

## بهینه سازی پارامترهای پاشش حرارتی HVOF، برای بهبود مقاومت به اکسیداسیون پوشش MCrAlY توسط روش سطح پاسخ

علی قربانیان<sup>۱</sup>، محمد حاتمی<sup>۲</sup>، مصطفی طهری<sup>۳\*</sup>

۱- مربی، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین،

خراسان شمالی، ایران

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، خراسان

شمالی، ایران

۳- مربی، گروه مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین،

خراسان شمالی، ایران

\*m.tahari@esfarayen.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۰۹)

### چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر پارامترهای مختلف فرایند پوشش دهی بر خواص نهایی پوشش های پاشش حرارتی بدست آمده از روش HVOF پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از فرایند پاسخ سطح، برای چهار پارامتر تاثیرگذار فرایند HVOF که شامل نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش هستند، پنج سطح مختلف در نظر گرفته شد و پاسخ های حداقل تخلخل و حداقل ضخامت لایه اکسیدی به عنوان عوامل بهینه کننده، انتخاب گردیدند. به منظور بررسی ریزساختار پوشش ها، ضخامت لایه اکسیدی و تخلخل سنجی از میکروسکوپ الکترونی و روش آنالیز تصویری استفاده شد. آزمون اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت ۵۰ ساعت بر روی نمونه های پوشش داده شده انجام شد. نتایج نشان داد که پارامترهای نرخ تزریق اکسیژن و نرخ تزریق پودر، نرخ تزریق سوخت و نرخ تزریق پودر و همچنین نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش به صورت دو به دو، دارای اثر متقابل بر روی یکدیگر در میزان ضخامت لایه اکسیدی می باشند. همچنین برخلاف دیگر عوامل که تاثیر متقابل زیادی بر روی تخلخل پوشش ها نداشتند، دو عامل نرخ تزریق اکسیژن و نرخ پودر و همچنین نرخ تزریق سوخت و نرخ تزریق پودر تقابل بسیار اندکی بر میزان تخلخل دارند. بررسی نمونه پوشش دهی شده با پارامترهای بهینه شده نشان داد که میزان تخلخل پوشش در حدود ۰/۵٪ و ضخامت لایه اکسیدی در حدود ۵/۳ میکرومتر می باشد.

### کلمات کلیدی:

MCrAlY، اکسیداسیون دمای بالا، پاشش حرارتی، روش سطح پاسخ

### ۱- مقدمه

پوشش دهی قطعات داغ توربین ها استفاده می شود. یکی از اجزای اصلی پوشش های سد حرارتی، لایه میانی MCrAlY

امروزه برای افزایش دمای کاری و راندمان حرارتی توربین های گازی از پوشش های سد حرارتی به طور گسترده ای برای

پوشش WC-10Co-4Cr از متدولوژی سطح پاسخ و همچنین آنالیز واریانس استفاده نمودند [۹]. برخی دیگر از پژوهشگران از یک طرح تاگوچی L9 به منظور بررسی تاثیر عوامل نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش بروی سختی پوشش WC-CrC-Ni با استفاده از روش HVOF استفاده نمودند [۱۰]. در مطالعات دیگری محققین به منظور به دست آوردن بیشترین میزان سختی و همچنین مقاومت در برابر سایش در پوشش WC-Co-Cr با توجه به عوامل نرخ تزریق اکسیژن و فاصله پاشش از یک طرح تاگوچی استفاده کردند [۱۱]. لی وهمکاران به منظور شناسایی پارامترهای موثر در یک پوشش CrC/20NiCr مانند سرعت ذرات، دما ذرات، تخلخل و استحکام کششی از طراحی آزمایشات استفاده نمودند [۱۲]. تحقیقات توسط چندین محقق نشان داده است که روش‌های طراحی آزمایشات برای بهینه‌سازی عوامل موثر در پوشش‌دهی به روش اسپری بسیار موثرتر از روش‌های سنتی می‌باشد [۱۳-۱۵].

با توجه به پژوهش‌های انجام شده عوامل موثر در پوشش‌دهی توسط فرایند پاشش حرارتی HVOF را می‌توان نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش دانست که نسبت به بقیه عوامل از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. از آنجا که یکی از مهمترین خصوصیات که برای پوشش‌های MCrAlY در نظر گرفته می‌شود تخلخل و مقاومت به اکسیداسیون آنها می‌باشد، در این تحقیق به بررسی پارامترهای تاثیرگذار پاشش حرارتی HVOF بر روی میزان تخلخل و ضخامت لایه اکسیدی ایجاد شده بر روی سطح در طی فرایند اکسیداسیون پرداخته شده است و در ادامه با استفاده از تکنیک‌های آماری و ریاضی یک سطح بهینه برای هر یک از عوامل به منظور بهینه کردن همزمان میزان تخلخل و ضخامت لایه اکسیدی معرفی شده است. در مطالعات انجام شده در این زمینه صرفاً با استفاده از یک مدل طراحی آزمایشات یکی از سطوحی که مورد آزمایش قرار گرفته است به عنوان سطح مطلوب (نه بهینه) انتخاب شده است، اما در پژوهش ارائه شده از

است [۱]. امروزه مهمترین روشی که برای پوشش‌دهی MCrAlY استفاده می‌شود روش HVOF<sup>۱</sup> است. در فرایند HVOF خواص پوشش به شدت به پارامترهای پاشش بستگی دارد [۲]. طراحی شرایط مناسب پوشش‌دهی با روش HVOF نیازمند درک کلی از پارامترها و تکنیک‌های این روش و همچنین روابط بین آنها است. بهینه‌سازی یک پوشش برای یک کاربرد خاص منوط به ترکیب و بهینه کردن تمام خواص مناسب برای این پوشش است. به منظور دستیابی به یک پوشش کارآمد دستیابی به فرایندهای مطلوب الزامی است. یکی از روش‌های مشخص کردن پارامترهای موثر، استفاده از تکنیک‌های آماری می‌باشد که می‌توان برای این منظور از ابزارهایی مانند طراحی آزمایشات استفاده نمود [۳-۴].

