

# بهینه‌سازی پارامترهای صیقل کاری آینه‌های مسی به روش

## شیمیایی - مکانیکی

عباس وفایی صفت<sup>۱</sup>      سید مهدی طاووسی<sup>۲</sup>  
 دانشکده فنی و مهندسی      دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک  
 دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>      دانشگاه پیام نور تهران  
 (تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵)

### چکیده

آینه‌های مسی، پرکاربردترین آینه‌ها در صنایع لیزر به‌خصوص لیزرهای با توان بالا است. یکی از روش‌های تولید این آینه‌ها فرآیند صیقل کاری شیمیایی - مکانیکی است که پارامترهای آن ارتباط مستقیم با کیفیت سطح آینه دارد. هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی پارامترهای مهم در فرآیند صیقل کاری آینه مسی می‌باشد. در این راستا از روش طراحی آزمایشات با رویکرد تاگوچی جهت جمع‌آوری داده‌های تجربی استفاده شده است. سپس به کمک نتایج آنالیز واریانس، و تحلیل نسبت سیگنال به نویز، سطوح بهینه پارامترها تعیین گردید. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان‌دهنده بهبود ده درصدی نسبت به بهترین حالت آزمایشات طراحی شده، می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** صیقل کاری شیمیایی - مکانیکی، مس، لیزرهای پرتوان، طراحی آزمایش‌ها، بهینه‌سازی

## Optimization of Copper Mirrors Polishing Parameters by Chemical-Mechanical Method

A. Vafaeesefat

S.M. Tavoozi

Department of Mechanical  
Engineering, Imam Hussein University

Department of Mechanical  
Engineering, Payame Noor

(Received: 09/February/2018 ; Accepted: 15/January/2019)

### ABSTRACT

Copper mirrors are most applicable in laser industries especially in highest laser powers. One of the processes for manufacturing these mirrors is Chemical-mechanical polishing process. Quality of mirror surface is depended on many factors in this process. The main objective of this study is to model and optimize important parameters in copper mirrors polishing process. Optimization of polishing parameters was performed using experimental data and statistical methods. A Taguchi approach is employed in order to gather experimental data. Based on analysis of variance (ANOVA) and signal-to-noise (S/N) ratio, the best sets of polishing parameters specifications have been determined. The results of the optimization indicate an improvement of %10 compared to the best experimental results of the design experiments.

**Keywords:** Chemical-Mechanical Polishing, Copper, Highest Laser Powers, DOE, Optimization

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): avafae@ihu.ac.ir

۲- دانشجو کارشناسی ارشد: tavoozi2006@yahoo.com

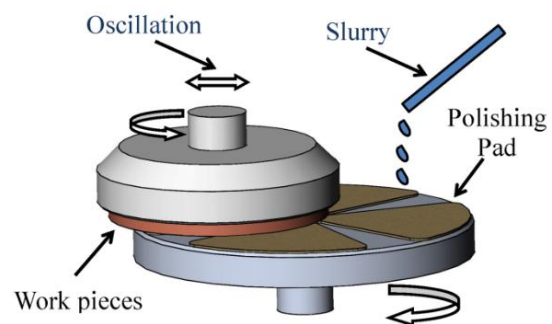
## ۱- مقدمه

مناسب‌ترین فلز برای ساخت آینه‌های به‌کاررفته در لیزرهای با توان بالا شناخته شده است. این فلز خواص حرارتی بسیار خوبی دارد که عمر مفید قابل قبولی را برای آینه به ارمغان می‌آورد و سبب ایجاد قابلیت اطمینان محصولات مربوطه می‌گردد. این آینه‌ها در ابعاد مختلف و شکل‌های گوناگون سطح نظیر تخت، محدب، مقعر، استوانه‌ای و غیره کروی طراحی و ساخته می‌شوند که هر کدام بسته به نوع کاربرد، رفتارهای انعکاسی متفاوتی دارند. در پاره‌ای از موارد این آینه‌ها به سیستم خنک‌کننده با آب نیز مجهز می‌شوند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای آینه‌های دقیق، دقت سطح آنها می‌باشد. هر چه مقدار این پارامتر به عدد صفر نزدیکتر باشد، نشان دهنده نزدیکتر بودن سطح صیقل کاری شده، به سطح مطلوب است. پارامتر دقت سطح در روش صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی به عوامل مختلف شیمیایی و مکانیکی وابسته است [۳].

