

## بررسی پارامترهای سنگزنی ریشه پره متحرک توربین گازی در فرآیند سنگزنی خزشی و تاثیر آنها بر میزان انحراف ایرفویل پره به کمک روش طراحی آزمایشات

احمد رضا فاضلی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۸

### چکیده

فرآیند سنگزنی خزشی بطور گسترده‌ای در ساخت مواد سوپراآلیاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مواد بطور معمول در توربین‌های گازی، تجهیزات هواپیما و قطعات با کارکرد در دماهای بالا، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله اثر پارامترهای ورودی فرآیند سنگزنی خزشی شامل سرعت چرخشی سنگ، سرعت پیشروی سنگ و عمق براده برداری و سرعت پیشروی درسر دستگاه و بررسی اثر تعاملات آنها بر روی میزان خمیدگی ایرفویل پره متحرک توربین گازی رستون با استفاده از روش طراحی آزمایشات، پرداخته شده است. پس از انجام آزمایشات با استفاده از نتایج بدست آمده و بکمک تحلیل واریانس، مدل ریاضی پیش‌بینی کننده میزان خمیدگی ارائه گردیده و به کمک آن و با در نظر داشتن میزان خمیدگی مطلوب، پارامترهای ورودی جهت تولید بهینه بدست آمده‌اند. همچنین نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با کاهش سرعت پیشروی درسر، میزان عمق پیشروی، سرعت دورانی سنگ و افزایش سرعت پیشروی سنگ، میزان پارامتر خمیدگی مقدار کمتری را به خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه اندازه مطلوبی در حد تolerانس حاصل می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** سنگزنی خزشی، خمیدگی، روش طراحی آزمایشات، تحلیل واریانس

### ۱- مقدمه

ماشین کاری آن استفاده می‌شود. به طور کلی ساخت پره‌های متحرک موتورهای توربین گازی با توجه به شکل پیچیده و شرایط کاری حاد از تکنولوژی بالایی برخوردار است. به دلیل پروفیل متقارن کاج ریشه، سنگزنی خزشی آن با دستگاه سنگ دو اسپیندل از مزایای متعددی برخوردار است که پره‌سازان داخلی را به استفاده از این تکنیک ترغیب کرده است. شکل (۱) دستگاه سنگ خزشی را در حین انجام سنگزنی به همراه پره نشان می‌دهد.

پره‌های توربین گاز و موتورهای جت بدلیل کارکرد در دماهای بالا، از آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت که عمدتاً آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت هستند، ساخته می‌شوند. این آلیاژها بسیار بدتراش بوده و مهمترین روش ماشینکاری آنها سنگزنی خزشی است. دقیق‌ترین بخش این پره‌ها، ناحیه کاج ریشه است که کیفیت و سلامت سطح و وضعیت آن نسبت به ناحیه ایرفویل پره بسیار حیاتی می‌باشد که معمولاً از روش سنگزنی خزشی برای

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک (ساخت و تولید) - گروه مینا، شرکت مهندسی موادکاران، fazeli@mavadkaran, Fazeli\_ar@yahoo.com

فرا تر رود، پره بدلیل خمیدگی بیش از حد، هنگامی که پره در دیسک توربین نصب می‌شود بدلیل انحراف مسیر حرکت گاز و عدم توازن فشار گاز، سبب کاهش راندمان توربین گازی می‌گردد. در شکل (۲) پارامتر خمیدگی بر روی ایرفویل پره نشان داده شده است. همچنین شکل (۳) نیز پره ماشینکاری شده ردیف دوم توربین گازی رستون TA1750 را با ریشه سنگ خزشی شده نشان می‌دهد. در این مقاله اثر پارامترهای ورودی فرآیند سنگزنی خزشی شامل سرعت چرخشی سنگ، سرعت پیشروی سنگ و عمق براده‌برداری و سرعت پیشروی درسر دستگاه و بررسی اثر تعاملات آنها بر روی میزان خمیدگی ایرفویل پره با استفاده از روش طراحی آزمایشات پرداخته شده است. در نهایت نیز مدل پیش‌بینی کننده میزان خمیدگی در قالب معادلات ریاضی برای بهینه سازی فرآیند، استخراج شده است.

