



مدل سازی و بهینه سازی پارامترهای سنگ زنی خزشی پره توربین گازی

حامد اسماعیلی^۱، حامد ادیبی^{۲*}، سید مهدی 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

پره های توربین های گازی معمولاً پس از ریخته گری یا فورج نیاز است که در مناطقی از ریشه و شروود به مقدار حدود ۳ میلی متر ماشین کاری شود. سنگ زنی خزشی بهترین روش برای ماشین کاری این نواحی معرفی گردیده است. بهینه سازی پارامترهای سنگ زنی از مهمترین چالش های صنعتی می باشد. در این تحقیق، ابتدا مدل ریاضی برای ارتباط دادن پارامترهای ورودی و خروجی فرایند توسط روش پاسخ سطح استخراج شده است و سپس بهینه سازی این مدل انجام گرفته است. هدف از بهینه سازی، انتخاب پارامترهای سنگ زنی خزشی شامل سرعت پیشروی چرخ سنگ، عمق بار و سرعت شعاعی در سر برای دستیابی به حداقل مقدار انرژی مخصوص و بهترین صافی سطح است. این کار، صنایع سازنده پره های توربین گازی را قادر می سازد تا بهترین پارامترهای سنگ زنی خزشی را انتخاب کرده و اتوماسیون فرایند تولید توسط این مقادیر بهینه می تواند برنامه ریزی گردد.

کلید واژگان: پره توربین گازی، مدل سازی و بهینه سازی، 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 Technology, 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.

سنگ زنی یکی از تکنیک های پرداخت کاری می باشد. در طی تولید پره های توربین از سوپر آلیاژهای پایه نیکل، تولید یک سطح بدون عیب و یک پروفیل با دقت 0.020 میلی متر در ریشه پره، اهمیت زیادی دارد. در تولیدات صنعتی با تنظیم دقیق پارامترهای فرایند سنگ زنی خزشی می توان به این هدف دست یافت [۴].

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

- ✓ حجم براده بیشتری بین هر بار درس کردن چرخ، ماشین کاری می گردد.
- ✓ پروفیل چرخ به طور یکنواخت ساییده می شود که باعث حفظ شکل پروفیل می گردد.
- ✓ ظرفیت تولید بیشتری در این روش قابل دستیابی است.
- ✓ ماشین کاری پره های توربین توسط این فرایند نه تنها بیانگر توانایی این روش به عنوان یک فرایند براده برداری با حجم زیاد است بلکه قابلیت آن را برای رسیدن به دقت ابعادی و تolerانس های بسته نیز نشان می دهد. زیرا تolerانس های ریشه پره توربین معمولاً تا $5\mu m \pm$ تعریف شده است.

۱- مقدمه

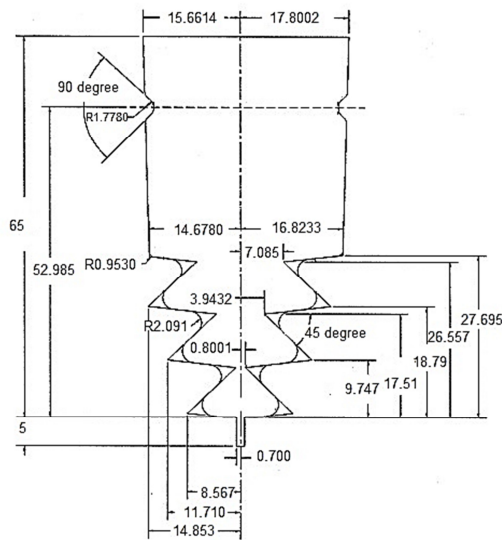
توربین های گازی نقش مهمی در سیستم های انتقال هوایی و تولید انرژی الکتریکی ایفا می نمایند. به منظور محدودیت هایی نظیر راندمان، قیمت و اثرات محیطی، درجه حرارت کاری توربین باید افزایش یابد. در سال های اخیر پیشرفت هایی در خنک کاری و متالوژی مواد پره های توربین صورت گرفته است. پره های توربین های گازی با عملکرد بالا نوعاً به گونه ای طراحی شده اند که از خزش مواد در حین کارکرد طولانی در دمای بالا جلوگیری شود. معمولاً از آلیاژهای پایه نیکل برای ساخت قطعات پرتنش مانند پره های متحرک و صفحات توربین استفاده می شود [۷].

