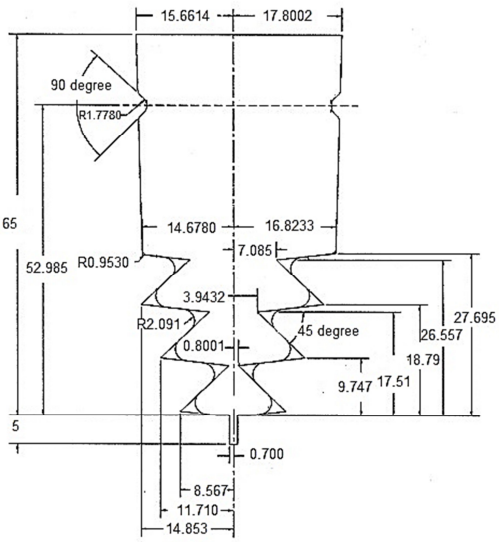
۲-۱- آماده‌سازی پره‌ها برای سنگ‌زنی

ابتدا تعداد ۲۰ عدد پره متحرک ردیف اول توربین گازی فریم ۵ ریخته‌گری شده، سپس پره‌ها برش خورده و از خوشه جدا شدند. برای این‌که هنگام سنگ‌زنی خزشی بتوان توان را به شکل صحیح اندازه‌گیری کرد و شکل خاص قسمت شنک[1] باعث تغییرات توان اندازه‌گیری شده نگردد قسمت شنک جداگانه با انجام سنگ‌زنی معمولی و دستگاه اسپارک[2] از مرحله ماشین‌کاری حذف گردید. سپس روی پره‌ها عملیات حرارتی حل سازی[3] انجام گرفت. عملیات به‌صورت نگه‌داشتن دردمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت و سپس سرد کردن در داخل کوره با نرخ خنک‌کاری ۳۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام گرفت. برای حذف کردن اکسیدهای به‌وجود آمده در سطح، عملیات سندبلاست[4] روی پره‌ها اعمال گردید.



شکل ۱ تحلیل سنگ زنی خزشی با پارامترهای ورودی و خروجی

1. shank
2. spark
3. solution
4.sandblast



شکل ۲ پروفیل ریشه پره توربین گازی [۱]

۲-۲- انجام عملیات سنگ زنی

شکل پروفیل ریشه (شکل ۲) ، مطابق با پارامترهای ورودی تعریف شده در جدول ۳ ماشین‌کاری گردید. این آزمایشات برای بررسی سه پارامتر ورودی از جمله سرعت پیشروی میز، سرعت پیشروی درسر و عمق براده برداری دستگاه سنگ خزشی طراحی شده است.

۳- طراحی آزمایش

۳-۱- روش پاسخ سطح (RSM) [5]

روش پاسخ سطح برای طراحی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش ترکیبی از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که در آن‌ها پاسخ تحت تاثیر چندین متغیر بوده و هدف بهینه سازی پاسخ می باشد مورد استفاده قرار می گیرد [۶].

۳-۲- پارامترهای طراحی

پارامترهای طراحی در این آزمایش شامل سرعت پیشروی میز، عمق بار و سرعت پیشروی شعاعی درسر است که بیشترین تاثیر را بر متغیرهای پاسخ می‌گذارند.

۳-۳- متغیرهای پاسخ

انرژی مخصوص سنگ‌زنی و صافی سطح متغیرهای پاسخ می‌باشند. صافی سطح و انرژی مخصوص سنگ‌زنی تحت تاثیر پارامترهای طراحی هستند. انرژی مخصوص سنگ‌زنی از تقسیم توان سنگ‌زنی بر نرخ براده‌برداری به دست می‌آید.

مقادیر فاکتورها و متغیرهای پاسخ مربوطه در جدول ۲ آورده شده است.

