

**مدل سازی فرایند پاشش حرارتی برای تشکیل پوشش سطحی با استفاده از روش های آماری\***ابراهیم کمالی<sup>(۱)</sup> علیرضا تیمورتاش<sup>(۲)</sup> محمد پسندیده فرد<sup>(۳)</sup>**چکیده**

در این مقاله، برای مدل سازی سه بعدی پوشش سطحی ناشی از فرایند پاشش حرارتی و به دست آوردن مشخصات آن از روش آماری استفاده شده است. در این روش، برخورد تک تک قطره های سرامیک مذاب و تأثیرگذاری آن ها در شکل گیری لایه های پوشش بررسی شده است. برای این منظور، مدل های تحلیلی برای دینامیک پخش شدن قطره ها و برگشت لبه ی قطره های پخش شده به سمت بالابنه کار گرفته شد، و فرض شد که برگشت لبه های اسپلت تنها عامل ایجاد تخلخل باشد. مدل سازی برای بخش کوچکی از صفحه انجام شد که به روش پلاسما با سرامیک زیرکونیای پایدار شده با یوتریوم (YSZ) پوشش داده شده بود. در نهایت، مقدار متوسط تخلخل پوشش و ضخامت پوشش محاسبه شدند، و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مطابقت داشت. افزون بر این، تأثیر عوامل مختلف فرایند شامل فاصله ی مشعل از سطح، سرعت حرکت مشعل و میزان حجم مواد مصرفی در واحد زمان بر خواص پوشش مانند تخلخل و ضخامت نیز بررسی شده است.

**واژه های کلیدی** مدل آماری، فرایند پاشش حرارتی، تخلخل پوشش، ضخامت پوشش، برگشت لبه.

## Modeling the Thermal Spray Process for the Formation of Surface Coatings using the Stochastic Methods

A. Kamali

A.R. Teymourtas

M. Passandideh Fard

**Abstract**

*In this paper, a 3D stochastic model has been presented to predict the coating thickness and porosity in a thermal spray coating process. Different values of processing parameters were obtained. The model was developed on the basis of prescribed rules in calculating the splat size during the impact of individual droplets on the surface of the substrate. Due to the thermal stresses produced during droplet solidification, splats were curled up in the edge regions. This mechanism was assumed to be the sole reason for the formation of porosity. The simulation was performed for a small section of the substrate. The calculated thickness and porosity were found to be in good agreement with the experimental results in this investigation, and with those already reported in the literature. The effects of different processing parameters including the gun distance from the substrate, the gun speed as well as the amount of powder feed rate on the coating properties were also investigated.*

**Key Words** Stochastic model, Thermal spray process, Coating porosity, Coating thickness, Curl up.

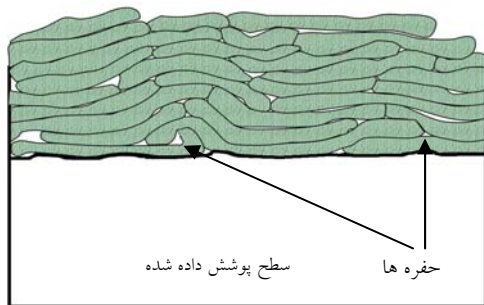
\* نسخه ی نخست مقاله در تاریخ ۹۰/۳/۲۵ و نسخه ی پایانی آن در تاریخ ۹۰/۸/۸ به دفتر نشریه رسیده است.

(1) نویسنده ی مسوول: دانشجوی دکترای مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(2) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

(3) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

حرارتی پوشش را تغییر می‌دهند. عوامل مختلفی در تشکیل تخلخل دخالت دارند که عامل برگشتگی لبه‌ها به دلیل وجود تنش‌های حرارتی از مهم‌ترین آنها است [1]. این پدیده در تحقیق حاضر به‌عنوان تنها دلیل ایجاد تخلخل در نظر گرفته می‌شود. سازوکارهای دیگر عبارتند از محبوس شدن گاز در زیر قطره‌ها، از هم پاشیدگی ذرات هنگام برخورد با سطح و پر شدن ناقص سوراخ‌های موجود در لایه‌ی زیرین [2].