ماشین کاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل به روش های سنتی مانند فرزکاری و خان کشی بسیار مشکل است. معمولاً پس از ریخته گری یا فورج پره های توربین نیاز می باشد که در مناطقی از ریشه و شروود تا عمقی حدود ۳ میلی متر ماشین کاری گردد. سنگ زنی خزشی بهترین روش برای ماشین کاری این نواحی معرفی گردیده است.

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل ۱ 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 ماشین کاری 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.

۲-۳ طراحی آزمایش

۲-۳-۱ روش پاسخ سطح (RSM) [۵]

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

۲-۳-۲ 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 می گذارند.

۲-۳-۳ متغیرهای پاسخ

انرژی مخصوص سنگ زنی و صافی سطح متغیرهای پاسخ می باشند. صافی سطح و انرژی مخصوص سنگ زنی تحت تاثیر پارامترهای طراحی هستند. انرژی مخصوص سنگ زنی از تقسیم توان سنگ زنی بر نرخ براده برداری به دست می آید.

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

۴-۱ مدل سازی

۴-۱-۱ ارائه مدل ریاضی

✓ یکی دیگر از مزایای استفاده از سنگ زنی خزشی به جای فرزکاری این است که پروفیل مورد نظر به راحتی روی چرخ سنگ قرار داده می شود. در صورت استفاده از درگیری که به صورت پیوسته با چرخ سنگ در تماس است همواره سنگ تیز مانده و در عین حال پروفیل روی پیشانی سنگ دائما حفظ می گردد.

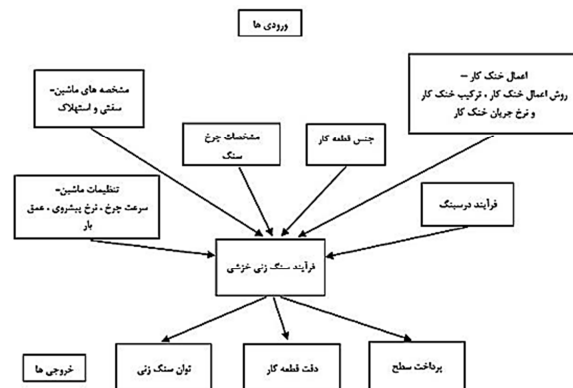
تفاوت های فرآیند سنگ زنی خزشی نسبت به سنگ زنی پاندولی به شرح زیر است [۸،۹]:

- (a) سرعت پیشروی: سرعت پیشروی در سنگ زنی پاندولی معمولا ۵-۲۵ mm/min ولی در سنگ زنی خزشی ۱۰-۱۰۰ mm/min می باشد.
 - (b) عمق برش: در سنگ زنی پاندولی عمق برش بسیار کم معمولا ۲-۲۵ μm ولی در سنگ زنی خزشی این عمق ۱-۱۰ mm می باشد.
 - (c) قوس درگیری چرخ با قطعه کار: قوس درگیری در سنگ زنی پاندولی معمولا در بازه ۱-۳ mm می باشد، در حالی که در سنگ زنی خزشی حداقل قوس درگیری ۱۰ برابر این مقدار می باشد.
- سنگ زنی خزشی را می توان فرایندی ذکر کرد که شامل یک سری ورودی و خروجی مشخص می باشد (شکل ۱). پیش بینی تاثیر دقیق ورودی ها بر خروجی ها و روابط بین آن ها کار مشکلی است.