۴- مدل‌سازی

۴-۱- ارائه مدل ریاضی

5. Response Surface Methodology

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.79.9]

برای مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت[1]، با توجه به این‌که آزمایش قبلا انجام گرفته است و هدف این پژوهش صرفا مدل‌سازی و بهینه‌سازی نتایج آزمایش است از طراحی آزمایش داده‌های تاریخی[2] استفاده گردید [۶]. رابطه (۱) برای انرژی مخصوص و رابطه (۲) برای زبری سطح به‌دست آمده است:

$$\text{Especial Energy} = 425.18384 - (0.60507\times \text{feed rate}) - (93.15244 \times \text{depth of cut}) - (909.12896 \times \text{dresser feed rate}) + (1.94076 \times \text{feed rate} \times \text{dresser feed rate}) + (40.53275 \times \text{depth of cut} \times \text{dresser feed rate}) \quad (۱)$$

$$\text{Roughness} = 3.46997 - (3.66716\text{E-}003 \times \text{feed rate}) + (0.74859 \times \text{dresser feed rate}) + (3.14781\text{E-}003 \times \text{feed rate} \times \text{dresser feed rate}) + (3.69272\text{E-}006 \times \text{feed rate}^2) \quad (۲)$$

جدول ۲ طراحی آزمایش و نتایج حاصله [۱]

ترتیب آزمایش	سرعت پیشروی (mm/min)	عمق بار (mm)	سرعت پیشروی درسر (μm/rev)	انرژی مخصوص (j/mm 3)	زبری سطح R_a (μm)
۱	۱۰۰	۰/۵	۰/۱	۲۸۰	۳/۲۹۴۶
۲	۱۵۰	۰/۵	۰/۱	۲۴۷	۳/۱۲۰۲
۳	۲۰۰	۰/۵	۰/۱	۲۰۵	۳/۰۲۴۲
۴	۲۵۰	۰/۵	۰/۱	۱۷۰	۲/۸۶۴۶
۵	۳۰۰	۰/۵	۰/۱	۱۴۰	۲/۸۶۴۸
۶	۴۰۰	۰/۵	۰/۱	۱۲۰	۲/۹
۷	۵۰۰	۰/۵	۰/۱	۹۵	۲/۷۸۱۷
۸	۶۰۰	۰/۵	۰/۱	۸۰	۲/۸۷۸
۹	۱۰۰	۰/۵	۰/۲	۱۸۵	۳/۳۴۳۹
۱۰	۱۵۰	۰/۵	۰/۲	۱۷۰	۳/۲
۱۱	۲۰۰	۰/۵	۰/۲	۱۵۰	۳/۱۵
۱۲	۲۵۰	۰/۵	۰/۲	۱۴۰	۳/۰۸۶۵
۱۳	۳۰۰	۰/۵	۰/۲	۱۲۰	۳/۱۷
۱۴	۴۰۰	۰/۵	۰/۲	۱۰۳	۳/۰۶۱
۱۵	۵۰۰	۰/۵	۰/۲	۷۵	۲/۹۳۵
۱۶	۶۰۰	۰/۵	۰/۲	۷۰	۳/۱۵
۱۷	۴۰۰	۰/۲	۰/۱	۱۵/۵	۲/۷۴
۱۸	۴۰۰	۰/۸	۰/۱	۹۳/۵	۲/۷۶
۱۹	۴۰۰	۱	۰/۱	۴۸/۷	۲/۷
۲۰	۴۰۰	۰/۸	۰/۲	۸۳/۹	۳/۱۱
۲۱	۴۰۰	۱	۰/۲	۷۴/۳۴	۳/۰۱
۲۲	۴۰۰	۰/۵	۰/۳	۹۵	۳/۲
۲۳	۴۰۰	۰/۵	۰/۴	۹۰	۳/۳۶
۲۴	۴۰۰	۰/۵	۰/۵	۸۵	۳/۴۵
۲۵	۴۰۰	۰/۵	۰/۶	۸۰	۳/۹

جدول ۳ پارامترهای سنگ زنی و سطوح آن ها [۱]

ترتیب آزمایش	سرعت پیشروی (mm/min)	عمق بار (mm)	سرعت پیشروی درسر (μm/rev)	انرژی مخصوص (j/mm 3)	زبری سطح R_a (μm)
۱	۴۰۰	۲/۰	۲/۰	۵/۱۳۵	۹۸/۲
۲	۳۵۰	۵/۰	۱/۰	۲۱/۱۴۴	۸۱/۲