در تحقیقی که توسط جانگ در سال ۲۰۰۵ انجام شد، نتیجه‌گیری شد که برای صیقل کاری مس به روش شیمیایی- مکانیکی، هرچه میزان اندازه ذرات ساییده و همچنین توزیع آنها در دوغاب افزایش یابد، نرخ باربرداری افزایش خواهد یافت [۴]. در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۷، بلکر و همکاران مطالعه‌ای در زمینه ارتباط بین صافی سطح و دانه‌های ساییده در صیقل کاری قطعات اپتیکی انجام داد. وی به این نتیجه رسید که با کاهش اندازه ذرات ساییده صافی سطح بهتری حاصل شد [۵]. در سال ۲۰۰۷، راکاوا و همکاران، طی یک تحقیق دانشگاهی، نشان دادند که در صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی برای هم سطح سازی سطح مس، با افزایش دمای دوغاب، نرخ باربرداری از سطح افزایش می‌یابد [۶]. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۱۱ توسط اسمیر بر روی صیقل کاری نهایی سطوح شیشه‌های اپتیکی و پلیمری به روش ذرات سایش آزاد، با هدف ایجاد سطح نهایی با صافی سطح بالا و نرخ باربرداری پایین انجام شد، مشخص گردید که ابعاد، شکل و تمرکز ذرات ساییده و سختی صفحه و قطعه کار، بر روی مکانیزم باربرداری تاثیر عمده دارد. همچنین سرعت نسبی، فشار و زمان صیقل کاری پارامترهای موثر بر نرخ باربرداری است و سرعت‌های پایین‌تر و زمان پولیش کمتر سبب بدتر شدن صافی سطح گردید [۷]. در تحقیق دیگری که تاکایا و همکاران در سال ۲۰۱۱ برای پولیش ویفر مسی به روش صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی و با استفاده از ذرات ساییده کلئوئید سیلیکا انجام داد، نتیجه گرفت

فرآیند صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی از جمله روش‌های برداشت ماده از سطح است، که از ترکیب واکنش شیمیایی (حکاک) و صیقل کاری مکانیکی (سایش) حاصل می‌شود [۱]. این روش، برداشت از سطح ماده را به‌طور دقیق و به مقدار جزئی فراهم می‌کند. در این روش به‌وسیله ترکیب حرکت خطی و چرخشی به‌همراه دوغاب که حاوی ذرات ساییده می‌باشد، عملیات صیقل کاری انجام می‌شود. عملکرد صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی در سه مرحله: غیرفعال سازی سطح، برداشت مکانیکی سطح غیرفعال ناشی از سایش ذرات ساییده و جاروب مواد ساییده شده، انجام می‌شود [۲].

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این روش غالباً شامل یک صفحه گرد چرخان است که دارای تختی بسیار زیادی بوده و سطح آن توسط یک بالشتک صیقل کاری پوشانده شده است. قطعه کار به‌صورت وارونه در یک نگهدارنده قرار می‌گیرد؛ این نگهدارنده، سطح قطعه کار را در حالت افقی قرار می‌دهد. در حین فرآیند، دوغاب بر روی بالشتک صیقل کاری می‌ریزد. به‌طور معمول صفحه، حرکت چرخشی و قطعه کار حرکت نوسانی همراه با چرخشی آزاد دارد و نیروی عمودی به سمت پایین از طریق کنگی ماشین به قطعه کار اعمال می‌گردد. نیروی عمودی برای باربرداری مکانیکی لازم است و مقدار آن به سطح تماس بالشتک و قطعه کار وابسته است.



شکل (۱): نمایی از روش صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی

یکی از مهم‌ترین کاربردهای این روش صیقل کاری آینه‌های شیشه‌ای و فلزی است. آینه‌های فلزی در صنایع مختلف همچون صنایع هوافضا، صنایع نظامی و غیره بسیار پرکاربرد می‌باشند. در میان این مواد، مس به عنوان بهترین و



شکل (۲): دستگاه تداخل سنج

### ۳- پارامترهای فرآیند

پارامترهای متغیر لحاظ شده برای انجام آزمایشها به همراه مقادیر انتخاب شده هر پارامتر، در جدول ۱ ارائه شده است. زمان صیقل کاری برای تمامی آزمایشها، ۳ ساعت در نظر گرفته شده است. سایر متغیرها از جمله دمای دوغاب و دبی آن ثابت فرض شده است. خروجی فرآیند نیز، دقت سطح نمونهها است، که به طور اختصار پی وی<sup>۱</sup> گفته می شود و برحسب ضریبی از طول موج  $\lambda$  می باشد.