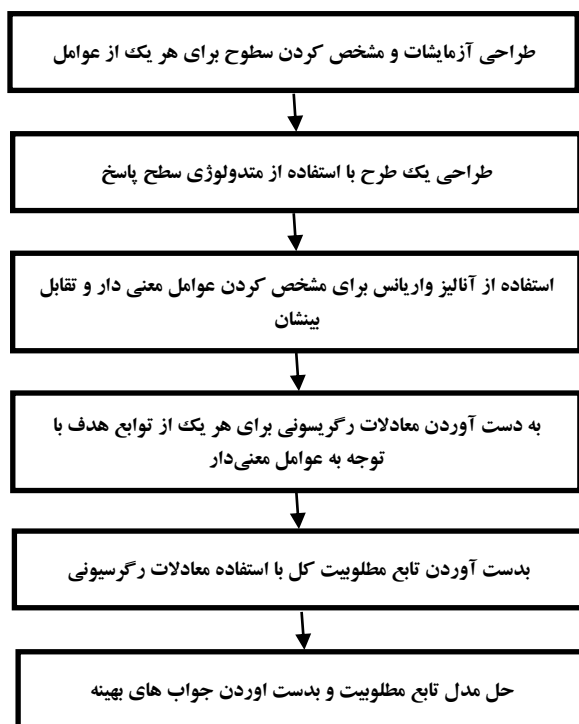
در روش‌های مرسوم اثرات پارامترهای مهم پاشش حرارتی به وسیله ثابت نگه داشتن سایر پارامترها در یک سطح ثابت مشخص شده و بدست آوردن بهترین سطح برای پارامتر مذکور انجام می‌گردد که بزرگترین نقطه ضعف آن بررسی نکردن و در واقع در نظر نگرفتن تقابل بین پارامترهای مختلف در یک آزمایش می‌باشد. همچنین در این روش‌ها از تعداد آزمایش زیادی به منظور رسیدن به جواب بهینه استفاده می‌شود. در حالی که استفاده از روش‌های طراحی آزمایشات برای عواملی مانند نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش علاوه بر بررسی مستقیم هر یک از این عوامل، تقابل بین عوامل را نیز بررسی می‌نماید [۵-۶]. برخی از محققین به بررسی سودمندی طراحی آزمایشات در پاشش حرارتی، استفاده از طرح‌های دو سطحی و همچنین متدولوژی سطح پاسخ پرداختند [۷].

برای بدست آوردن مقدار بهینه مقاومت در برابر سایش، از یک طرح تاگوچی با چهار عامل نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش استفاده شده است که البته زاویه پاشش به عنوان یک عامل ثابت و به اندازه ۹۰ درجه برای همه آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است [۸]. محققین دیگری برای بهینه‌سازی حداقل تخلخل و حداکثر سختی فرایند

روش سطح پاسخ پوشش دهی شدند. بررسی میکروسکوپی نمونه های پوشش دهی شده و آزمون تخلخل سنجی پوشش ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل SEM Philips MI30 انجام گرفت. آزمون تخلخل سنجی پوشش ها با استفاده از استاندارد ASTM E2109 انجام شد. به منظور بررسی رفتار اکسیداسیون پوشش ها، نمونه ها به مدت ۵۰ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر محیط تحت شرایط اکسید کننده قرار گرفتند. پس از اتمام آزمون اکسیداسیون، نمونه ها برش خورده و پس از پولیش، ضخامت لایه اکسیدی به دست آمده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی اندازه گیری شد.

## ۲-۲-۲- متدولوژی مورد استفاده

در این تحقیق به منظور به دست آوردن جواب بهینه برای هر یک از متغیرهای پاسخ از یک متدولوژی استفاده شده است که شکل شماره (۲) این متدولوژی را نمایش می دهد.



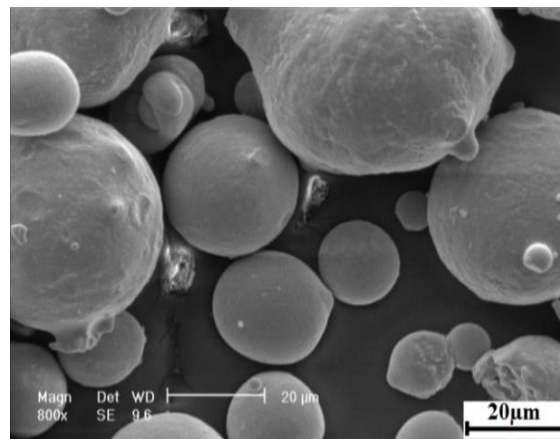
شکل (۲): متدولوژی مورد استفاده به منظور به دست آوردن جواب بهینه برای هر یک از متغیرهای پاسخ

طراحی آزمایشات صرفاً در جهت بدست آوردن معادلات رگرسیونی استفاده و سپس با استفاده از رویکرد بهینه سازی تابع مطلوبیت نقطه بهینه (نه مطلوب) برای هر یک از عوامل به منظور بهینه کردن هر یک از توابع هدف بدست آورده شده است در انتها به منظور بررسی دقت مدل، مقادیر به دست آمده از تابع مطلوبیت را با آزمایشات واقعی مقایسه و نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

### ۲-۱- فرایند پوشش دهی

به منظور فرایند پوشش دهی از پودر CoNiCrAlY با شماره ۶۰۹۰/۱، ساخت شرکت GTV با خلوص بالاتر از ۹۹٫۵ به عنوان ماده اولیه استفاده شد. پودر مورد نظر دارای مورفولوژی کاملاً کروی و با اندازه توزیع ۱۵-۴۵ میکرومتر می باشد که برای فرایند پاشش حرارتی HVOF مورفولوژی و توزیع ذره بسیار مناسبی است. شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی پودر مورد نظر را نشان می دهد. قبل از فرایند پوشش دهی نمونه ها توسط ماسه سیلیسی، ماسه پاشی شده و به منظور چربی زدایی با استون شستشو داده شدند.