## ۲- توصیف مواد آزمایش

ماده مورد استفاده در این سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ می‌باشد. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

## ۳- طراحی آزمایشات

در طراحی آزمایشات امکان اینکه شرایط اجرای تمام آزمایشات وجود داشته باشد بسیار کم می‌باشد. بدین منظور باید از تکنیکی استفاده نمود تا بتوان آزمایشات مناسب و لازم را با دقت کافی و بالا (نزدیک به دقت معادله با آزمایشات کامل) انجام شود. در این تحقیق روش طراحی آزمایشات فاکتوریال کسری با در نظر گرفتن دو سطح برای هر پارامتر (+ و -) و استفاده از کسر یک چهارم و رزولوشن مرتبه ۴ (جهت امکان بررسی تاثیر تعاملات دو تایی) استفاده شده است،<sup>۲-۶</sup> IV - [۷]. همچنین برای هر پارامتر دو سطح در نظر گرفته شده است. جدول شماره (۲) ورودیهای متغیر فرآیند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد [۸ و ۹].



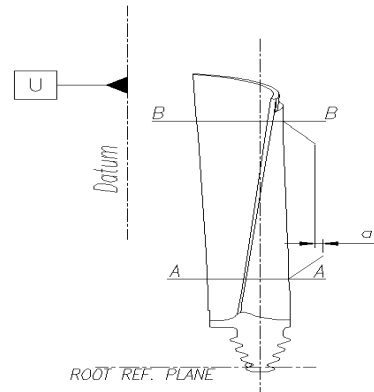
شکل (۱): فرآیند سنگ زشی پره

فرشید اقا محمدی و محمد حسین صادقی در پروژه خود طراحی و ساخت اولین و مهمترین فیکسچر ماشینکاری پره که مربوط به کاج ایرفویل و پروفیل شانک است، را مورد مطالعه قرار دادند [۱]. امیرعبداله و حسن فروغی نیز با استفاده از آزمایشات متعددی بر روی سوپرآلیاژ Inconel 738 LC و با ۵ چرخ سنگ مختلف، سرعتهای برشی و پیشروی متفاوت را در فرآیند سنگزنی خزشی مورد بررسی قرار دادند [۲]. P. X.Li و W.Osterle در دانشگاه برلین رفتار سوپر آلیاژ Inconel 738 LC را در برابر سنگزنی خزشی از بعد مکانیکی و حرارتی مورد آزمایش قرار دادند [۳]. Seikou Sekine سنگزنی سوپر آلیاژ پایه نیکل- آهن اینکونل 718 را به روش درس پیوسته مورد بررسی قرار داد و نشان داد که این روش برای ماشینکاری قطعات موتورهای هواپیما از دقت و صرفه اقتصادی بیشتری برخوردار است [۴]. Brach نیروهای ماشینکاری و انرژی مخصوص سنگزنی خزشی بر روی hard bearing steel با چرخ سنگ اکسید آلومینوم را مورد بررسی قرار داد و نتایج مربوط به سنگزنی رو به بالا و رو به پائین را با هم مقایسه نمود [۵]. Ohishi و Furukawa آزمایشی را بر روی bearing انجام دادند. در این آزمایشات تغییرات نیروهای افقی و عمودی و نیز نیروهای مماسی و شعاعی نسبت به تغییر عمق برش مورد بررسی قرار گرفت [۶].