جدول (۱): پارامترهای ورودی

ردیف	عنوان	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
۱	جنس ذرات ساینده	آلومینا	سیلیکا	-
۲	ذرات ساینده در دوغاب (درصد وزنی)	۵٪	۱۰٪	۱۵٪
۳	ماده اکسید کننده در دوغاب (درصد حجمی)	۱٪	۵٪	۱۰٪
۴	اسیدیته دوغاب	۳	۵	۷
۵	سختی بالشتک پولیش (Shore-D)	۳۷	۳۵	۲۵
۶	نیروی عمودی (Kg)	۰/۷۵	۱/۵	۳/۰
۷	سرعت دورانی (PMR)	۴۰	۸۰	۱۲۰
۸	سرعت نوسانی (PMR)	۱۰	۲۰	۳۰

### ۴- طراحی آزمایشها و فرآیند

برای جمع آوری داده های تجربی مورد نیاز، از روش طراحی آزمایشها با رویکرد تاگوچی و با بهره گیری از نرم افزار

که سطح قطعه ای که با ذرات ساینده ریزتر صیقل کاری شود صافی سطح بهتری خواهد داشت [۸]. در سال ۲۰۱۳ آقای لی و همکاران طی انجام آزمایش هایی، تاثیرات عواملی مانند، اندازه ذرات ساینده، غلظت و توزیع ذرات ساینده و نرخ جریان دوغاب را در سایش سطح نمونه ای از جنس اکسید سیلیکون، به روش شیمیایی مکانیکی مورد بررسی قرار داده اند [۹]. پانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ از روش طراحی آزمایشات رویکرد تاگوچی جهت بهینه سازی پارامترهای ماشین کاری تیوپ هایی از جنس (HNT/Al/Ep) استفاده کرده است [۱۰]. در سال ۲۰۱۷ لی و همکاران، تحقیقی در رابطه با پولیش سطح ویفر سیلیکونی به روش آلتراسونیک به کمک ارتعاش انجام دادند. در این تحقیق از زغال چوب بامبو به عنوان بالشتک پولیش استفاده گردید. به کمک ارتعاش التراسونیک دوغاب ذرات ساینده الماس به سطح تماس بالشتک و ویفر سیلیکونی عبور داده شد. در نهایت آنها توانستند در مدت زمان ۲۰ دقیقه به صافی سطح  $0.017 \mu\text{m}$  دست یابند [۱۱].

در اغلب موارد، انتخاب سطوح بهینه به صورت تجربی و با استفاده از روش های مبتنی بر سعی و خطا انجام می گیرد. اما این روشها، علاوه بر هزینه بالا، با احتمال خطا همراه هستند. در سالهای اخیر راهکارهای علمی و ریاضی در زمینه مدل سازی و بهینه سازی انواع فرآیندهای تولیدی، افزایش چشمگیر داشته است. که یکی از این روشها، روش طراحی آزمایشها به شیوه تاگوچی است.

### ۲- تجهیزات و شرایط انجام آزمایشهای تجربی

قطعه کار در این پژوهش از جنس آلیاژ مس با خلوص بالا سری C10000 و با سختی ۱۰۰ برینل به قطر ۹۷mm و ضخامت ۱۵mm می باشد. برای صیقل کاری نمونهها از دستگاه صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی مدل H150 ساخت کشور آلمان استفاده شده است.

برای اندازه گیری مشخصات سطح نمونه های صیقل کاری شده از دستگاه تداخل سنج نوری که با نور لیزر هلیوم- نئون و با طول موج  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  کار می کند، استفاده شده است. در شکل ۲ نمونه ای از یک دستگاه تداخل سنج عمودی نشان داده شده است.

1- PV (Peak to Valley)

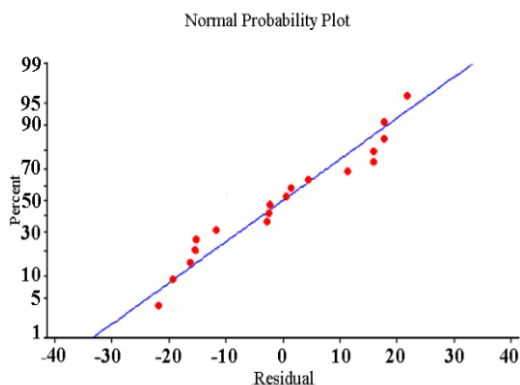
### ۵- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

در تحلیل نتایج از دو تحلیل واریانس و نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است، که در ادامه توضیح داده می‌شود.

#### ۵-۱- تحلیل واریانس<sup>۱</sup>

چون در روش تاگوچی، فقط بخشی از حالات ممکن، مورد آزمایش قرار می‌گیرد؛ به منظور حصول اطمینان از دقت نتایج آزمایش‌ها، می‌بایست از روش‌های آماری مناسب کمک گرفت. تحلیل واریانس، یک روش آماری استاندارد است که در تعیین درصد مشارکت هر یک از متغیرها بر خروجی فرآیند، کاربرد دارد [۱۲].

در شکل ۳، نمودار توزیع نرمال دقت سطح آمده است، که با توجه به این‌که نقاط برازش شده به صورت تصادفی و نزدیک به خط مایل پراکنده شده‌اند، می‌توان به نرمال بودن توزیع داده‌ها پی‌برد.



