

کنترل آماری فرآیند سنگزنی خزشی ریشه پره متحرک توربین گازی

احمد رضا فاضلی نهرخلجی^۱، ابراهیم شریفی^۲
fazeli@mavadkaran.com

دریافت مقاله: ۸۹/۱۲/۱۱

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۸/۱۰

چکیده

در این پروژه به بررسی فرآیند سنگزنی خزشی ریشه پره توربین گازی به منظور تولید یکنواخت و قابل کنترل، پرداخته شده است. 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 یکی از پارامترهای موثر بر خوردگی درسر سنگزنی یعنی گودی شیار ریشه پره متحرک توربین گازی، با استفاده از روش طراحی آزمایشات، مورد بررسی قرار گرفته است. البته قبل از انجام آزمایشات، دستگاه سنگزنی خزشی به کمک کنترل فرآیند آماری مورد بررسی قرار گرفت تا تکرارپذیری و اطمینان از عملکرد دستگاه تثبیت گردد. پس از انجام آزمایشات با استفاده از نتایج بدست آمده و به کمک تحلیل واریانس، مدل ریاضی پیش‌بینی‌کننده میزان پارامتر موثر بر خوردگی درسر ارائه گردیده و به کمک آن و با در نظر داشتن میزان مطلوب آن، پارامترهای ورودی جهت تولید بهینه بدست آمده‌اند. همچنین نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش میزان عمق سنگزنی، سرعت پیشروی سنگ، سرعت دورانی سنگ و سرعت پیشروی درسر، برای تغییرات ابعادی گودی شیار ریشه پره، اندازه مطلوبی در حد تolerانس حاصل می‌گردد.

کلیدواژه:

سنگزنی خزشی - ریشه پره متحرک - کنترل فرآیند آماری - روش طراحی آزمایشات - تحلیل واریانس

۱- کارشناس ماشینکاری پره توربین، گروه مپنا، شرکت مهندسی موادکاران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه تفرش، دانشکده مهندسی مکانیک، تفرش، ایران

۱- مقدمه

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 بدتر از آن بوده و مهمترین روش ماشینکاری آنها سنگزنی خزشی است. دقیقترین بخش این پره‌ها، ناحیه کاج ایرفویل است که کیفیت و سلامت سطح و وضعیت آن نسبت به ناحیه ایرفویل پره بسیار حیاتی می‌باشد که معمولاً از روش سنگزنی خزشی برای ماشین‌کاری 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. در این میان ایرفویل پره با توجه به نیروهایی که به آن وارد می‌شود نسبت به بقیه قسمت‌های پره دارای کیفیت سطح و دقت ابعادی بالایی می‌باشد. به دلیل پروفیل متقارن کاج ایرفویل، سنگزنی خزشی آن با دستگاه سنگ دو اسپیندل از مزایای متعددی برخوردار است که پرسازان 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.



شکل (۱): فرآیند سنگ خزشی پره

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 آلومینیوم را مورد بررسی قرار داد و نتایج مربوط به سنگزنی رو به بالا و رو به پائین را با هم مقایسه نمود [۵]. Furukawa و Ohishi 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 شیار ریشه پره یکی از مهمترین پارامترهای ابعادی 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 تلرانسی خود (در حدود ۰/۱۱) فراتر رود، پره به دلیل بالا بودن ابعاد ریشه در دیسک توربین گازی نصب نمی‌شود و یا در صورت پائین بودن شیار ریشه، ریشه تضعیف شده و پائین‌تر از مدت زمان تعیین شده، پره باید تعویض گردد. در شکل (۲) پارامتر شیار ریشه پره نشان داده شده است. همچنین شکل (۳) نیز پره ماشینکاری شده ردیف دوم توربین گازی رستون TA1750 را با ریشه سنگ خزشی شده را در حالت نصب بر روی دیسک توربین نشان می‌دهد. 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 یکی از پارامترهای موثر بر خوردگی درسر سنگزنی ریشه پره توربین، با استفاده از روش طراحی آزمایشات پرداخته شده است. البته قبل از انجام آزمایشات دستگاه سنگزنی خزشی به کمک کنترل آماری مورد بررسی قرار گرفت تا تکرارپذیری و اطمینان از عملکرد دستگاه تثبیت گردد. در نهایت نیز مدل پیش‌بینی‌کننده میزان خمیدگی در قالب معادلات ریاضی برای بهینه‌سازی 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- شاخص توانایی ماشین CM, CMK