پارامتر خمیدگی یکی از مهمترین پارامترهای ابعادی ایرفویل پره می‌باشد که در نصب صحیح پره بر روی دیسک توربین گازی تاثیر بسزایی دارد. در صورتی که این پارامتر بخوبی کنترل نشود واز محدوده تoleransi خود (در حدود ۰/۱۸ میلی متر)

جدول (۱): ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸

Element	Min	Max	Element	Min	Max
	Percentage			Percentage	
C	۰/۰۹	۰/۱۳	Nb	۰/۶	۱/۱
Cr	۱۵/۷	۱۶/۳	Ta	۱/۵	۲
Co	۸	۹	W	۲/۴	۲/۸
Al	۳/۲	۳/۷	Fe	-	۰/۳
Ti	۳/۲	۳/۷	Si	-	۰/۰۵
(Al+Ti)	۶/۵	۷/۲	Mn	-	۰/۰۵
B	۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	S	-	۰/۰۰۳
Zr	۰/۰۳	۰/۰۶			
Mo	۱/۵	۲			
Ni	Bal.				



شکل (۲): میزان پارامتر خمیدگی بر روی ایرفویل پره a



شکل (۳): پره ماشینکاری شده ردیف دوم توربین گازی رستون TA1750

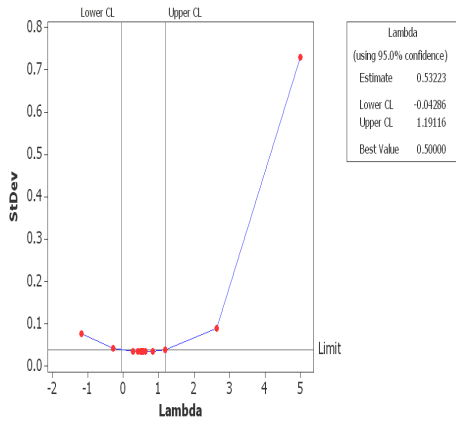
جدول (۲): نمایش سطوح پارامترها

پارامتر	سطح پائین	سطح بالا
P1 (mm) میزان عمق سنگزنی - قسمت اول	۰/۶	۰/۹
P2 (mm) میزان عمق سنگزنی - قسمت دوم	۰/۳	۰/۶
P3 (mm) میزان عمق سنگزنی - قسمت سوم	۰/۰۴	۰/۰۸
V (M/S) سرعت دورانی سنگ	۱۰۰	۱۸۰
f (mm/min) سرعت پیشروی سنگ	۰/۰۵	۰/۱۵
E (μm/rev) سرعت پیشروی درسر	۱۷	۲۵

#### ۴- تحلیل نتایج آزمایشات

روشی که برای بررسی اهمیت یک پارامتر و تاثیر آن بکار می‌رود روش تحلیل واریانس است. از طریق انجام این تحلیل، پس از انجام محاسبات آماری و انجام دادن آزمون F بر روی داده‌های خروجی آزمایشات توسط نرم‌افزار Minitab، مقادیر  $F_0$  مربوط به هر پارامتر که توسط نرم‌افزار بدست آمده، از جدول تحلیل واریانس استخراج می‌شود.

باید این موضوع مورد توجه قرارگیری که میزان قدرمطلق اختلاف اندازه‌های بدست آمده از اندازه‌گیری خمیدگی با مقدار متوسط پارامتر مورد نظر، جهت تحلیل آماری، مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین محدوده تolerانسی آن (بصورت یک طرفه) مورد بررسی قرار گرفته است و به کمک روش طراحی آزمایشات و تحلیل ANOVA، این مقدار تolerانسی با توجه به پارامترهای ورودی، کمیته شده است.



شکل (۴): نمودار Box-Cox برای بدست آوردن تغییر متغیر مناسب

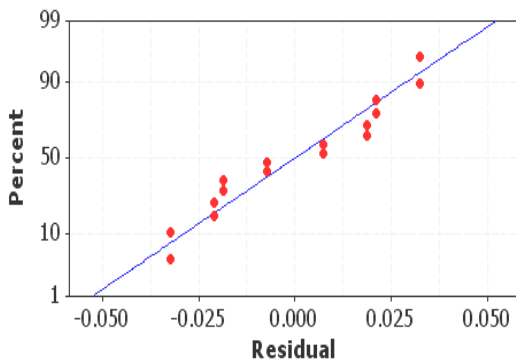
### ۵- تحلیل واریانس و بررسی جدول ANOVA

پس از تغییر متغیر و تحلیل آزمایشات می‌توان نتایج حاصل از تحلیل واریانس را در قالب جدول تحلیل واریانس یا جدول ANOVA ارائه و بررسی نمود، (جدول ۳).