شکل (۳): نمودار توزیع نرمال.

جدول ۳ تحلیل واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد. این تحلیل براساس سطح اطمینان ۹۰٪ که در آزمایشات صنعتی متداول می‌باشد، انجام شده است. ستون سوم، درجه آزادی، ستون چهارم، مجموع مربعات، ستون پنجم، واریانس، ستون ششم، نسبت فراوانی و ستون آخر درصد مشارکت هر یک از عوامل، را نشان می‌دهد.

مقدار نسبت فراوانی بحرانی با استفاده از جدول برای پارامتر اول  $F_{0.1} = (1/2) = 8/5263$  و برای دیگر پارامترها  $F_{0.1} = (2/2) = 9/0$  می‌باشد. مقدار نسبت فراوانی همه پارامترها به غیر از پارامتر آخر بیشتر از مقدار بحرانی آن می‌باشد، که

مینی‌تب ۱۶ و کوالی‌تک ۴ استفاده شده است. تاگوچی برای حالت ترکیبی پارامترها و سطوح نشان داده شده در جدول ۱ آرایه آرتوگونال  $L=18$  را پیشنهاد می‌کند. این آرایه در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول ترتیب آزمایش‌ها و نحوه انتخاب هر پارامتر با سطوح آن را مشخص می‌کند. بنابراین، آزمایش‌ها مطابق این جدول طرح‌ریزی گردید. عنوان ستون‌های پارامتر ۱ تا پارامتر ۸، نشان دهنده پارامترهای ورودی و در ذیل آنها شماره سطح انتخاب شده برای هر پارامتر می‌باشد که مشخصه آنها در جدول ۱ آورده شده است. در ستون نتایج،  $PV_1$  عدد اندازه‌گیری شده پی‌وی در مرتبه اول هر آزمایش و  $PV_2$  عدد اندازه‌گیری شده پی‌وی در تکرار همان ردیف آزمایش می‌باشد. این مقادیر برحسب ضریبی از طول موج  $\lambda$  می‌باشد که جهت سهولت در محاسبات در عدد ثابت ۱۰۰۰ ضرب شده‌اند.

به منظور اجتناب از اثر ترتیب آزمایشات، انتخاب هر ردیف آزمایش به صورت تصادفی انجام شده است. و جهت اطمینان از صحت آنها هر آزمایش یک بار تکرار گردیده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمونه اول و نمونه دوم هر ردیف آزمایش در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول (۲): آرایه آرتوگونال مربوطه و نتایج.

آزمایش	پارامتر									نتایج ( $\lambda$ )	
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	$PV_1$		$PV_2$
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۴۴	۲۴۹
۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۱۶۶	۱۶۰
۳	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱۵۵	۱۵۵
۴	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱۵۱	۱۵۰
۵	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۱۶۴	۱۶۲
۶	۱	۲	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱۹۸	۱۹۲
۷	۱	۳	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱۷۸	۱۷۵
۸	۱	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۲۰۳	۲۰۹
۹	۱	۳	۳	۳	۱	۲	۲	۲	۲	۱۵۵	۱۶۱
۱۰	۲	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۱۷۵	۱۷۱
۱۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶۸	۱۶۳
۱۲	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱۶۲	۱۵۶
۱۳	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴۷	۱۴۰
۱۴	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۱۵۹	۱۵۵
۱۵	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۱۳۱	۱۳۳
۱۶	۲	۳	۱	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۱۸۵	۱۸۶
۱۷	۲	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴۱	۱۴۸
۱۸	۲	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۱۲۳	۱۲۹

1-Analysis of Variance (ANOVA)

پارامتر آخر یعنی سرعت نوسانی قطعه کار، در سطوح انتخاب شده، جزئی می باشد.

نشان دهنده معنادار بودن تاثیر پارامترهای مذکور در مقدار پی وی سطح می باشد. مطابق با همین استدلال میزان تاثیر

جدول (۳): تحلیل واریانس.