شکل (۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر اولیه

پوشش های مورد نظر با استفاده از دستگاه HVOF ساخت شرکت متالیزیشن مدل Met-Jet III بر سطح زیرلایه اینکونل ۶۱۷ با استفاده از پارامترهای در نظر گرفته شده توسط

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- طراحی آزمایشات

جدول شماره (۲) نشان دهنده علائم اختصاری به کار رفته برای دو تابع هدف شامل درصد تخلخل و همچنین ضخامت لایه اکسیدی می باشد. همچنین چهار فاکتور نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش نیز در ادامه نمایش داده شده است. به منظور انجام آزمایشات از یک طرح ۴ فاکتوری با ۵ سطح مختلف (مطابق جدول ۳) برای هر کدام از

فاکتورها استفاده شده است که کلا شامل ۳۱ آزمایش می باشد که از این تعداد ۷ آزمایش در نقطه مرکزی انجام می شود. ۱۶ آزمایش شامل یک طرح فول فاکتوریل می باشد که با توجه به تعداد ۴ فاکتور تعداد آنها ۱۶ عدد می باشد. جدول شماره ۴ طرح استفاده شده برای انجام آزمایشات را نمایش می دهد.

جدول (۲): علام اختصاری مورد استفاده در طراحی آزمایش

PO	تخلخل
OT	ضخامت لایه اکسیدی
O	نرخ اکسیژن
F	نرخ سوخت
P	نرخ پودر
S	فاصله پاشش

جدول (۳): سطوح مختلف پارامترهای مورد استفاده

پارامتر مورد بررسی	نرخ تزریق اکسیژن (milt/min)	نرخ تزریق سوخت (milt/min)	نرخ تزریق پودر (gr/min)	فاصله پاشش (cm)
-۲	۸۰۰	۲۲۰	۲۶	۳۰
-۱	۸۲۵	۲۳۵	۳۳	۳۵
۰	۸۵۰	۲۵۰	۴۰	۴۰
۱	۸۷۵	۲۶۵	۴۷	۴۵
۲	۹۰۰	۲۸۰	۵۴	۵۰

جدول (۴): نتایج حاصل از انجام آزمایشات و طرح استفاده شده

شماره آزمایش	نرخ تزریق اکسیژن (milt/min)	نرخ تزریق سوخت (milt/min)	نرخ تزریق پودر (gr/min)	فاصله پاشش (cm)	تخلخل /%	ضخامت لایه اکسیدی ( $\mu\text{m}$ )
1	-1	-1	-1	-1	1.3	13.3
2	1	-1	-1	-1	1.2	15.6
3	-1	1	-1	-1	1.5	20.2
4	1	1	-1	-1	1.3	20.9
5	-1	-1	1	-1	2.2	20.0
6	1	-1	1	-1	1.4	12.2
7	-1	1	1	-1	1.5	13.3
8	1	1	1	-1	0.9	11.3
9	-1	-1	-1	1	2.2	17.9
10	1	-1	-1	1	1.5	17.3
11	-1	1	-1	1	1.6	18.6
12	1	1	-1	1	1.7	17.3
13	-1	-1	1	1	3.1	31.9
14	1	-1	1	1	2.5	25.4
15	-1	1	1	1	2.6	22.1
16	1	1	1	1	1.1	12.4
17	-2	0	0	0	1.2	11.2
18	2	0	0	0	2.3	22.9
19	0	-2	0	0	1.9	24.3
20	0	2	0	0	1.1	20.2
21	0	0	-2	0	1.0	7.6
22	0	0	2	0	1.3	16.1
23	0	0	0	-2	1.3	15.4
24	0	0	0	2	1.4	15.1
25	0	0	0	0	0.5	6.2
26	0	0	0	0	0.8	6.3
27	0	0	0	0	0.8	11.3
28	0	0	0	0	0.3	3.3
29	0	0	0	0	0.6	5.6
30	0	0	0	0	0.5	3.1
31	0	0	0	0	0.5	7.6

مشخص شده است. همچنین جدول شماره (۶) نتایج حاصل از تحلیل واریانس برای ضخامت لایه اکسیدی بر اساس ۴ عامل را نشان می‌دهد.

### ۳-۲- متدولوژی سطح پاسخ

متدولوژی سطح پاسخ یک شاخه مهم از طراحی آزمایشات می‌باشد که به منظور طراحی فرایندهای جدید و بهینه سازی آنها استفاده می‌شود [۱۶]. در واقع  $RSM^2$  با استفاده از تکنیک‌های آماری و ریاضی برای مدل‌سازی و آنالیز مسئله می‌باشد [۱۷]. طبق گفته‌های هیل، متدولوژی سطح پاسخ در سال ۱۹۵۱ معرفی شده است [۱۸]. جدول شماره (۵) نتایج حاصل از تحلیل واریانس برای تخلخل بر اساس ۴ عامل نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش را نمایش می‌دهد. عوامل موثر در میزان تخلخل در این جدول به خوبی