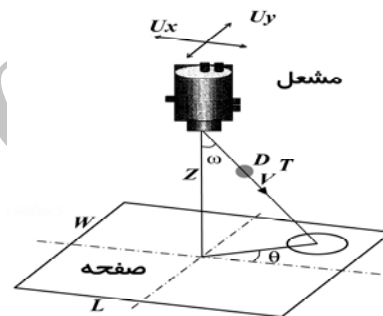
شکل ۲. نمایی از تشکیل لایه‌های پوشش سطحی

تحقیقات آزمایشگاهی زیادی در زمینه‌ی برخورد تک قطره‌ها به سطح انجام شده است. با در نظر گرفتن تأثیر عوامل مختلف مانند سرعت برخورد، دمای سطح و اندازه‌ی قطره بر میزان پخش شدگی آن، رابطه‌هایی برای تعیین بیش‌ترین میزان پخش شدن قطره به‌دست آمده است [3-9]. در این رابطه‌ها، ضریب پخش قطره  $(\xi = d_{max}/D)$  ارائه شده است که در آن،  $d_{max}$  بیش‌ترین قطر پخش شدگی ذره و  $D$  قطر اولیه‌ی آن است.

به‌دلیل پیچیدگی سازوکار برگشت لبه‌ی قطره‌ی پخش شده، تحقیقات کمتری در مورد آن انجام شده است. فوکانو، [10]، مدلی برای شکل‌گیری تخلخل ناشی از برگشت لبه ارائه کرده و نشان داده است که تخلخل بیش‌تر در پیرامون قطره‌ها شکل می‌گیرد، به‌گونه‌ای که محل آن از حدود  $0.6$  شعاع قطره شروع می‌شود. سوبولف و گیلمنی، [11]، یک دسته رابطه‌ی تحلیلی برای تشریح توزیع فشار در زیر قطره‌ی پخش

## مقدمه

فرآیند لایه‌نشانی حرارتی یکی از روش‌های ایجاد پوشش سطحی با استفاده از پودر فلزات، آلیاژها و سرامیک‌ها می‌باشد. در این فرآیند، مواد اولیه نخست به شکل پودر و به‌وسیله‌ی روش‌های حرارتی یا انفجاری به ذرات مذاب یا نیمه مذاب تبدیل می‌شود (شکل ۱). سپس این ذرات پس از پاشش بر روی سطح مورد نظر به آن چسبیده و به‌این ترتیب، پوشش سطحی به‌صورت لایه‌هایی بر روی هم تشکیل می‌شود (شکل ۲). از این روش پوشش‌دهی برای تقویت و افزایش مقاومت سطح در برابر خوردگی و سایش، و ایجاد عایق حرارتی استفاده می‌شود [1].



شکل ۱. نمایی از روش پاشش حرارتی برای تشکیل پوشش سطحی

خواص مهم یک پوشش عبارتند از ضخامت، زبری و میزان تخلخل. این ویژگی‌ها وابستگی زیادی به شرایط فرآیند پوشش‌دهی دارند. ذره هنگام برخورد با سطح می‌تواند مذاب، نیمه مذاب و یا جامد باشد، بنابراین کیفیت پوشش حاصل به دینامیک برخورد این ذره با سطح و میزان پخش شدن آن بستگی دارد.

نتایج تجربی نشان می‌دهند که پوشش تشکیل شده کاملاً یک‌پارچه نبوده و بین قطره‌های پخش شده تخلخل وجود دارد (شکل ۲). تخلخل‌هایی که هنگام انجماد قطره‌ها بر روی سطح و یا لایه‌های زیرین ایجاد می‌شوند، به‌میزان قابل توجهی خواص مکانیکی و

ماده و تأثیر اندازه‌ی قطره هنگام برخورد در نظر گرفته شده‌اند، اما در مدل‌سازی از برخورد مایل قطره به سطح صرف نظر کرده و تنها برخورد عمودی قطره به سطح در نظر شده است. بنابراین، قطره‌ها به صورت دایره‌ای پخش شده و به شکل بیضی در نمی‌آیند.