چنانچه خواسته شود از قابلیت توانایی یک ماشین برای تولید قطعه ای با کیفیت مطلوب مطلع شد و یا یک ماشین خریداری کرد و یا از

فرشید آقا محمدی و محمدحسین 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]. W. Osterle و P. X. Li 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

جدول (۲): مقادیر تست S برای $CM \geq 1.67$

N	%۹۰		%۹۵		%۹۹	
	LCVn	UCVn	LCVn	UCVn	LCVn	UCVn
۸	۰/۰۶۳۶	۰/۱۳۱	۰/۰۵۵۶	۰/۱۴۱۸	۰/۰۴۲۵	۰/۱۶۲۵
۱۰	۰/۰۶۸۰	۰/۱۲۷۷	۰/۰۶۰۸	۰/۱۳۷۱	۰/۰۴۸۲	۰/۱۵۵۲
۱۲	۰/۰۷۱۲	۰/۱۲۵۳	۰/۰۶۴۵	۰/۱۳۳۷	۰/۰۵۲۷	۰/۱۴۹۹
۱۴	۰/۰۷۳۶	۰/۱۲۳۴	۰/۰۶۷۳	۰/۱۳۱۲	۰/۰۵۶۲	۰/۱۴۵۹
۱۶	۰/۰۷۵۵	۰/۱۲۲۰	۰/۰۶۹۶	۰/۱۲۹۱	۰/۰۵۹۰	۰/۱۴۲۸
۱۸	۰/۰۷۷۰	۰/۱۲۰۷	۰/۰۷۱۴	۰/۱۲۷۴	۰/۰۶۱۴	۰/۱۴۰۲

$$CM \geq 1.67 \Rightarrow \frac{Tolerance}{6\sigma M} \geq 1.67 \Rightarrow T \geq 10\sigma M$$

در صورتی که انتظار $CM \geq 2.5$ باشد آنگاه:

$$CM \geq 2.5 \Rightarrow \frac{Tolerance}{6\sigma M} \geq 2.5 \Rightarrow T \geq 15\sigma M$$

در این حالت، تمام مقادیر این جدول در عدد $\frac{10\sigma M}{15\sigma M}$ یعنی $3/2$ ضرب و سپس مقایسه انجام می‌شود. همین روش را برای هر CM مطلوب می‌توان اعمال کرد.

برای فرآیند مورد بررسی یعنی سنگ‌زنی خزشی ریشه پره متحرک توربین گازی برای بررسی وضعیت دستگاه از یکی از پارامترهای مهم که در خوردگی دستگاه تاثیر بسزایی دارد استفاده گردیده است.

برای این فرآیند حداقل CM مورد انتظار با سطح اطمینان ۰/۹۰، ۱/۶۷ در نظر گرفته شده است.

$$CM \geq 1.67 \Rightarrow \frac{Tolerance}{6\sigma M} \geq 1.67 \Rightarrow T \geq 10\sigma M$$

با حداقل نمودن نوسانات ناشی از عوامل دیگر (مواد، اپراتور و ...) غیر از تغییرات ماشین، هشت قطعه سنگ‌زنی شده و بعد مورد بررسی اندازه‌گیری می‌شود. S8 حاصل از ۸ قطعه تولید شده برابر 0.13887 می‌باشد. حدود مشخصات فنی برای مشخصه مورد نظر ویا تلرانس برابر 0.224 است. در نتیجه نسبت S به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{S8}{Tolerance} = \frac{0.013887}{0.224} = 0.0619$$

چون آزمون از حد پائین کمتر است توانایی مورد انتظار ماشین ($CM \geq 1.67$) بر آورده می‌شود.