جدول (۵): نتایج تحلیل واریانس در مورد تخلخل

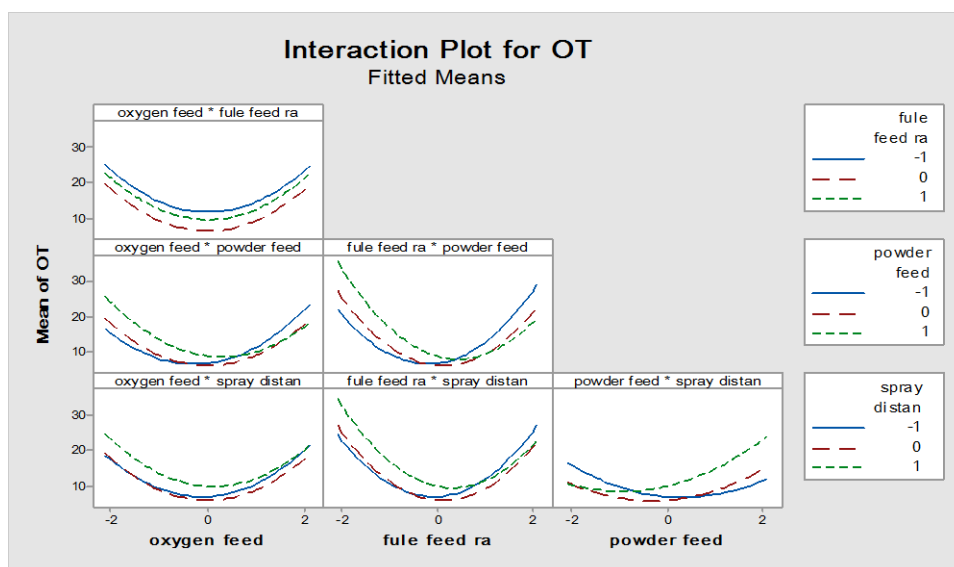
تخلخل			
Term	Coef	P-value	significant
Constant	0.571	0.004	بله
o	-0.0917	0.326	خیر
f	-0.2000	0.042	بله
p	0.1500	0.117	خیر
s	0.2167	0.029	بله
o*o	0.3426	0.001	بله
f*f	0.2801	0.004	بله
p*p	0.1926	0.034	بله
s*s	0.2426	0.010	بله
o*f	0.000	1.000	خیر
o*p	-0.162	0.162	خیر
o*s	-0.063	0.580	خیر
f*p	-0.187	0.110	خیر
f*s	-0.088	0.441	خیر
p*s	0.100	0.380	خیر

جدول (۶): نتایج حاصل از تحلیل واریانس در مورد ضخامت لایه اکسیدی

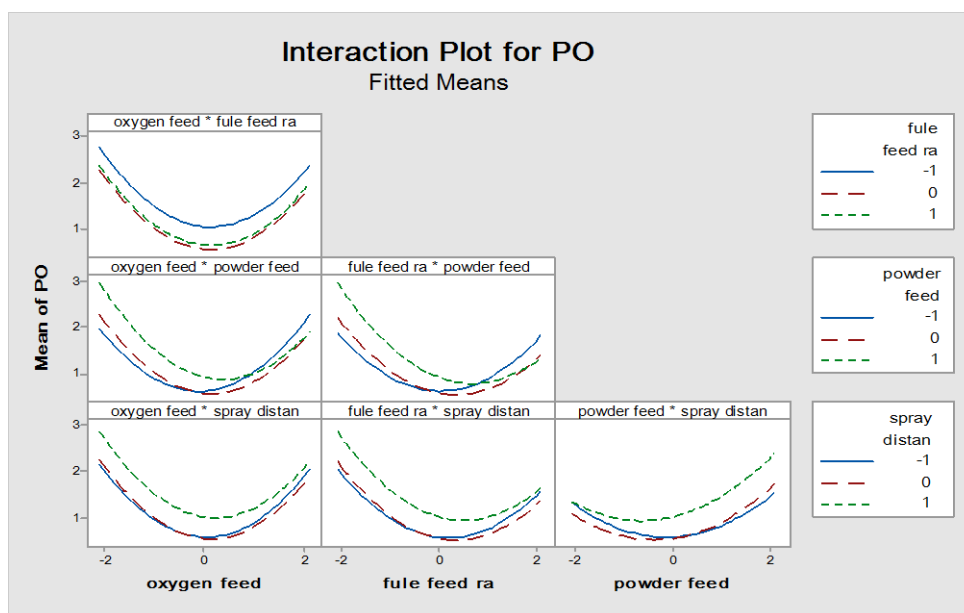
ضخامت لایه اکسیدی			
Term	Coef	P-value	significant
Constant	6.20	0.000	بله
o	-0.063	0.935	خیر
f	-1.071	0.178	خیر
p	1.021	0.198	خیر
s	1.479	0.069	خیر
o*o	2.964	0.001	بله
f*f	4.264	0.000	بله
p*p	1.664	0.030	بله
s*s	2.514	0.002	بله
o*f	0.019	0.984	خیر
o*p	-1.694	0.088	خیر
o*s	-0.706	0.459	خیر
f*p	-2.706	0.010	بله
f*s	-1.669	0.092	خیر
p*s	2.119	0.037	بله

می دهند که این موارد به خوبی از جدول شماره (۳) نیز قابل مشاهده است. همان گونه که از شکل (۳) مشخص است، عوامل نرخ تزریق اکسیژن و نرخ تزریق پودر، نرخ تزریق سوخت و نرخ تزریق پودر و همچنین نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش به صورت دو به دو، دارای اثر متقابل بر روی یکدیگر در میزان ضخامت لایه اکسیدی می باشند و دیگر عوامل تاثیری بر روی یکدیگر ندارند و به صورت مستقیم و یا درجه دو روی ضخامت لایه اکسیدی تاثیر می گذارند.