Percent	Pure Sum	F-Ratio	Variance	SSq	DOF	پارامترها
۲۱/۵۷۹	۷/۱۱۰	۴۷/۰۳۶	۷/۲۶۴	۷/۲۶۲	۱	۱
۸/۱۷۲	۲/۶۹۲	۹/۷۱۷	۱/۵۰۰	۳/۰۰۱	۲	۲
۱۳/۶۷۱	۴/۵۰۴	۱۵/۵۸۳	۲/۴۰۶	۴/۸۱۳	۲	۳
۱۲/۹۶۰	۴/۲۷۰	۱۴/۸۲۳	۲/۲۸۹	۴/۵۷۸	۲	۴
۷/۵۱۷	۲/۴۷۶	۹/۰۱۹	۱/۳۹۲	۲/۷۸۵	۲	۵
۱۵/۱۶۵	۴/۹۹۶	۱۷/۱۷۶	۲/۲۶۵	۵/۳۰۵	۲	۶
۸/۹۸۷	۲/۶۹۱	۱۰/۵۸۶	۱/۶۳۵	۳/۲۷۰	۲	۷
۳/۹۷۵	۱/۳۰۹	۵/۲۴۰	۰/۸۰۹	۱/۶۱۸	۲	۸
۷/۹۷۵			۰/۱۵۴	۰/۳۰۸	۲	دیگر/خطا
٪۱۰۰/۰۰۰				۳۲/۹۴۷	۱۷	مجموع

#### ۵-۲- تحلیل نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>

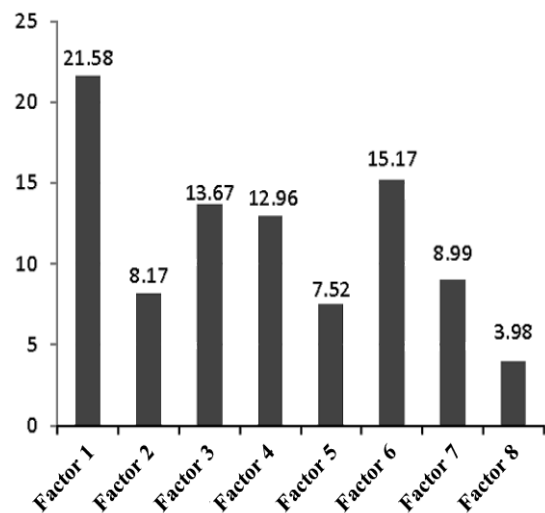
نسبت سیگنال به نویز، نشان دهنده حساسیت مشخصه مورد بررسی (دقت سطح)، به فاکتورهای ورودی فرآیند است. در آزمایش های همراه با تکرار، این تحلیل به طور ویژه توصیه می شود. با استفاده از این تحلیل می توان سطوح بهینه را تعیین نمود [۹].

در روش تاگوچی، عوامل یا متغیرهای فرآیند به دو گروه عوامل قابل کنترل و عوامل غیرقابل کنترل تقسیم می شود. عوامل قابل کنترل، همان طور که از نام آن مشخص است، عواملی هستند که کنترل آنها در حین انجام فرآیند امکان پذیر می باشد. عوامل غیرقابل کنترل عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات ناخواسته در فرآیند می شود، ولی به دلیل این که کنترل آنها مشکل است یا شناخت کافی از آنها وجود ندارد، ثابت فرض می شوند.

در این روش طراحی آزمایش ها، هر مشخصه خروجی در یکی از سه معیار زیر قرار داده می شود.

- ۱- هر چه کمتر بهتر
- ۲- هر چه به مقدار اسمی نزدیک تر بهتر
- ۳- هر چه بزرگتر بهتر

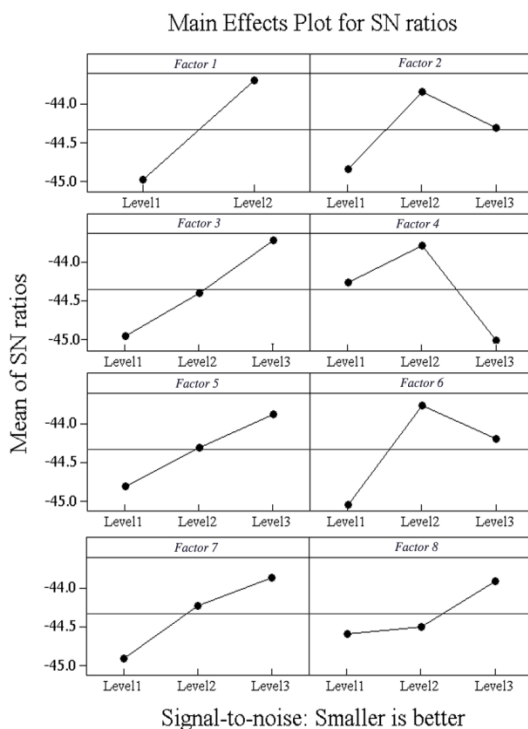
شکل ۴ نمودار میله ای سهم هر یک از عوامل ورودی بر مقدار خروجی را به صورت میله ای نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است، نوع ذرات ساینده، با بیش از ۲۱٪، بیشترین تاثیر را بر روی پارامتر خروجی دارد. سایر پارامترها به ترتیب اهمیت عبارتند از: مقدار نیروی عمودی، درصد ماده اکسیدکننده و اسیدیته دوغاب، سرعت چرخشی ابزار، درصد ذرات ساینده، سختی بالشتک صیقل کاری و در نهایت سرعت نوسانی قطعه کار.