وضعیت ماشین پس از تعمیرات اساسی آگاه شد، می‌توان از شاخص توانایی CM, CMK بهره جست.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸

Element	Min Max percentage		Element	Min Max percentage	
	C	۰/۰۹		۰/۱۳	Nb
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		

برای محاسبه کارایی ماشین از روش تست S استفاده می‌گردد که این روش در زیر تشریح شده است [۷].

۳-۱- روش تست S

این روش زمان استفاده می‌شود که به دلایلی نتوان تعداد زیادی قطعه داشته باشیم یا تولید قطعات، گران و وقتگیر باشد. برای این منظور پس از اینکه ماشین به حالت پایدار رسید، از هشت قطعه اول تولید شده استفاده کرده، نسبت $S_n = \frac{Sn}{USL-LSL}$ را محاسبه می‌شود که در آن $S_n = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ است. سپس با توجه به سطح اطمینان قابل قبول به جدول (۲) مراجعه می‌شود. سطح اطمینان ۹۰ درصد، ۹۵ درصد و ۹۹ درصد در جدول ارائه شده است. انتخاب سطح اطمینان به میزان سختگیری تحلیلی بستگی دارد بدیهی است هر چه اطمینان بالاتر انتخاب شود تحلیل با سختگیری بیشتری انجام می‌گیرد. اگر $S < LCVn$ باشد، یعنی ماشین انتظارات ما را برآورده می‌کند. اگر $S > UCVn$ باشد، یعنی ماشین نمی‌تواند انتظارات را برآورده کند. اگر $LCVn < UCVn$ بود، دوباره دو نمونه اضافه کرده و روش بالا را تکرار می‌کنیم.

این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که ۳۰ نمونه جمع‌آوری شود. اگر نتیجه مطلوب بدست نیاید ۳۰ نمونه را به ۱۰ نمونه سه تایی تقسیم کرده، با استفاده از روش بالا، توانایی ماشین را محاسبه می‌کنیم.

توجه شود که جدول (۲) بر اساس $CM \geq 1.67$ (Capability Machine) طراحی شده است.

باید این موضوع مورد توجه قرار گیری که میزان قدر مطلق اختلاف اندازه‌های بدست آمده از اندازه‌گیری گودی شیار با مقدار متوسط پارامتر مورد نظر، جهت تحلیل آماری، مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین محدوده تoleransi آن (به صورت یک طرفه) مورد بررسی قرار گرفته است و به کمک روش طراحی آزمایشات و تحلیل ANOVA، این مقدار تoleransi با توجه به پارامترهای ورودی، کمینه شده است.

جدول (۳): نمایش سطوح پارامترها

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

۵- 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 نرم افزار Minitab، مقادیر F_0 مربوط به هر پارامتر که توسط نرم‌افزار بدست آمده، از جدول تحلیل واریانس استخراج می‌شود.

۵-۱- تحلیل واریانس و بررسی جدول ANOVA

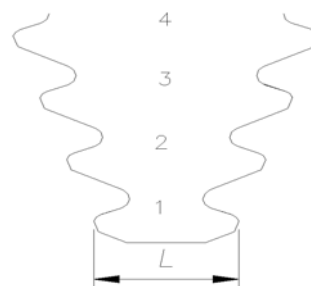
با استفاده از تحلیل واریانس این موضوع آشکار گردید که نقاط میانی موثر واقع نشده‌اند (P-Value=1). بنابراین روش طراحی آزمایشات، صحیح می‌باشد و لزومی ندارد تا پارامترهای موثر فرآیند را در سه سطح یا بیشتر مورد بررسی قرار داد و فرآیند را می‌توان با در نظر گرفتن دو سطح برای پارامترهای ورودی اصلی، بررسی و تحلیل نمود. بنابراین برای تحلیل واریانس بر روی پارامتر L، نقاط میانی حذف شدند و تحلیل بدون حضور آنها انجام گردید.