جدول (۳): جدول تحلیل واریانس (Anova) برای پارامتر a پس از تغییر متغیر

پارامترها	درجه آزادی	Adj SS	Adj MS	Fo	P
Main Effects	۶	۰/۰۲۹۹	۰/۰۰۴۹	۱/۹۸	۰/۳۰۷
2-Way Interactions	۵	۰/۰۳۶۷	۰/۰۰۷۳	۲/۹۱	۰/۲۰۴
3-Way Interactions	۱	۰/۱۰۴۳	۰/۱۰۴۳	۱۳/۸۶	۰/۰۰۸
Residual Error	۳	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۲۵	۱۴/۳۸	
Total	۱۵				
R-Sq = ۹۵/۶۷٪		R-Sq(adj) = ۷۸/۸۸٪			

تعداد زیاد عامل‌های غیرمهم در مدل و همچنین کیفیت خوب مدل می‌باشد.

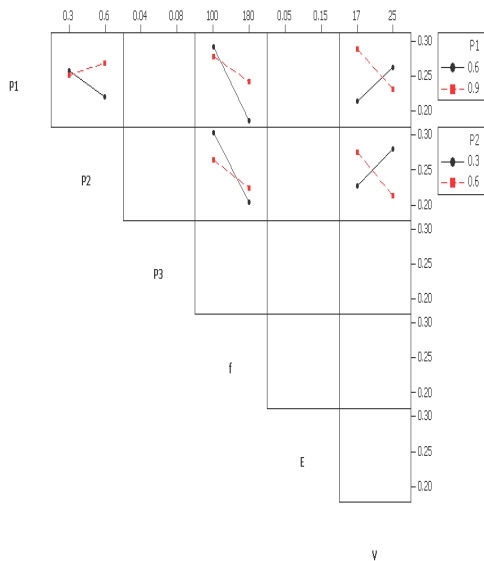


شکل (۵): نمودار تحلیل باقیمانده‌ها در تابع برازش شده بر پارامتر a

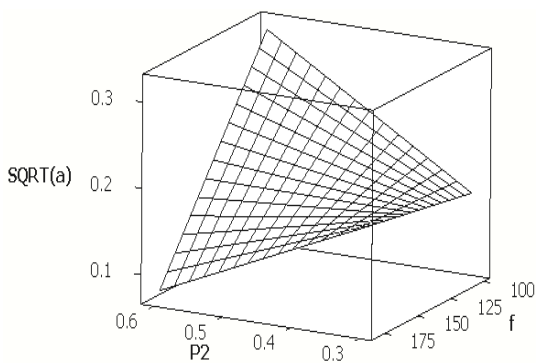
تحلیل واریانس و بررسی جدول ANOVA بدون بلوک بندی پس از حذف بلوک‌بندی و تحلیل آزمایشات مشاهده گردید که مدل بدست آمده دارای دقت خوبی نمی‌باشد و نمودار باقیمانده‌ها نیز از وضعیت خوبی برخوردار نیست. بنابراین به منظور بدست آوردن نتایج دقیق‌تر، بر روی اعداد بدست آمده برای پارامتر a، باید تغییر متغیر اعمال شود. بدین ترتیب که پس از اجرای روش Box-Cox بر روی اعداد مذکور، مطابق شکل (۴)، مقدار لمبدای<sup>۱</sup> بهینه برابر با ۰/۵ بدست می‌آید که نتیجه عملی آن استفاده از تغییر متغیر ریشه دوم می‌باشد. در نتیجه برای انجام تحلیل واریانس بر روی پارامتر a باید خروجی‌های فرآیند را با تغییر متغیر ریشه دوم تبدیل نمود و بر روی خروجی‌های جدید بدست آمده، تحلیل واریانس را انجام داد.