۲-۲ روش انجام آزمایش سنگ زنی خزشی

۲-۲-۱ آماده سازی پره ها برای سنگ زنی

ابتدا تعداد ۲۰ عدد پره متحرک ردیف اول توربین گازی فریم ۵ ریخته گری شده، سپس پره ها برش خورده و از خوشه جدا شدند. برای این که هنگام سنگ زنی خزشی بتوان توان را به شکل صحیح اندازه گیری کرد و شکل خاص قسمت شنگ^۱ باعث تغییرات توان اندازه گیری شده نگردد قسمت شنگ جداگانه با انجام سنگ زنی معمولی و دستگاه اسپارک^۲ از مرحله ماشین کاری حذف گردید. سپس روی پره ها عملیات حرارتی حل سازی^۳ انجام گرفت. عملیات به صورت نگهداشتن در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت و سپس سرد کردن در داخل کوره با نرخ خنک کاری ۳۵ درجه سانتی گراد بر دقیقه انجام گرفت. برای حذف کردن اکسیدهای به وجود آمده در سطح، عملیات سنبلاست^۴ روی پره ها اعمال گردید.



شکل ۱ تحلیل سنگ زنی خزشی با پارامترهای ورودی و خروجی

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

۴-۲- بررسی دقت و اعتبار مدل

برای اثبات درستی مدل، آزمایشاتی طبق جدول ۱ طراحی، و انرژی مخصوص و زبری سطح آن به صورت 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:

$$\text{Especial Energy} = 425.18384 - (0.60507 \times 400) - 93.15244 \times 0.2 - (909.12896 \times 0.2) + (1.94076 \times 400 \times 0.2) + (40.53275 \times 0.2 \times 0.2) = 139.5 \quad (3)$$

$$\text{Roughness} = 3.46997 - (3.66716\text{E-}003 \times 400) + 0.74859 \times 0.2 + (3.14781\text{E-}003 \times 0.2 \times 0.2) + 3.69272\text{E-}006 \times 400^2 = 2.99 \quad (4)$$

آزمایش ۲:

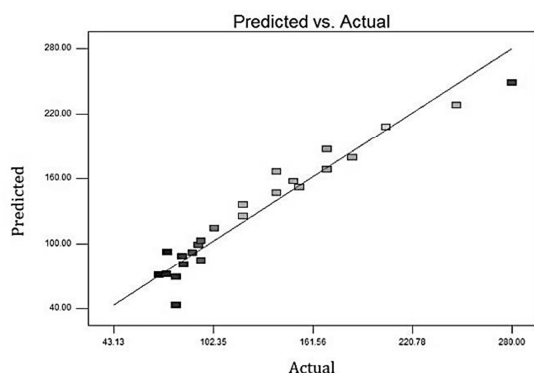
$$\text{Especial Energy} = 425.18384 - (0.60507 \times 350) - 93.15244 \times 0.5 - (909.12896 \times 0.1) + (1.94076 \times 350 \times 0.1) + (40.53275 \times 0.5 \times 0.1) = 145.8735 \quad (5)$$

$$\text{Roughness} = 3.46997 - (3.66716\text{E-}003 \times 350) + 0.74859 \times 0.1 + (3.14781\text{E-}003 \times 350 \times 0.1) + 3.69272\text{E-}006 \times 350^2 = 2.8239 \quad (6)$$

با مقایسه مقادیر به دست 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 به دست آمده قابل قبول می‌باشد.

جهت بررسی دقت و اعتبار روابط پیشنهادی از آنالیز واریانس و نمودار نرمالیت مانده‌ها استفاده شده است. جدول ۵ آنالیز واریانس را برای متغیرهای پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر R^2 و F-Value 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 داده‌ها (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 می‌باشد و هرچقدر به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت و اعتبار مدل است.



(الف)

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

$$\text{Especial Energy} = 425.18384 - (0.60507 \times \text{feed rate}) - (93.15244 \times \text{depth of cut}) - (909.12896 \times \text{dresser feed rate}) + (1.94076 \times \text{feed rate} \times \text{dresser feed rate}) + (40.53275 \times \text{depth of cut} \times \text{dresser feed rate}) \quad (1)$$

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

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 آن‌ها [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