علاوه بر آن، بدست آمدن مقادیر کوچکتر از سطح ریسک ۰/۱ برای پارامتر P در جدول (۴) برای پارامترهای مذکور، نشان از موثر بودن پارامتر مربوطه دارد.

در ادامه به بررسی یکی از پارامترهای موثر بر خوردگی درسر سنگزنی خزشی ریشه پره توربین پرداخته شده است تا اثر پارامترهای ورودی فرآیند را بر این پارامتر تاثیر گذار، به کمک روش طراحی آزمایشات و تحلیل واریانس (ANOVA) مورد بررسی قرار گیرد.

۴- 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، 2^{4-2} - IV [۸]. همچنین برای هر پارامتر دو سطح در نظر گرفته شده است. جدول شماره (۳) ورودی‌های متغیر فرآیند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

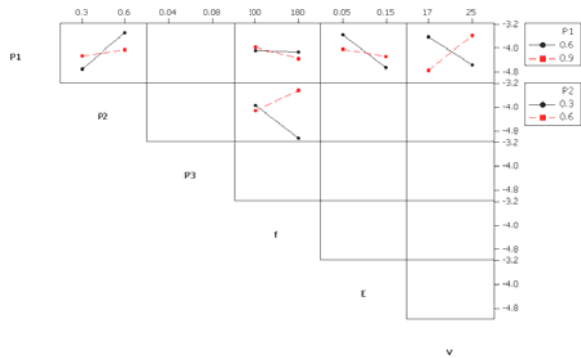


شکل (۲): پارامتر شیار ریشه پره

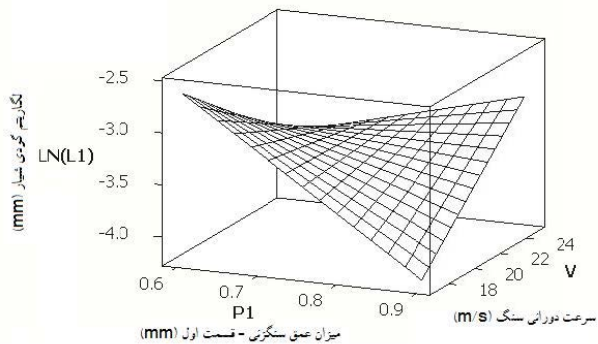


شکل (۳): پره ماشینکاری شده ردیف دوم توربین گازی رستون TA1750

قرار داد ولی این موضوع بدلیل اثر تعاملات پارامترها، نمی توان آنها را به صورت جداگانه بررسی نموده و نتیجه گیری نمائیم. در نتیجه به بررسی نمودار اثر تعاملات پارامترها می پردازیم. همانطوری که از شکل (۵) مشاهده می شود از اثر تعاملات میان پارامترهای ورودی چنین برمی آید که با افزایش میزان عمق سنگزنی - قسمت اول و سوم، سرعت پیشروی سنگ و سرعت پیشروی در سر و کاهش سرعت دورانی سنگ و عمق سنگزنی - قسمت دوم، عدد پارامتر L مقدار کمتری را به خود اختصاص می دهد و در نتیجه اندازه مطلوبی در حد تفرانس حاصل می گردد. شکل (۶) نیز نمودار اثر تعامل پارامتر میزان عمق سنگزنی - قسمت اول (P1) و سرعت دورانی سنگ (V) را نشان می دهد. همانطوری که مشاهده می شود با افزایش میزان عمق سنگزنی - قسمت اول (P1) و کاهش سرعت دورانی سنگ (V)، اندازه مطلوبی در حد تفرانس برای پارامتر موثر L حاصل می گردد.