در این تحقیق، از یک مدل آماری سه بعدی استفاده شده است که می‌تواند تغییرات میزان تخلخل، ضخامت متوسط و زبری سطح را تخمین بزند. در این مدل، برای هریک از متغیرهای فرایند پاشش از توزیع مناسب آماری استفاده شده است، و برای رفع نقص موجود در کارهای قبلی افزون بر در نظر گرفتن برخورد مایل قطره به سطح، روش زو و همکاران، [12]، برای محاسبه‌ی برگشت لبه به کار رفته است. در پایان، نتایج به دست آمده با نتایج ماری، [13]، مقایسه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده مربوط به حالت‌هایی که دمای قطره‌ها در پاشش کم‌تر از دمای ذوب است، میزان تخلخل محاسبه شده به دلیل وجود ذرات ذوب نشده کم‌تر از میزان به دست آمده توسط ماری است، اما در سایر موارد تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج ماری، [13]، وجود دارد. پس از تعیین صحت نتایج مدل‌سازی، تأثیر عوامل مهم فرایند پاشش بر مشخصات فیزیکی پوشش در حالت‌های مختلف بررسی شد. در هر یک از این حالت‌ها، یکی از عوامل از قبیل فاصله‌ی مشعل تا سطح، سرعت مشعل، میزان مواد پاشیده شده و یا زاویه‌ی برگشت لبه به عنوان متغیر فرض شده و سایر عوامل ثابت در نظر گرفته می‌شوند.

### روش حل عددی فرایند پاشش حرارتی

**مدل پخش شدن قطره.** در این تحقیق، همانند مدل زو، [17]، و غفوری آذر، [16]، از هم پاشیدگی قطره هنگام برخورد با سطح به دلیل رسیدن دما به نزدیک دمای ذوب، در نظر گرفته نشده است. در این مدل فرض شده است که هر ذره قبل از برخورد با سطح به شکل کره‌ای به قطر  $D$  باشد، و بعد از برخورد به یک لایه‌ی

شده به دست آورده‌اند که می‌توان از آن‌ها برای محاسبه‌ی نقطه‌ی آغاز برگشت لبه‌ها استفاده کرد. زو و همکارانش، [12]، با مطالعه‌ی چندین مقطع برش خورده از قطره‌ی پخش شده در آزمایش‌های مختلف، میزان برگشت لبه‌ی قطره را بر حسب عوامل برخورد قطره و خواص مواد به دست آورده‌اند. مبنای مطالعات آن‌ها محاسبه‌ی توزیع تنش در قطره‌ی پخش شده بوده است.

ماری و همکارانش، [13]، نقش عوامل مختلف مؤثر بر تخلخل موجود در پوشش تولید شده به روش زیرکونیای پایدار شده با یتیریم را با استفاده از روش آماری طراح‌ی آزمایش‌ها بررسی کرده‌اند. بخشی از این نتایج در مقاله‌ی حاضر برای تعیین صحت نتایج مدل‌سازی استفاده شده است.

شناسایی عوامل مؤثر بر خواص پوشش و چگونگی کنترل این عوامل برای به دست آوردن پوشش مطلوب، به کمک مدل‌سازی تشکیل پوشش با یک روش آماری امکان‌پذیر است. بلاش چنکو و چرنیاک، [14]، و سیرولینی و همکاران، [15]، از روش آماری دو بعدی بدون در نظر گرفتن برگشت لبه‌ی قطرات پخش شده به سمت بالا برای بهینه‌سازی فرایند پاشش حرارتی استفاده کردند، اما نتایج آن‌ها به دلیل دو بعدی بودن مدل و استفاده از نظریه‌ی قدیمی پخش شدن قطره و برگشت لبه از دقت بالایی برخوردار نبودند. غفوری آذر و همکاران، [16]، روش آماری مونت کارلو را برای مدل‌سازی تشکیل پوشش بر روی سطح به کار بردند و در توزیع آماری مورد نظر برای قطره‌ها، برخورد مستقیم قطره‌ها به سطح را فرض کرده و زاویه‌ی برخورد قطره را در نظر نگرفته بودند. افزون بر این، آن‌ها از توزیع نرمال برای زاویه‌ی برگشت لبه استفاده کرده بودند. زو و همکارانش، [12,17]، در ادامه‌ی کار غفوری آذر، از رابطه‌ی مناسب‌تری که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است، برای محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه‌ها استفاده کرده‌اند. در رابطه‌ی مذکور، خواص ترموفیزیکی

همکاران، [16]، مستقیمی و همکاران، [21]، و عابدینی و همکاران، [22]، اشاره کرد. این رابطه‌ها به شکل زیر هستند:

(۱-الف) برخورد عمودی قطره

$$\xi_{\max} = \frac{d_{\max}}{D} = \sqrt{\frac{We+12}{3(1-\cos\theta)+4(We/\sqrt{Re})+We\sqrt{\frac{3}{4}\frac{Ste}{Pe}}}}$$