جدول ۱ آزمایشات انجام گرفته برای اثبات درستی مدل

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

۵- بهینه سازی

یکی از مزایای مهم و کاربردی روش پاسخ سطح امکان بهینه سازی سیستم مورد مطالعه است. برای به دست آوردن شرایط بهینه با استفاده از نرم افزار Design Expert مقادیر مربوط به متغیرهای پاسخ براساس نتایج جدول ANOVA و نمودارهای کانتور دوبعدی به دست آمد. هدف از بهینه سازی، مینیمم کردن مقادیر انرژی مخصوص و زبری سطح است به طوری که 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^۱ روشی صنعتی برای بهینه سازی فرآیندهای دارای چندین متغیر پاسخ است. این شاخص برای هر متغیر پاسخی، عددی بین صفر و یک می باشد به طوری که عدد ۱ نشان دهنده بهینه ترین مقدار متغیر پاسخ، بدون در نظر گرفتن متغیرهای دیگر است. در فرآیندهای دارای چندین متغیر پاسخ، این شاخص درجه اهمیت بهینه سازی هر یک از پاسخ ها را نیز در نظر می گیرد 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.

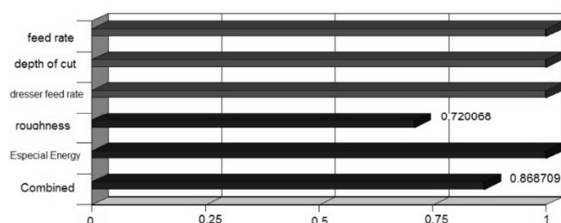
همان طور که از نمودار شکل ۶ مشاهده می گردد شاخص مطلوبیت برای انرژی مخصوص برابر ۱ و برای زبری سطح برابر ۰/۷۲ و در حالت کلی برابر ۰/۸۷ می باشد.

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

جدول ۴ شرایط بهینه پارامترهای سنگ زنی

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

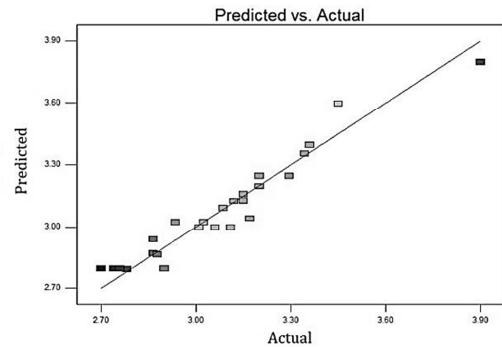
شکل ۶ منحنی شاخص مطلوبیت



۶- نتیجه گیری

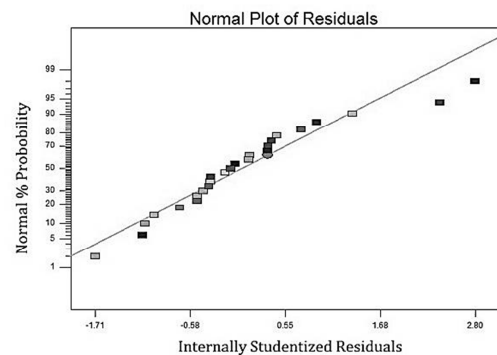
۱- با استفاده از روش پاسخ سطح (RSM)، مدل های ریاضی تاثیر پارامترهای

1. desirability

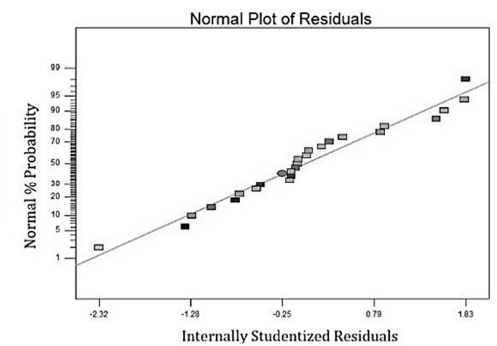


(ب)

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



(الف)



(ب)

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

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

- 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, Issue 03, 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.

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

۲- شرایط بهینه پارامترهای سنگ زنی برای دستیابی به مینیمم مقدار انرژی مخصوص و زبری سطح به دست آمد. سپس شاخص مطلوبیت برای هر کدام از متغیرهای پاسخ و فرایند کلی محاسبه گردید.