شکل (۵): نمودارهای مربوط به تعاملات بین پارامتری در مدل پارامتر L



شکل (۶): نمودار مربوط به تعاملات بین پارامترهای V و P1 بر روی L

۶- تحلیل رگرسیون بر پارامتر L

در تحقیق حاضر برای ارائه مدل پیش بینی کننده میزان گودی شیار، رابطه ای به صورت ریاضی بین خروجی آزمایشات و پارامترهای موثر از طریق تحلیل رگرسیون به کمک نرم افزار Minitab بدست آمده

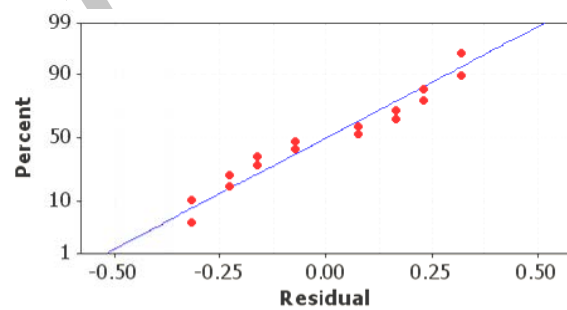
۵-۲- بررسی کیفیت تحلیل انجام شده

شکل (۴) نمودار تحلیل باقیمانده ها در تابع برازش شده برای پارامتر را نشان می دهد. همانطوری که مشاهده می شود غیر از دو نقطه غیرعادی، سایر نقاط دارای توزیع نرمال خوبی می باشند.

جدول (۴): جدول تحلیل واریانس (ANOVA) برای پارامتر L

Parameters	Dof	Adj SS	Adj MS	Fo	P
Main Effects	6	5.06	0.844	3.44	0.16
2-Way Interactions	5	9.74	1.94	7.93	0.05
3-Way Interactions	1	1.73	1.733	7.05	0.07
Residual Error	3	0.73	0.245		
Total	15				

R-Sq = %95.73 R-Sq(adj) = %78.63



شکل (۴): نمودار باقیمانده ها در تابع برازش شده بر پارامتر L

از طرفی همانطوری که در انتهای جدول ANOVA (جدول (۳)) مشاهده می شود، ضرایب R جهت بررسی کیفیت مدل ایجاد شده، می باشند. با توجه به ضرایب R بدست آمده، مدل برازش شده بر نتایج تا حدود ۹۵/۷۳ درصد بر داده های خروجی از آزمایشات منطبق است و این نشان از کفایت مدل دارد. همچنین میزان R اصلاح شده (Radj) به مقدار ۷۸/۶۳٪، درصد تقریباً خوبی می باشد که نشان از عدم وجود تعداد زیاد عامل های غیر مهم در مدل و همچنین کیفیت خوب مدل می باشد.

۵-۳- بررسی نمودارهای اثرات اصلی و تعاملات بین پارامتری

برای بررسی بیشتر چگونگی تاثیر هر یک از پارامترهای اصلی بر پارامتر L می توان نمودارهای اثرات پارامترهای اصلی را مورد بررسی

درس دستگاه به کمک تحلیل واریانس و بررسی اثر پارامترهای ورودی و اثر تعاملات آنها بر میزان تغییرات شیار ریشه پره، انجام شود.

۳- نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که با افزایش میزان عمق سنگزنی - قسمت اول و سوم، سرعت پیشروی سنگ و سرعت پیشروی درس و کاهش سرعت دورانی سنگ و عمق سنگزنی - قسمت دوم، عدد پارامتر L مقدار کمتری را به خود اختصاص می‌دهد و در نتیجه اندازه مطلوبی در حد تolerانس حاصل می‌شود.

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

۵- در نهایت با توجه به زیاد بودن تعداد پارامترهای موثر در فرآیند، بررسی فرآیند سنگزنی خزشی پره توربین گازی به وسیله طراحی آزمایشات، روشی بسیار موثر و دقیق با جواب‌های قابل قبول است.