شکل (۴): نمودار میله ای درصد تاثیر پارامترهای ورودی.

نموده و آنرا به صورت نموداری که در شکل ۵ نشان داده شده، ارایه کرده است.

همانطور که قبلا ذکر گردید، همواره بالاترین مقادیر نسبت سیگنال به نویز، مطلوب هستند. بر این اساس، می توان سطوح یا شرایط بهینه را برای هر یک از عوامل ورودی تعیین کرد. نتایج این تحلیل در راستای دستیابی به بهترین سطوح پارامترهای ورودی، در جدول ۵ نشان داده شده است.



Signal-to-noise: Smaller is better  
شکل (۵): میانگین نسبت سیگنال به نویز.

جدول (۵): جدول سطوح بهینه پارامترهای ورودی.

ردیف	پارامتر	سطح بهینه	عنوان سطح بهینه
۱	نوع ذرات ساینده	۲	کلونید سیلیکا
۲	غلظت ذرات ساینده	۲	۱۰٪ وزنی
۳	غلظت اکسید کننده	۳	۱۰٪ حجمی
۴	اسیدیته دوغاب	۲	۵
۵	سختی بالشتک صیقل کاری	۳	۲۵(Shore-D)
۶	نیروی عمودی	۲	۱/۵(Kg)
۷	سرعت چرخشی ابزار	۳	۱۲۰(RPM)
۸	سرعت نوسانی قطعه کار	۳	۳۰(RPM)

به طور کلی، در هر آزمایش، فارغ از این که خروجی آزمایش با کدام معیار ارزیابی شده باشد، همواره بالاترین نسبت سیگنال به نویز مطلوب خواهد بود. به عبارت دیگر، مقادیر بالاتر نسبت سیگنال به نویز نشان دهنده این است که اثر پارامترهای قابل کنترل، بیشتر از اثر پارامترهای غیرقابل کنترل می باشد. با توجه به این که خروجی اندازه گیری شده در این آزمایشها مقدار پی وی می باشد، بنابراین، معیار «هر چه کمتر بهتر» به کار گرفته شده است. در این حالت مقدار نسبت سیگنال به نویز با استفاده از معادله ۱ قابل محاسبه می باشد.

$$S/N_s = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \left( \sum y_i^2 \right) \quad (1)$$

در رابطه فوق n تعداد تکرار هر آزمایش و yi مقدار i امین خروجی اندازه گیری شده است. نسبت سیگنال به نویز برای هر یک از ۱۸ ردیف آزمایش انجام شده با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردیده و در جدول ۴ درج شده است.

به عنوان مثال، برای محاسبه نسبت سیگنال به نویز برای آزمایش ردیف اول با توجه به این که هر یک از آزمایشها دو مرتبه انجام شده است، بنابراین n برابر ۲ خواهد بود و خواهیم داشت:

$$S/N = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{2} (249^2 + 244^2) \right) = -47,8368$$

جدول (۴): نسبت سیگنال به نویز.

S/N	آزمایش	S/N	آزمایش
-۴۴/۷۶۱۵	۱۰	-۴۷/۸۳۶۸	۱
-۴۴/۳۷۷۰	۱۱	-۴۴/۲۴۵۲	۲
-۴۴/۰۲۹۵	۱۲	-۴۳/۸۰۶۶	۳
-۴۳/۱۳۹۶	۱۳	-۴۳/۵۵۰۸	۴
-۴۳/۹۱۸۷	۱۴	-۴۴/۲۴۳۹	۵
-۴۲/۴۱۱۷	۱۵	-۴۵/۸۰۱۷	۶
-۴۵/۳۶۶۹	۱۶	-۴۴/۹۳۵۲	۷
-۴۳/۱۹۹۹	۱۷	-۴۶/۲۷۸۳	۸
-۴۲/۰۰۹۹	۱۸	-۴۳/۹۷۴۷	۹

با توجه به این که همواره بالاترین مقدار نسبت سیگنال به نویز بهترین است، بنابراین، بهترین نتیجه حاصل از آزمایش ردیف ۱۸ می باشد.