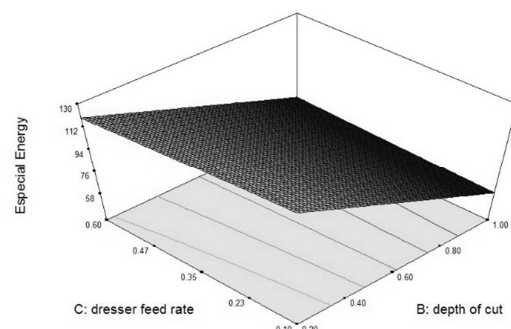
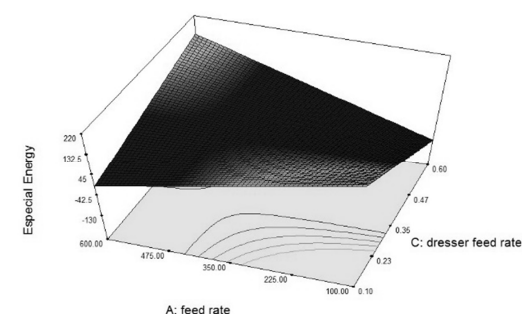
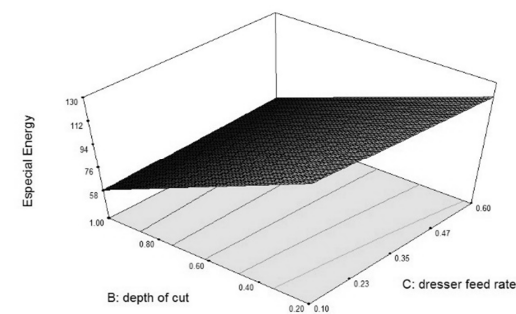
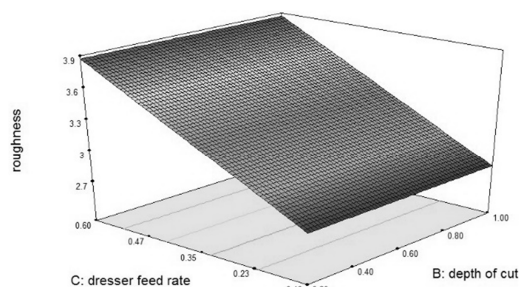
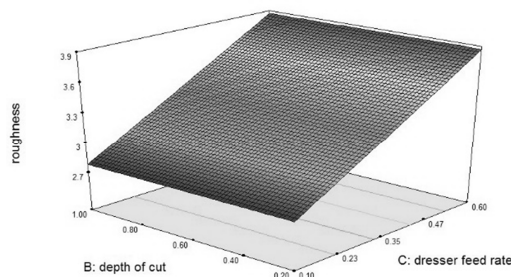
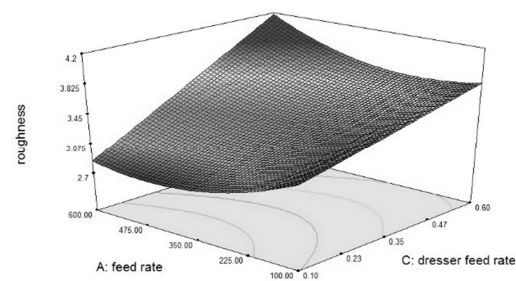
۳- منحنی های سه بعدی تاثیر مقادیر پارامترهای سنگ زنی بر متغیرهای پاسخ شامل انرژی مخصوص و زبری سطح رسم گردید.

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

جدول ۵ جدول آنالیز واریانس

	میانگین مجذورات		مجموع مجذورات		F-value	R ²	Adj.R ²
	مانده	رگرسیون	مانده	رگرسیون			
انرژی مخصوص	۲۵۹/۳۶	۱۴۲۷۱/۱۵	۴۹۲۷/۸۰	۷۱۳۵۵/۷۵	۵۵/۰۲	۰/۹۳۵۴	۰/۹۱۸۴
زبری	۵/۵۵۲۰-۳	۰/۴	۰/۱۱	۰/۴	۷۱/۵۲	۰/۹۳۴۷	۰/۹۲۱۶



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