در جداول (۵) و (۶)، تاثیر پارامترهای نرخ تزریق اکسیژن، نرخ تزریق سوخت، نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش به صورت مجزا و دو به دو مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۳) تاثیر عوامل مختلف روی ضخامت لایه اکسیدی را نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است عوامل مختلف در حالت پایین ترین و بیشترین مقدار خود تاثیر یکسانی روی ضخامت لایه اکسیدی می گذارند و در واقع تاثیر خود را به صورت ضریب درجه دو روی ضخامت لایه اکسیدی نشان



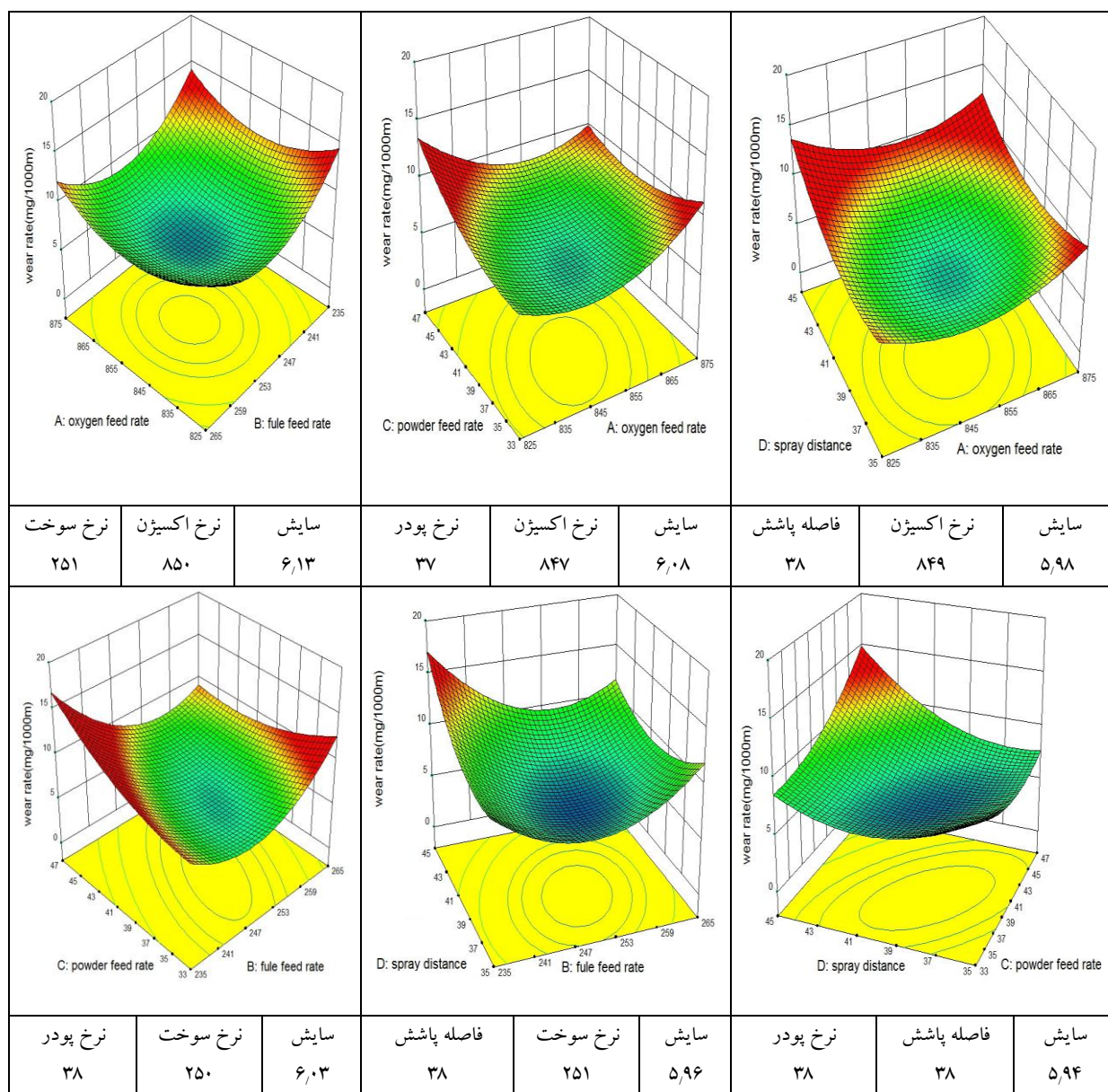
شکل (۳): تاثیر مستقیم و همچنین تقابلی عوامل مختلف را روی ضخامت لایه اکسیدی