### ۶- بررسی کیفیت تحلیل انجام شده

شکل (۵) نمودار تحلیل باقیمانده‌ها در تابع برازش شده بر پارامتر a پس از تغییر متغیر را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود نقاط دارای پراکندگی کمتری نسبت به حالت بدون تغییر متغیر می‌باشند و این نشان از کفایت مدل بدست آمده می‌باشد. از طرفی همانطوریکه در انتهای جدول ANOVA (جدول ۳) مشاهده می‌شود، مدل برازش شده بر نتایج تا حدود ۷۸/۸۲ درصد بر داده‌های خروجی از آزمایشات منطبق است و نشان از کفایت مدل دارد. همچنین میزان R اصلاح شده (Radj) به مقدار ۹۵/۷۶٪، درصد تقریباً خوبی می‌باشد که نشان از عدم وجود



شکل (۷): نمودارهای مربوط به تعاملات بین پارامتری در مدل پارامتر a



شکل (۸): نمودار مربوط به تعاملات بین پارامترهای f و P2 بر روی a

### ۸- تحلیل رگرسیون بر پارامتر a

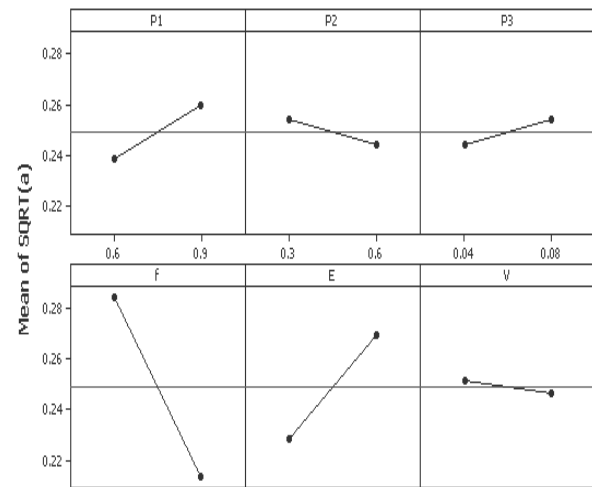
در تحقیق حاضر برای ارائه مدل پیش‌بینی کننده میزان خمیدگی، رابطه‌ای بصورت ریاضی بین خروجی آزمایشات و پارامترهای موثر از طریق تحلیل رگرسیون به کمک نرم‌افزار Minitab بدست آمده است. با توجه به ضرایب و ثابت‌های بدست آمده از نرم افزار برای هر پارامتر می‌توان معادله ریاضی حاکم بر نتایج آزمایشات را برای میزان ضربداری بصورت زیر ارائه داد.

$$\begin{aligned} \sqrt{a} = & -4.43 + 5.96 \times (P1) + 9.59 \times (P2) + 0.248 \times (P3) \\ & + 0.026 \times (f) + 0.41 \times (E) + 0.054 \times (V) - 11.93 \times (P1 \times P2) \\ & - 0.037 \times (P1 \times f) - 0.044 \times (P1 \times V) - 0.0648 \times (f \times P2) \\ & - 0.048 \times (V \times P2) + 0.089 \times (P1 \times P2 \times f) \end{aligned} \quad (1)$$

### ۷- بررسی نمودارهای اثرات اصلی و تعاملات بین پارامتری

برای بررسی بیشتر چگونگی تاثیر هر یک از پارامترها بر پارامتر a می‌توان نمودارهای اثرات پارامترهای اصلی را مطابق شکل (۶) رسم نمود. با توجه به نمودارهای بدست آمده، مشاهده می‌شود که جهت کمینه نمودن عدد پارامتر a باید تعاملات بین پارامتری را در نظر گرفت.