### ۵-۳- تعیین شرایط بهینه

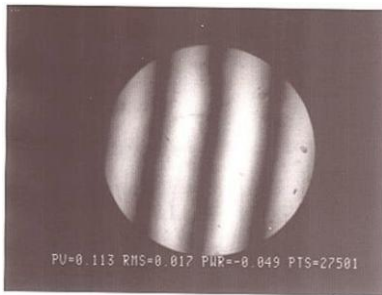
با توجه به مقادیر نسبت سیگنال به نویز هر آزمایش که در جدول ۴ ثبت شده است، نرم افزار، میانگین مقدار نسبت سیگنال به نویز هر سطح از هر پارامتر ورودی را محاسبه

### ۶- آزمون نهایی

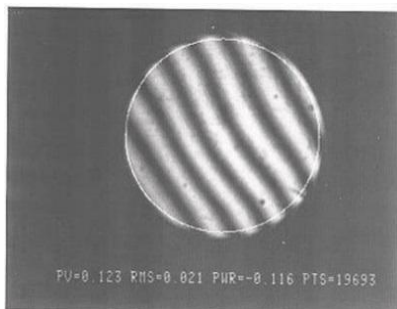
مطابق محاسبات انجام شده در شکل ۶، نرم افزار پیش بینی می کند در صورت به کارگیری سطوح بهینه، مقدار نسبت سیگنال به نویز برابر ۴۰/۰۵۱- خواهد شد. و پیرو آن مقدار پی وی سطح صیقل کاری شده به مقدار ۱۰۰/۵۸۹ کاهش خواهد یافت. این در حالی است که بهترین مقدار نسبت سیگنال به نویز در آزمایش های انجام شده مربوط به ردیف ۱۸ و برابر ۴۲/۰۰۹- بوده است. لذا مفهوم آن این است که با انتخاب سطوح بهینه، دستیابی به نتیجه ای بهتر از آزمایش ردیف ۱۸ امکان پذیر خواهد بود.

به منظور اطمینان از صحت آزمایش های انجام شده و تحلیل نتایج آنها، یک آزمون نهایی مطابق سطوح بهینه جدول ۵ تدارک و انجام گردید.

الگوی تداخلی سطح صیقل کاری شده در پایان این آزمون که در شکل ۷ نشان داده شده است، مقدار دقت سطح اندازه گیری شده را، برابر ۱۱۳ بیان می کند. این نتیجه در حالی است که این مقدار در بهترین حالت آزمایش ها (آزمایش ردیف ۱۸) برابر ۱۲۳ بوده، که الگوی تداخلی مربوط به سطح نمونه آن در شکل ۸ آورده شده است. مقدار پی وی به دست آمده از آزمون نهایی کمتر از این مقدار و نزدیک به مقدار پیش بینی شده است، این مسئله، نشانگر قابل اعتماد بودن نتایج و روش پیشنهادی، برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیمی در فرآیند صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی مس در این تحقیق می باشد.

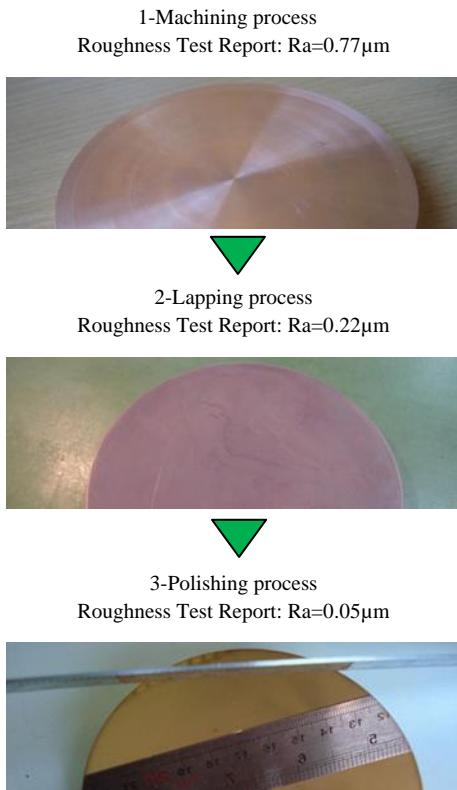


شکل (۷): الگوی تداخلی سطح در آزمون نهایی.



شکل (۸): الگوی تداخلی سطح در آزمایش ردیف ۱۸.

در شکل ۹ تصویر سطح قطعه کار و گراف تست صافی سطح آن در مراحل مختلف ساخت در آزمون نهایی، نشان داده شده است.



شکل (۹): سطح قطعه کار در مراحل مختلف تولید.

Expt File:

Data Type:  QC Type:

Estimate of expected results from S/N ratio

S/N = -10 Log (MSD) = -40.051

or MSD = 10<sup>-1</sup>[-(S/N)/10] = 10118.121094

where

$$MSD = \frac{(y_1)^2 + (y_2)^2 + \dots + (y_n)^2}{n}$$

$$= [Avg. (y_i)^2] = Y_{exp}^2$$

or Yexp = SQRT(MSD)

Expected performance in QC units (or overall evaluation criteria) is:

Yexp = 100.589 QC units

(Based on S/N = -40.051 at optimum)

شکل (۶): پیش بینی برآورد نتیجه حاصل از نسبت سیگنال به نویز.