1. Design Expert
2. Historical Data

۴-۲- بررسی دقت و اعتبار مدل

برای اثبات درستی مدل، آزمایشاتی طبق جدول ۱ طراحی، و انرژی مخصوص و زبری سطح آن به‌صورت تجربی اندازه گیری گردید:

با توجه به این‌که، این آزمایش‌ها در جدول ۲ برای استخراج رابطه مدل استفاده نشده‌اند، پس می‌توان با قرار دادن مقادیر پارامترهای ورودی در روابط مدل، مقادیر پارامترهای خروجی و خطاهای آن را به دست آورد (روابط ۳ الی ۶) :

آزمایش ۱:

$$\text{Especial Energy} = 425.18384 - (0.60507 \times 400) - 93.15244 \times 0.2) - (909.12896 \times 0.2) + (1.94076 \times 400 \times 0.2) + (40.53275 \times 0.2 \times 0.2) = 139.5 \quad (۳)$$

$$\text{Roughness} = 3.46997 - (3.66716\text{E-}003 \times 400) + 0.74859 \times 0.2) + (3.14781\text{E-}003 \times 0.2 \times 0.2) + 3.69272\text{E-}006 \times 400^2) = 2.99 \quad (۴)$$

آزمایش ۲:

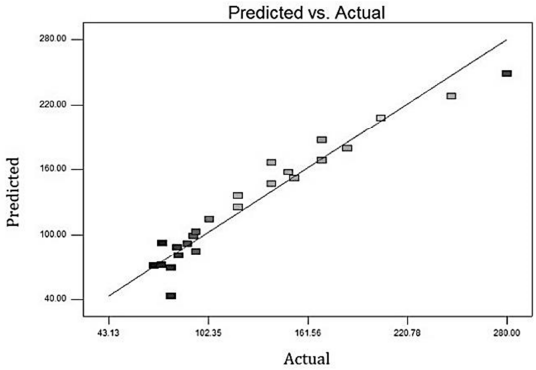
$$\text{Especial Energy} = 425.18384 - (0.60507 \times 350) - 93.15244 \times 0.5) - (909.12896 \times 0.1) + (1.94076 \times 350 \times 0.1) + (40.53275\times 0.5 \times 0.1) = 145.8735 \quad (۵)$$

$$\text{Roughness} = 3.46997 - (3.66716\text{E-}003 \times 350) + 0.74859 \times 0.1) + (3.14781\text{E-}003 \times 350 \times 0.1) + 3.69272\text{E-}006 \times 350^2) = 2.8239 \quad (۶)$$

با مقایسه مقادیر به‌دست آمده از رابطه مدل و آزمایش تجربی، مقدار خطای مدل در آزمایش ۱ برای انرژی مخصوص، ۲/۹ درصد و برای زبری سطح ۰/۳ درصد و مقدار خطای مدل در آزمایش ۲ برای انرژی مخصوص ۱/۱۵ درصد و برای زبری سطح ۰/۵ درصد می‌باشد. بنابراین با توجه به مقادیر خطاها مدل به‌دست آمده قابل قبول می‌باشد.

جهت بررسی دقت و اعتبار روابط پیشنهادی از آنالیز واریانس و نمودار نرمالیته مانده‌ها استفاده شده است. جدول ۵ آنالیز واریانس را برای متغیرهای پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان می دهد. با توجه به مقادیر F-Value و R^2 می‌توان نتیجه‌گیری کرد که معادله‌های (۱) و (۲) دارای اعتبار بالایی هستند و برای پیش‌بینی و تخمین نتایج می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

مقدار R^2 برای انرژی مخصوص سنگ زنی برابر ۹۳/۵۴٪ و برای زبری سطح برابر ۹۳/۴۷٪ می‌باشد که نشان دهنده دقت بالای تخمین داده ها (پیش‌بینی شده) در مقایسه با مقادیر تجربی است. برای نشان دادن مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی می‌توان از نمودارهای شکل ۳ برای پاسخ‌ها استفاده کرد که شیب این نمودار برابر با ضریب R^2 می باشد و هرچقدر به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت و اعتبار مدل است.