۸- مراجع

[۱] آقامحمدی، ف.، صادقی، م. ح.، "طراحی و ساخت فیکسچر سنگزنی خزشی پره ردیف اول توربین گازی فریم ۵ طرح GE با دستگاه سنگ دو اسپیندل"، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۹.

[۲] عبدالله، ا.، فروغی، ح.، "سنگزنی خزشی سوپر آلیاژ Inconel 738 LC"، دانشگاه تربیت مدرس، پروژه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۶.

[3] Li, P. X. Osterle, W., "Mechanical and Thermal Respose of a Nickel-Base Superalloy upon Grinding with Removal Rates," Material Science Engineering A238, 1997, pp. 357-366.

[4] Sekine, S., Inasaki, I., Kobayashi, Sh., "Creep feed grindingof Inconel 718 with continuous dressing".

[5] Brach, K., Pai, D. M., Ratterman, E., Shaw, M. C., "Grinding Forces and Energy ", Journal of Engineering for Industry", Vol. 110, Feb. 1988, pp. 25-31

[6] Furukawa, Yuji, Ohishi, Susumu, Shiozaki, Susumu, "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.

[۷] کاظم نژاد، ه.، گودرزی، ف.، احمدی قمی، ر.، ودایع خیری، ح.، "کنترل آماری فرآیند مفاهیم و روش پیاده سازی، شرکت طراحی مهندسی و تامین قطعات ایران خودرو (سپکو)"، انتشارات مرکز آموزش و تحقیقات صنعتی ایران ۱۳۸۵

[8] MontGomery, D. C., Design of Experimentals & Statistica Modeling, McGrow Hill, Inc, 22NewYORK, 2005.

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 گودی شیار به صورت زیر ارائه داد.

لازم به ذکر است که در ارائه مدل، هر گاه یک تعامل بین پارامتری، موثر واقع گردد و وارد مدل شود باید اجزاء آن تعامل (پارامترهای اصلی دربرگیرنده) نیز در مدل آورده شود.

$$\begin{aligned} \ln(L1) = & 29.313 - 37.745 (P1) - 38 (P2) - 12.013 (P3) \\ & - 0.149 (f) - 28.379 (E) - 0.654 (V) + 39.809 (P1 \times P2) \\ & + 0.15(P1 \times f) - 0.365 (P1 \times P2 \times f) + 0.890(P1 \times V) \\ & + 28.808 (P1 \times E) + 0.349 (P2 \times f) \end{aligned}$$

۶-۱- بررسی کیفیت مدل بدست آمده

پس از انجام تحلیل رگرسیون و بدست آوردن مدل، برای بررسی این موضوع که آیا مدل بدست آمده، خروجی‌های فرآیند را پوشش می‌دهد یا خیر، تحلیل انجام شده به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود و میزان اهمیت و تاثیر آن توسط تحلیل واریانس مطابق جدول (۵) بررسی می‌شود.

جدول (۵): جدول ANOVA حاکم بر تحلیل رگرسیون

Analysis of Variance					
مقدار پارامتر	F _o	میانگین ها	میانگین ها	میانگین ها	مقدار پارامتر
پارامترها					
Regression	۳/۵۵	۰/۰۰	۰/۰۰۸	۱۰	۰/۰۸
Residual		۰/۰	۰/۰۰۱	۵	
Error					
Total			۰/۰۱	۱۵	

با توجه به جدول ANOVA و مقایسه مقدار F_o مربوط به پارامتر رگرسیون با مقدار متناظر با F_α که از جداول مربوط به تحلیل واریانس بدست می‌آید و همچنین توجه به اینکه پارامتر P در جدول (۴)، کوچکتر از سطح ریسک ۰/۱ می‌باشد، تحلیل رگرسیون انجام شده موثر و به عبارتی مناسب ارزیابی می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

۱- با توجه به شاخص توانایی ماشین CM , CMK ماشین از قابلیت توانایی خوبی برای تولید قطعات با کیفیت مطلوب برخوردار می‌باشد.

۲- 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