شکل (۴): تاثیر مستقیم و همچنین تقابلی عوامل مختلف را روی میزان تخلخل

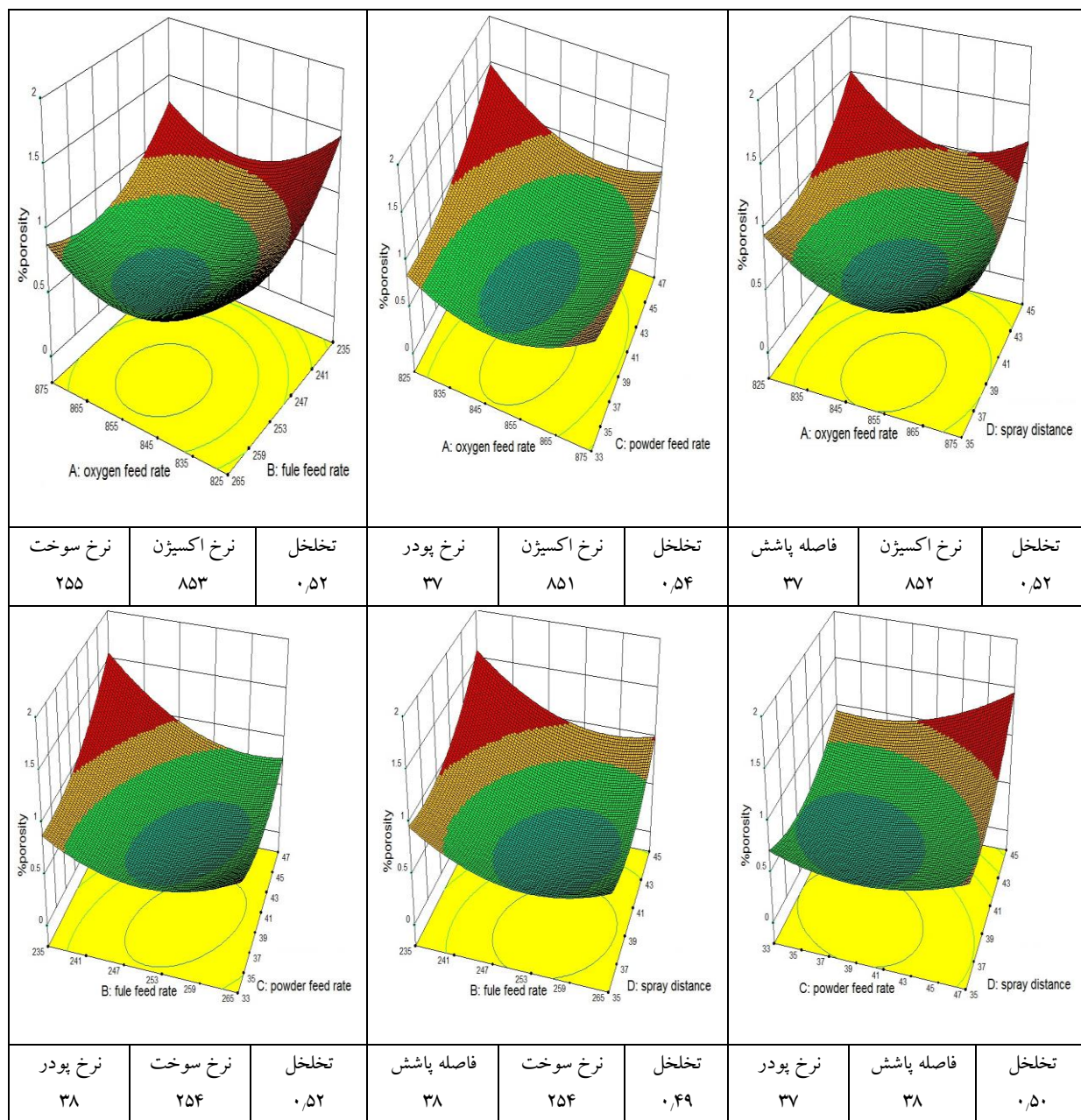
می گذارند. مورگان و همکاران نیز در تحقیقی که بر روی بهینه سازی پوشش WC-10Co-4Cr با استفاده از روش RSM انجام دادند، به نتایج مشابهی دست یافتند [۷].  
 برای تحلیل ضربدری عوامل بروی درصد تخلخل دو عامل از چهار عامل به صورت ثابت نگه داشته (حد متوسط) و برای دو عامل دیگر هر یک از توابع هدف بررسی شده است شکل های شماره (۵) و (۶) به تفکیک این موارد را نمایش می دهد.

شکل شماره (۴) تاثیر مستقیم و همچنین تقابل عوامل مختلف را روی درصد تخلخل را نمایش می دهد همان گونه که از تصویر مشخص است به غیر از دو عامل نرخ تزریق اکسیژن و نرخ پودر و همچنین نرخ تزریق سوخت و نرخ تزریق پودر که تقابل بسیار اندکی روی یکدیگر دارند که البته در سطح ۹۵٪ قابل چشم پوشی هستند بقیه عوامل تاثیر متقابلی روی یکدیگر ندارند همچنین مانند ضخامت لایه اکسیدی در اینجا نیز اکثر عوامل به غیر از نرخ سوخت با تابع درجه دو روی درصد تخلخل تاثیر



شکل (۵): تاثیر عوامل ضربدری روی نرخ سایش در فضای سه بعدی





شکل (۶): تاثیر عوامل ضربدری روی درصد تخلخل در فضای سه بعدی

### ۳-۳- معادلات رگرسیونی

از رابطه شماره (۱) و همچنین جدول شماره (۲) و (۳) که عوامل موثر بروی هر یک از توابع هدف را نمایش می‌دهد معادلات رگرسیون برای درصد تخلخل و ضخامت لایه اکسیدی نوشته شده که روابط شماره (۳) و (۴) آنها را نمایش می‌دهد.

یک روش بر اساس مدل رگرسیون برای پیش بینی هر یک از توابع هدف مورد استفاده قرار گرفته است، مدل رگرسیونی مورد استفاده در این طرح از نوع کامل شامل درجه دو، درجه یک و تقابل بین آنها می‌باشد [۱۹]. رابطه (۱) مدلی کلی برای رگرسیون درجه دو شامل ۴ عامل را نمایش می‌دهد. با استفاده

$$D = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, i < j}^4 \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

$$PO = 0.571 - 0.2 * f + 0.22s + 0.34o^2 + 0.28f^2 + 0.19p^2 + 0.24s^2 \quad (2)$$

$$OT = 6.2 + 2.96o^2 + 4.26f^2 + 1.66p^2 + 2.51s^2 - 2.7f * p + 2.11p * s \quad (3)$$

پایین را برای هر یک از توابع هدف نمایش می‌دهد. مقدار حدود بالا و پایین با استفاده از نرم افزار MINITAB و با توجه به نتایج طراحی آزمایشات مشخص شده است.

جدول (۷): حدود بالا و پایین برای تابع مطلوبیت

	PO	OT
U <sub>i</sub>	۳٫۱	۳۱٫۹
L <sub>i</sub>	۰٫۳	۳٫۱

با توجه به جدول شماره (۷) و همچنین معادلات رگرسیونی که بدست آمده است می‌توان تابع مطلوبیت برای هر یک از توابع هدف و همچنین تابع مطلوبیت کل را نوشت که جدول شماره (۸) آنها را نمایش می‌دهد. با توجه به رابطه تابع مطلوبیت و همچنین تابع مطلوبیت هر یک از توابع می‌توان تابع مطلوبیت کل را تشکیل داد که رابطه شماره (۵) آن را نمایش می‌دهد. حال می‌توان با ماکزیمم کردن تابع مطلوبیت کل به دست آمده توابع هدف میزان تخلخل و سطح اکسید را به طور همزمان مینیمم کرد که نتایج بدست آمده از حل تابع مطلوبیت در جدول شماره (۹) نشان داده شده است.