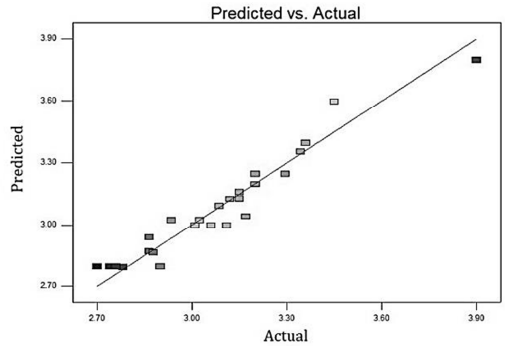


(الف)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.79.9]

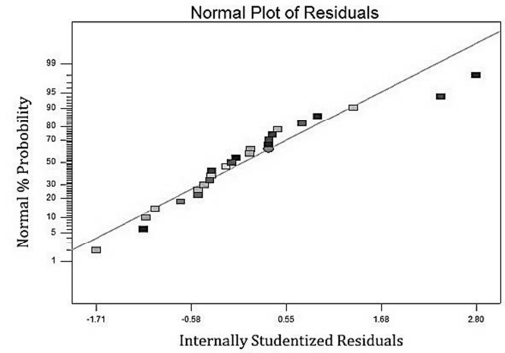
جدول ۱ آزمایشات انجام گرفته برای اثبات درستی مدل

پارامترهای سنگ زنی	نشانه	واحد	سطوح							
سرعت پیشروی	v_f	$\frac{mm}{min}$	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰
عمق بار	a	mm	۰/۲		۰/۵		۰/۸		۱	
سرعت پیشروی درسر	v_d	$\frac{\mu m}{rev}$	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۶		

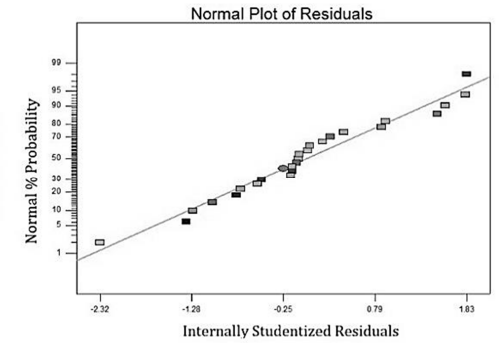


(ب)

شکل ۳ نمودار مقادیر پیش بینی شده در برابر مقادیر واقعی
الف) انرژی مخصوص ب) زبری سطح



(الف)



(ب)

شکل ۴ نمودار نرمالیته مانده ها. الف) انرژی مخصوص ب) زبری سطح

نمودار نرمالیته مانده‌ها نیز (شکل ۴) نشان دهنده پیروی نقاط از یک رفتار تقریبا خطی است . توزیع یکنواخت و خطی بودن، نشان دهنده توزیع خطاها بصورت نرمال است که حاکی از کمتر بودن خطا و اعتبار مدل است.

۵- بهینه سازی

یکی از مزایای مهم و کاربردی روش پاسخ سطح امکان بهینه سازی سیستم مورد مطالعه است. برای به‌دست آوردن شرایط بهینه با استفاده از نرم‌افزار Design Expert مقادیر مربوط به متغیرهای پاسخ براساس نتایج جدول ANOVA و نمودارهای کانتور دوبعدی به‌دست آمد. هدف از بهینه‌سازی، مینیمم کردن مقادیر انرژی مخصوص و زبری سطح است به‌طوری‌که انرژی مخصوص اهمیت بیشتری دارد. شرایط بهینه پارامترهای سنگ زنی و مقادیر انرژی مخصوص و زبری سطح در این شرایط در جدول ۴ آمده است.

شاخص مطلوبیت[1] روشی صنعتی برای بهینه‌سازی فرآیندهای دارای چندین متغیر پاسخ است. این شاخص برای هر متغیر پاسخی، عددی بین صفر و یک می‌باشد به‌طوری‌که عدد ۱ نشان‌دهنده بهینه‌ترین مقدار متغیر پاسخ، بدون در نظر گرفتن متغیرهای دیگر است. در فرآیندهای دارای چندین متغیر پاسخ، این شاخص درجه اهمیت بهینه‌سازی هریک از پاسخ‌ها را نیز در نظر می‌گیرد تا فرآیند در حالت کلی در بیشترین مقدار مطلوبیت قرار گرفته باشد [۶]. منحنی شاخص مطلوبیت فرآیند مورد بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است.