همانطوریکه از شکل (۷) مشاهده می‌شود از تعامل اثر میان پارامترهای ورودی چنین بر می‌آید که با کاهش سرعت پیشروی درسر، میزان عمق پیشروی قسمت اول، دوم و سوم و سرعت دورانی سنگ و افزایش سرعت پیشروی سنگ، میزان پارامتر a مقدار کمتری را به خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه میزان انحراف مطلوبی حاصل می‌گردد. شکل (۸) نیز نمودار اثر تعامل پارامتر میزان عمق سنگزنی - قسمت دوم (P2) و سرعت پیشروی سنگ (f) را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود با افزایش میزان عمق سنگزنی - قسمت دوم (P2) و سرعت پیشروی سنگ (f)، اندازه مطلوبی در حد تolerانس برای پارامتر a حاصل می‌گردد.



شکل (۶): نمودارهای مربوطه به تاثیر هر پارامتر بر میزان پارامتر a

## ۹- نتیجه گیری

به خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه اندازه مطلوبی در حد تفرانس حاصل می‌گردد.

۳- در مدلسازی فرآیند سنگزنی خزشی، در طراحی آزمایشات و بررسی پارامترهای ورودی اصلی، می‌توان فرآیند را در دو سطح بخوبی مدلسازی نمود.

۴- نهایتاً اینکه با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترهای موثر در فرآیند، بررسی فرآیند سنگزنی خزشی پره توربین گازی بوسیله طراحی آزمایشات، روشی بسیار موثر و دقیق با جوابهای قابل قبول می‌باشد.

۱- بهبود فرآیند سنگزنی خزشی پره توربین گازی می‌تواند از طریق انتخاب صحیح پارامترهای ورودی فرآیند شامل سرعت چرخشی سنگ، سرعت پیشروی سنگ و عمق براده برداری و سرعت پیشروی درسر دستگاه به کمک تحلیل واریانس و بررسی اثر پارامترهای ورودی و اثر تعاملات آنها بر میزان خمیدگی ایرفویل پره، انجام شود.

۲- نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با کاهش سرعت پیشروی درسر، میزان عمق پیشروی، سرعت دورانی سنگ و افزایش سرعت پیشروی سنگ، میزان پارامتر خمیدگی مقدار کمتری را

## مراجع

- ۱- فرشید اقا محمدی، محمد حسین صادقی، طراحی و ساخت فیکسچر سنگزنی خزشی پره ردیف اول توربین گازی فریم ۵ طرح GE با دستگاه سنگ دو اسپیندل، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۹.
- ۲- امیر عبدالله، حسن فروغی، سنگزنی خزشی سوپر آلیاژ Inconel 738 LC، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۶.
- 3- P. X.Li و W. Osterle, "Mechanical and thermal respose of a nickel-base superalloy upon grinding with removal rates", Material Science Engineering A238, 1997, pp357-366.
- 4- Seikou Sekine, Ichiro Inasaki, Shigekuni Kobayashi, "Creep feed grinding of Inconel 718 with continuous dressing".
- 5- K. Brach, D. M. Pai, E. Ratterman, M. C. Shaw, "Grinding Forces and Energy ", Journal of Engineering for Industry", Vol.110, Feb. 1988, pp25-31
- 6- Yuji Furukawa, Susumu Ohishi, Susumu Shiozaki, "Different ingrinding mechanism between Up- and Down-Cut creep feed grinding", Bull. Japan Soc. Of Prec. Engg. Vol.14, No.2, June 1980, pp 85-90.
- 7- D. C. Montgomery, design of experimentals & statistica modeling, McGraw Hill, Inc, 22NewYORK,2005 2005.
- 8- Colin Andrew, Trevor D.Howes & Tom R. A. Pearce, "Creep FeedGrinding",Book, Holt, Reinhart and Winston, 1985.
- 9- E. Parrot, "Development and application of continuous dress creep feed grinding", ImechE, Vol 197B, November 1983, pp231-235.