### ۳-۴- تابع مطلوبیت

یکی از مشهورترین روش‌های برخورد با مسائل چند هدفه رویکرد تابع مطلوبیت است. این رویکرد اولین بار توسط هرینگتن<sup>۱</sup> در ۱۹۶۵ ارائه شد [۲۰]. این روش به صورت سیستماتیک مقدار هدف تخمین زده شده  $Y^*(X)$  را به یک مقدار بی واحد،  $d_i(x)$  به نام مطلوبیت تبدیل می‌نماید که در دامنه [۰،۱] تغییر می‌کند. به طوری که یک مقدار نزدیک‌تر به مقدار بهینه، از مطلوبیت بیشتری برخوردار است. به منظور جمع توابع مطلوبیت انفرادی، هرینگتن تابع مطلوبیت کل (D) را با میانگین هندسی گرفتن از  $d_i(x)$  به صورت رابطه شماره (۴) تعریف می‌شود.

$$D = (d_1(x) \times d_2(x) \times \dots \times d_k(x))^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

در این پژوهش نیز از همین رویکرد برای بدست آوردن مطلوبیت کل برای هر یک از توابع هدف استفاده شده است که برای توابع هدف با هدف ماکزیمم سازی می‌توان نوشت:

$$d_i(y_i) = \frac{y_i - L_i}{U_i - L_i}$$

و برای توابع هدف با هدف مینیمم سازی داریم:

$$d_i(y_i) = \frac{U_i - y_i}{U_i - L_i}$$

که  $U_i$  و  $L_i$  به ترتیب کران بالا و پایین تابع هدف است. با توجه به مینیمم سازی توابع هدف از رابطه دو برای بدست آوردن  $d_i$  استفاده شده است که جدول شماره (۷) حدود بالا و

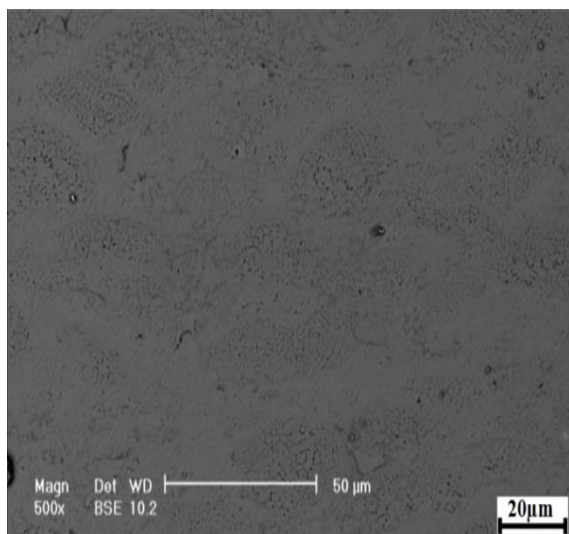
جدول (۸): توابع مطلوبیت برای تخلخل و ضخامت لایه اکسیدی

$d(PO)$	$\frac{3.1 - (0.571 - 0.2 * f + 0.22s + 0.34o^2 + 0.28f^2 + 0.19p^2 + 0.24s^2)}{3.1 - 0.3}$
$d(OT)$	$\frac{31.9 - (6.2 + 2.96o^2 + 4.26f^2 + 1.66p^2 + 2.51s^2)}{31.9 - 3.1}$

$$D = \left[ \left( \frac{3.1 - (0.571 - 0.2 * f + 0.22s + 0.34o^2 + 0.28f^2 + 0.19p^2 + 0.24s^2)}{3.1 - 0.3} \right) \cdot \left( \frac{31.9 - (6.2 + 2.96o^2 + 4.26f^2 + 1.66p^2 + 2.51s^2)}{31.9 - 3.1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

جدول (۹): مقادیر بهینه به دست آمده توسط روش سطح پاسخ برای پارامترهای پوشش دهی

	مطلوبیت کل	درصد تخلخل	ضخامت لایه اکسیدی	نرخ اکسیژن	نرخ سوخت	نرخ پودر	فاصله پاشش
مقدار بهینه	۰٫۹۱۳۵	۰٫۵۰۳	۵٫۹۸۷۴	۸۵۰	۲۵۱٫۵۱	۳۹٫۰۱	۳۸٫۴۸
مقدار واقعی	-	۰٫۵۶	۵٫۲	۸۵۰	۲۵۱	۳۹	۳۸٫۵
میزان اختلاف	-	۰٫۰۶	۰٫۷۸۷				



شکل (۷): سطح مقطع پوشش بدست آمده با استفاده از پارامترهای پاشش حرارتی بهینه شده

جدول (۱۰): میزان تخلخل و ضخامت لایه اکسیدی در پوشش بدست آمده با پارامترهای بهینه

	ضخامت لایه اکسیدی (μm)	% تخلخل
پوشش بهینه	۵٫۲	۰٫۵۶

به منظور بررسی پارامترهای بهینه شده، با استفاده از پارامترهای ذکر شده فرایند پوشش دهی انجام شد. شکل (۷) تصویر سطح مقطع پوشش بدست آمده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پوشش بدست آمده عاری از تخلخل می باشد که نتایج به دست آمده از آزمون تخلخل سنجی که در جدول (۱۰) آورده شده است، این امر را تایید می کند. همچنین جدول (۱۰) نتایج آزمون اکسیداسیون را برای پوشش بهینه شده نشان می دهد که تا حدود زیادی با نتایج بدست آمده از روش سطح پاسخ در تطابق است. جدول (۹) مقادیر بدست آمده از آزمون واقعی، مقادیر بدست آمده از معادلات رگرسیونی و درصد اختلاف این دو را را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود درصد خطا بسیار پایین می باشد. در پژوهشی مشابه که با استفاده از روش RSM بهینه سازی پوشش WC-Cr-Co انجام شده است، میانگین میزان درصد خطا در حدود ۷٪ می باشد که به نتایج بدست آمده در این پژوهش نزدیک می باشد [۲۱].

Vol. 151, pp. 367–371, 2009.