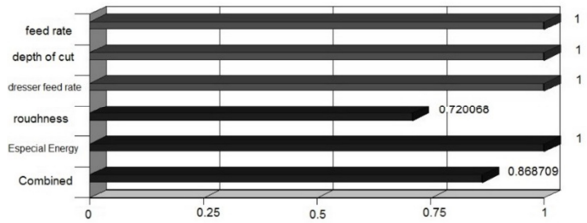
همان‌طور که از نمودار شکل ۶ مشاهده می‌گردد شاخص مطلوبیت برای انرژی مخصوص برابر ۱ و برای زبری سطح برابر ۰/۷۲ و در حالت کلی برابر ۰/۸۷ می باشد.

شکل ۷ اثر انتخاب مقادیر مختلف پارامترهای ورودی سنگ زنی خزشی را بر مقادیر متغیرهای پاسخ به دست آمده نشان می‌دهد.

جدول ۴ شرایط بهینه پارامترهای سنگ زنی

سرعت پیشروی $(\frac{mm}{min})$	عمق بار (mm)	سرعت پیشروی درسر $(\frac{\mu m}{rev})$	انرژی مخصوص $(\frac{j}{mm^3})$	زبری سطح R_a (μm)
۴۵۴	۰/۹۳	۰/۱	۶۴/۷۱۳۳	۲/۷۸۳۹۸

شکل ۶ منحنی شاخص مطلوبیت



۶- نتیجه‌گیری

۱- با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM)، مدل‌های ریاضی تاثیر پارامترهای

1. desirability

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.79.9]

سنگ‌زنی شامل سرعت پیشروی میز، عمق بار و سرعت پیشروی درسر بر انرژی مخصوص و زبری سطح به دست آمد و صحت این مدل‌ها مورد تایید قرار گرفت.

۲- شرایط بهینه پارامترهای سنگ‌زنی برای دستیابی به مینیمم مقدار انرژی مخصوص و زبری سطح به‌دست آمد. سپس شاخص مطلوبیت برای هرکدام از متغیرهای پاسخ و فرآیند کلی محاسبه گردید.

۳- منحنی‌های سه‌بعدی تاثیر مقادیر پارامترهای سنگ‌زنی بر متغیرهای پاسخ شامل انرژی مخصوص و زبری سطح رسم گردید.

۷- منابع و مراجع

[1] H.Jamshidi, *Investigation on grinding parameters effects on the gas turbine blade*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, 2004. (In Persian)

[2] G.Li, J.Sun, J.Li , Modeling and analysis of helical groove grinding in end mill machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, Issue 12, December 2014, pp. 3067-3076.

[3] Ch.Zhenzhen, X.Jiuhua, D.Wenfeng, M.Changyu, Grinding performance evaluation of porous composite-bonded CBN wheels for Inconel 718, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 27, Issue 4, August 2014, pp. 1022-1029.

[4] Z.L. Lu, J.W. Cao, H. Jing, T. Liu, F. Lu, D.X. Wang & D.C. Li , Review of main manufacturing processes of complex hollow turbine blades , *Journal of Virtual and Physical Prototyping* , Vol. 8, Issue 2, June 2013, pp. 87-95.

[5] H. Adibi, S. M. Rezaei, Ahmed A. D. Sarhan , Analytical modeling of grinding wheel loading phenomena , *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, Issue 1-4, September 2013, pp 473-485.