(۱-ب) برخورد مایل قطره

$$\xi_{\max} = \frac{d_{\max}}{D} = \sqrt{\frac{We+12}{3(1-\cos\theta)+8(We/\sqrt{Re})\sin\eta}}$$

در این رابطه‌ها، اعداد بدون بعد ری‌نولدز (Re)، وبر (We)، پرائتل (Pr)، استفان (Ste) و پکلت (Pe) به وسیله‌ی رابطه‌های زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

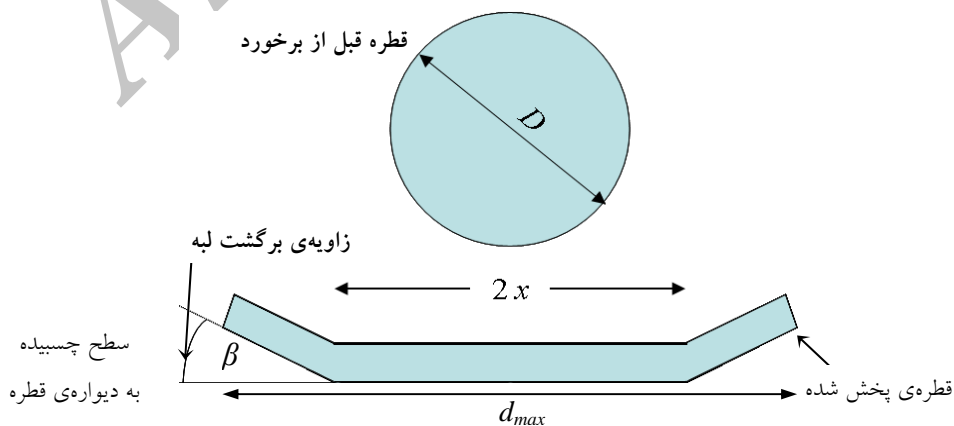
$$We = \frac{\rho V^2 D}{\gamma}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$Ste = \frac{C_1(T_m - T_{w,i})}{H_f}, \quad Pe = Re.Pr$$

استوانه‌ای به قطر  $d_{\max}$  تبدیل شود، به گونه‌ای که لبه‌های آن به دلیل وجود تنش‌های حرارتی به سمت بالا برگشته است (شکل ۳).

از آن‌جا که برخورد بعضی از قطره‌ها به سطح مایل است و پس از برخورد به شکل بیضی در می‌آیند، برای محاسبه‌ی بیش‌ترین ضریب پخش،  $\xi_{\max}$ ، از دو رابطه استفاده شده است. برای محاسبه‌ی قطر کوچک‌تر از رابطه‌ای استفاده شده است که توسط پسندیده فرد و همکاران، [18]، با حل عددی برخورد یک قطره به سطح و انجام آزمایش‌های مرتبط به دست آمده است (رابطه‌ی ۱-الف). برای محاسبه‌ی قطر بزرگ بیضی نیز از رابطه‌ی دیگری استفاده شده است که توسط اسدی و همکاران، [20]، ارائه و برای مدل‌سازی برخورد مایل قطره به کار رفته است (رابطه‌ی ۱-ب). این رابطه‌ها با برقراری حالت توازن بین انرژی کل قطره قبل از برخورد و پس از پخش شدن آن به دست آمده‌اند. پس از برخورد با سطح، انرژی جنبشی و انرژی سطحی (ناشی از تنش سطحی) اولیه‌ی قطره برای غلبه بر اثرات لزجت هنگام پخش شدن آن به مصرف می‌رسد. برقراری حالت توازن بین انرژی جنبشی، کشش سطحی و انرژی تلف شده، نرخ پخش شدن قطره را تعیین می‌کند. این رابطه به وسیله‌ی محققان زیادی استفاده شده است. در این زمینه می‌توان به کارهای غفوری آذر و



شکل ۳ تصویر ذره قبل و بعد از برخورد، و نمایش برگشت لبه‌ی قطره (x: محل شروع برگشت لبه، و  $\beta$ : زاویه‌ی برگشت لبه)