- [6] T. Troczynski & M. Plamondon, "Response Surface Methodology for Optimization of Plasma Spraying", *J. Therm. Spray Technol*, Vol. 1, pp. 293–300, 1992.
- [7] C. Pierlot, L. Pawlowski, M. Bigan & P. Chagnon, "Design of Experiments in Thermal Spraying: A Review", *Surf. Coat. Technol*, Vol. 202, pp. 4483–4490, 2008.
- [8] S. Praveen, J. Sarangan & S. Suresh, "Optimization and erosion wear response of NiCrSiB/WC-Co HVOF coating using Taguchi method", *Ceramics International*, Vol. 42, pp. 1094-1104, 2016.
- [9] K. Murugan, A. Ragupathy, V. Balasubramanian & K. Sridhar, "Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings", *Surf. Coat. Technol*, Vol. 247, pp. 90-102, 2014.
- [10] W. Fang, T. Y. Cho, J. H. Yoon, K. O. Song, S. K. Hur, S. J. Youn & H. G. Chun, "Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC-CrC-Ni coating", *J. Mater. Proces. Technol*, Vol. 209, pp. 3561-3567, 2009.
- [11] S. Hong, Y. Wu, B. Wang, Y. Zheng, W. Gao & G. Li, "High-velocity oxygen-fuel spray parameter optimization of nanostructured WC-10Co-4Cr coatings and sliding wear behavior of the optimized coating", *Mater. Des*, Vol. 55, pp. 286–291, 2014.
- [12] U. Wei-Cheng Lih, S. H. Yang, C. Y. Su, S. C. Huang, I. C. Hsu & M. S. Leu, "Effects of process parameters on molten particle speed and surface temperature and the properties of HVOF CrC/NiCr coatings", *Surf. Coat. Technol*, Vol. 133, pp. 54–60, 2000.
- [13] H. Xu, Y. Bao, D. T. Gawne & T. Zhang, "Process control for thermal-spray deposition of thermoset coatings using computer simulation", *Progress. Organic Coatings*, Vol. 101, pp. 407-415, 2016.
- [14] C. M. Lin, S. H. Yen & C. Y. Su, "Measurement and optimization of atmospheric plasmasprayed CoMoCrSi coatings parameters on Ti-6Al-4V substrates affecting microstructural and properties

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- نتایج حاصل از آنالیز واریانس نشان می دهد که تقریباً بهترین سطح برای هر یک از عوامل در نقطه مرکزی سطوح می باشد که جدول شماره (۹) نشان دهنده کامل این مطلب می باشد
- ۲- در مورد ضخامت لایه اکسیدی عوامل مختلف در سطوح مختلف روی نتایج بدست آمده تاثیر گذار می باشند. این امر نشان می دهد که عوامل دارای تاثیر متقابل بر روی یکدیگر می باشند، اما نتایج حاصل از تحلیل واریانس در مورد تداخل نشان دهنده آن است که هر یک از این عوامل تقریباً به صورت مستقل بروی تداخل تاثیر می گذارند.
- ۳- میزان تداخل پوشش بهینه شده در حدود ۰/۵٪ و ضخامت لایه اکسیدی ۵/۲ میکرومتر به دست آمد که برای پوشش MCrAlY که با روش پاشش حرارتی HVOF به دست آمده است، خصوصیات بسیار مناسبی می باشد.

#### ۵- مراجع

- [۱] س. سلطانی، ر. ابراهیمی کهریزسنگی و ف. نعیمی، "بررسی رفتار سینتیکی اکسیداسیون ایزوترم دمای بالای پوشش های MCrAlY اعمال شده به روش HVOF"، فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۶۷-۸۰، ۱۳۹۵.
- [۲] س. شریف حسن، ض. والقی، ح. حسینی و ک. جعفرزاده، "اثر فاصله پاشش و نرخ تغذیه پودر در فرآیند HVOF بر رفتار خوردگی داغ پوشش های NiCrAlY"، فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۳۳-۴۳، ۱۳۸۹.
- [3] S. Baskaran, V. Anandkrishnan & M. Duraiselvam, "Investigations on dry sliding wear behavior of in situ casted AA7075-TiC metal matrix composites by using Taguchi technique", *Mater. Des*, Vol. 60, pp. 184-192, 2014.
- [4] Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J. Mater. Process. Technol*, Vol. 84, pp. 122-129, 1998.
- [5] N. A. Jarrah, "Studying the influence of process parameters on the catalytic carbon nanofibers formation using factorial design", *J. Chem. Eng*,

using hybrid abductor induction mechanism”, measurement, Vol. 94, pp. 157-167, 2016.

- [15] G. Ramakrishnan, G. Dwivedi, S. Sampath, A. Oraly, “Development and optimization of the real sprayed ceramic micro filtration membranes”, Journal of Membrane Science, Vol. 489, pp. 106-111, 2015.
- [16] G. E. P. Box & J. S. Hunter, “Multi-Factor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces”, Ann. Math. Stat, Vol. 28, pp. 195–241, 1957.
- [17] G. E. P. Box & K. B. Wilson, “On the Experimental Attainment of Optimum Conditions”, J. Roy. Stat. Soc, Vol. 13, pp. 1–45, 1951.
- [18] A. I. Khuri, J. A. Cornell & M. Dekker, Response Surfaces, 2nd edition, MarcelDekker New York, 1996.
- [19] W. Kurz & D. J. Fischer, Fundamentals of Solidification, Trans Tech Publications, Aedermansdorf, 1992.
- [20] E. Harrington, “The desirability function. Industrial Quality Control”, Vol. 21, pp. 494–498, 1965.
- [21] S. Shabana, M. Sarcar, K. Suman & S. Kamaluddind, “Tribological and Corrosion behavior of HVOF Sprayed WC-Co, NiCrBSi and Cr3C2-NiCr Coatings and analysis using Design of Experiments”, Materials Today: Proceedings, Vol. 2, pp. 2654–2665, 2015.

۶- پی نوشت

- 
- [1] Harrington