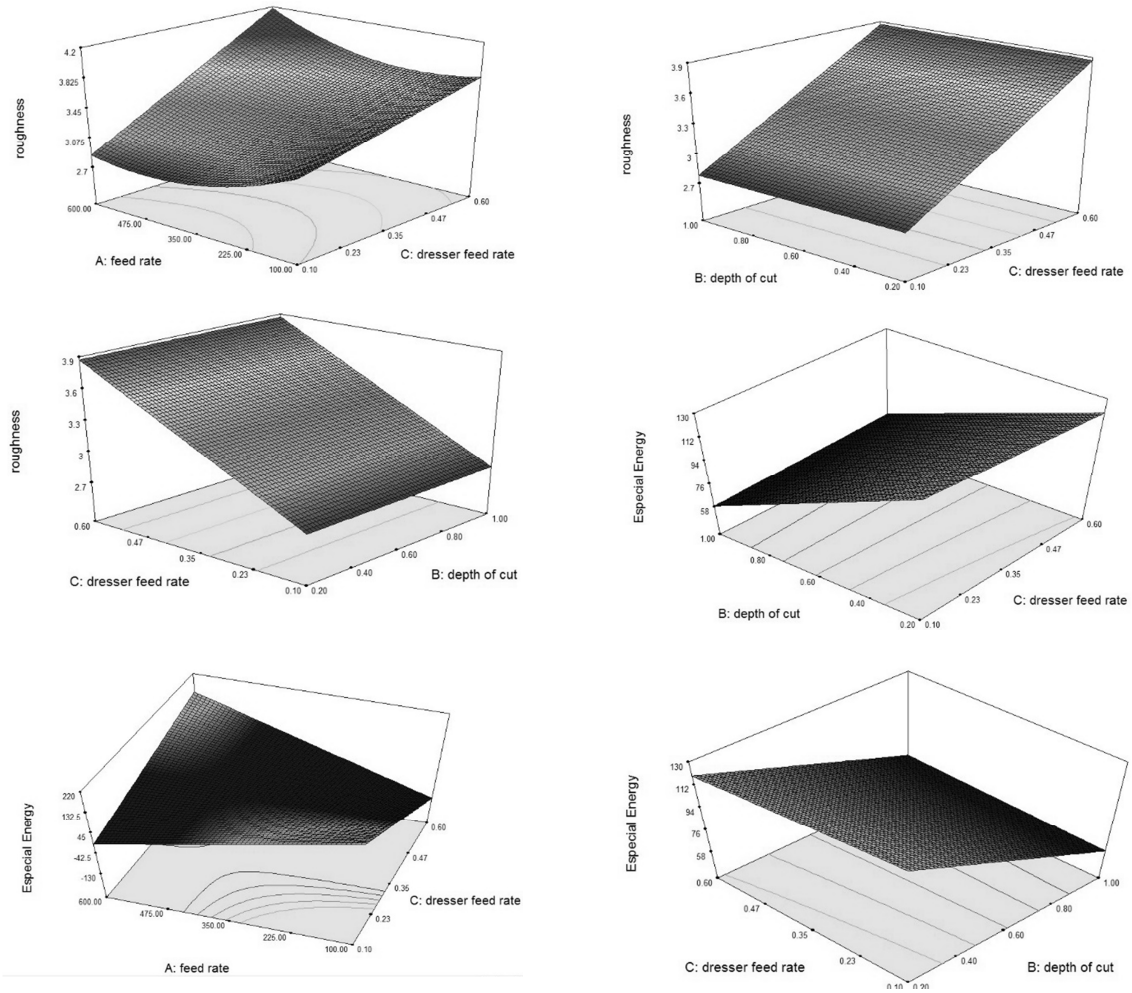
[6] W. M. Ponnala, K. L. N. Murthy, Modelling and optimization of end milling machining process, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 01, Issue03, November 2012, pp 430-447.

[7] K. O'Hara, W. Walston, E.Ross, R.Darolia , *Nickel base superalloy and article*, Patent No. US5482789 A, United States , 1996.

[8] A.K.Koul, R.Castillo, Creep behavior of industrial turbine blade materials, *ASM Material Congress*, Pittsburgh, Oct.1993, pp.75-88.

جدول ۵ جدول آنالیز واریانس

	مجموع مجذورات		میانگین مجذورات		F-value	R^2	Adj.R^2
	رگرسیون	مانده	رگرسیون	مانده			
انرژی مخصوص	۷۱۳۵۵/۷۵	۴۹۲۷/۸۰	۱۴۲۷۱/۱۵	۲۵۹/۳۶	۵۵/۰۲	۰/۹۳۵۴	۰/۹۱۸۴
زبری	۰/۴	۰/۱۱	۰/۴	۵/۵۵۲e-۳	۷۱/۵۲	۰/۹۳۴۷	۰/۹۲۱۶



شکل ۷ منحنی های سه بعدی تاثیر پارامترهای سنگ زنی بر انرژی مخصوص و زبری سطح

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.13.79.9]