4. Jung, S. H. "Chemical Mechanical Polishing of Copper Using Nano Particle-Based Slurries", Phd Dissertation, University of Florida, 2005.
5. Bouzid, N. D. and Herold, V. "Correlation Between Surface Quality and the Abrasive Grains Wear in Optical Glass Lapping", Tribology International, Vol. 40, pp. 498-502, 2007.
6. Raghava, V. and Kakireddy, R. "Effect of Temperature on copper Chemical Mechanical Planarization", Dissertations, University of South Florida, 2007.
7. Brink-Smeier, E., Riemer, O. and Gessenharter, A. "Finishing of Structured Surfaces by Abrasive Polishing", Precision Engineering, Vol. 30, pp. 325-336, 2011.
8. Takaya, Y., Kishida, H. and Hayashi, T. "Chemical Mechanical Polishing of Patterned Copper Wafer Surface Using Water-Soluble Fullerenol Slurry", CIRP Annals, Manufacturing Technology, Vol. 60, pp. 567-570, 2011.
9. Lee, H. S., Jeong, H. D. and Dornfeld, D. A. "Semi-Empirical Material Removal Rate Distribution Model for SiO<sub>2</sub> Chemical Mechanical Polishing (CMP) Processes", Precision Engineering, Vol. 37, No. 2, pp. 483-490, 2013.
10. Pang, J. S., Ansari, M. N. M., Zaroog, Omar S. Moaz H. Ali, Sapuan, S. M. "Taguchi Design Optimization Of Machining Parameters on the CNC End Milling Process of Halloysite Nanotube With Aluminium Reinforced Epoxy Matrix (HNT/Al/Ep) Hybrid Composite", HBRC Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 138-144, 2014.
11. Lee, Hsin-Min and Chen, Tzung-Ming "A Study of Polishing Feature of Ultrasonic-Assisted Vibration Method in Bamboo Charcoal", Advances in Materials Science and Engineering, pp. 1-7, September 2017.
12. Roy, R. "A Primer on the Taguchi Method", 1th Edition, (Translated by D. Moradkhani, F. Taghavi), Zanjan University Publication Center, 2007. (in Persian)

## ۷- نتیجه گیری

از آزمایش‌های انجام شده و تحلیل نتایج آنها، موارد زیر نتیجه‌گیری می‌گردد.

۱- استفاده از کلونید ذرات ساینده سیلیکا نسبت به پودر ذرات ساینده آلومینا در صیقل کاری مس، سبب دقت سطح بهتری می‌شود.

۲- با افزایش غلظت ذرات ساینده در دوغاب نرخ باربرداری از سطح بیشتر می‌گردد، و در عین حال، بر روی سطح، ایجاد خش نموده و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد.

۳- با افزایش غلظت اکسیدکننده در دوغاب تا ۱۰٪ حجمی، دقت سطح افزایش می‌یابد.

۴- دوغاب اسیدی ضعیف برای صیقل کاری شیمیایی- مکانیکی مس نتیجه بهتری نسبت به دوغاب اسیدی قوی دارد.

۵- با کاهش سختی بالشتک صیقل کاری، دقت سطح و کیفیت سطح مس افزایش می‌یابد. بالشتک صیقل کاری با سختی زیادتر، علاوه بر افزایش نرخ باربرداری، سبب ایجاد خش بر روی سطح قطعه کار شده و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد.

۶- با افزایش نیروی عمودی، نرخ باربرداری از سطح بیشتر می‌گردد، و در عین حال بر روی سطح، ایجاد خش نموده و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد.

۷- با افزایش سرعت چرخشی، علاوه بر افزایش نرخ باربرداری، دقت سطح نیز افزایش می‌یابد.

۸- افزایش بیشتر سرعت نوسانی، سبب کاهش دقت سطح و کیفیت سطح می‌گردد. زیرا سبب عدم توزیع یکنواخت دوغاب به برخی نقاط سطح می‌شود؛ و همچنین سبب عدم تماس کامل سطح ابزار با سطح قطعه کار (در اثر ارتعاش) گردیده و در نتیجه آن، باربردی غیریکنواخت خواهد بود.

## ۸- منابع

1. Marinescu, L. D., Shero, E. U., and Doi, K. "Hand Book of Lapping and Polishing", CRC Press, 2007.
2. Tam, H. Y., Cheng, H. B., and Wang, Y. W. "Removal rate and Surface Roughness in Lapping and Polishing of Optical Components", Journal of Material Processing Technology, Vol. 192-193, pp. 276-280, 2007.
3. Sivanandini, M., Dhama, S. and Pabla, B. "Chemical Mechanical Polishing by Colloidal Silica Slurry", International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 3, No. 3, pp. 1337-1345, 2013.