شدن سرد شده و شروع به انجماد می‌کند. با توجه به تفاوت نرخ انجماد در لایه‌ی نزدیک به دیواره و لایه‌ی نزدیک به سطح آزاد و با در نظر گرفتن وجود ضریب انقباض حرارتی ماده در نتیجه‌ی انجماد، تنش‌های پس‌ماند در اسپلت ظاهر می‌شوند. این پدیده یکی از مهم‌ترین دلایل به‌وجود آمدن تخلخل در پوشش است. دو عامل اساسی، یعنی محل شروع و زاویه‌ی برگشت آن، در برگشت لبه‌ی اسپلت دخالت دارند (شکل ۳). محل شروع بالا رفتگی و میزان آن، به جنس ذره و شرایط برخورد، و نیز به عواملی مانند اختلاف ضریب انبساط حرارتی فاز مایع و جامد، کشش سطحی فاز مایع، زبری سطح و ذوب شدن مجدد ذره بستگی دارند [3]. مشاهدات فوکانو، [10]، نشان می‌دهد که اکثر حفره‌ها در کناره‌ی اسپلت و در فاصله‌ی حدود ۶۰ درصدی از شعاع شکل می‌گیرند. غفوری آذر و همکاران، [16]، از همین مقدار در تحلیل خود استفاده کرده‌اند، ولی آن‌ها برای محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه‌ی قطره از رابطه‌ی خاصی استفاده نکرده و به جای آن، از توزیع آماری ویژه‌ی استفاده کرده‌اند.

افزون بر این،  $\eta$  زاویه‌ی برخورد قطره با سطح،  $\theta$  زاویه‌ی تماس بین مایع و سطح تحت پوشش، شکل (۳)،  $T_{w,i}$  دمای اولیه‌ی سطح،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $\gamma$  ضریب کشش سطحی،  $\mu$  لزجت،  $C_1$  گرمای ویژه‌ی مذاب،  $T_m$  دمای ذوب و  $H_f$  گرمای نهان ذوب ذره هستند.

### مدل شکل‌گیری لایه

در این تحقیق، چگونگی قرارگیری لایه‌های ناشی از پخش ذرات بر روی هم به کمک کامپیوتر و بر مبنای نسبت حجمی سیال (VOF) مدل‌سازی شده است [16,17]. در این روش، از تابع اسکالر  $f$  برای هر سلول محاسباتی استفاده شده است، به گونه‌ای که اگر سلول پر از سیال باشد، مقدار  $f$  برابر با یک خواهد بود. مقدار  $f$  برای سلول‌های خالی برابر با صفر و بر روی مرز قطره در بازه‌ی  $0 < f < 1$  قرار دارد (شکل ۴).

### مدل تحلیلی برگشت لبه‌ی اسپلت

لبه‌ی قطره‌های پخش شده در نتیجه‌ی وجود تنش‌های پس‌ماند حرارتی به سمت بالا بر می‌گردد. به دلیل وجود اختلاف دما بین دیواره و قطره، قطره بعد از پخش



(الف)

0.8	0.5	0.9	0
0.4	0.6	1	0.5
0.4	0.6	1	1
0.9	0.5	0.8	1
0	0	0.95	
0	0	0	0

(ب)

شکل ۴ الف) برگشت لبه‌ی قطره در محاسبات به روش نسبت حجمی سیال (VOF)، ب) روش نسبت حجمی سیال برای پیدا کردن سطح آزاد قطره

(۴) تابع توزیع نرمال

$$g(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right]$$

(۵) تابع توزیع لگاریتمی نرمال

$$g_1(x) = \frac{1}{x\sigma_1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \bar{x}_1)^2}{2\sigma_1^2}\right]$$

در این رابطه‌ها،  $g$  و  $g_1$  متغیرهای احتمالی،  $\bar{x}$  میانگین،  $\sigma$  انحراف معیار،  $\sigma_1$  لگاریتم انحراف معیار و  $\mu_1$  میانگین لگاریتمی هستند. توزیع نرمال به شکل یک ناقوس می‌باشد که حول میزان میانگین آن ( $\bar{x}$ ) متقارن است. میزان پهنی این ناقوس با انحراف معیار نشان داده می‌شود. بسیاری از پدیده‌های طبیعی به‌طور تقریبی از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. توزیع لگاریتمی نرمال در آمار و احتمال توزیعی است که لگاریتم طبیعی آن دارای توزیع نرمال با پارامترهای  $\bar{x}$  و  $\sigma$  می‌باشد. به عبارت دیگر، اگر  $X$  متغیری با توزیع نرمال باشد،  $Y = \exp(X)$  دارای توزیع لگاریتمی نرمال خواهد بود.

پودر مورد استفاده در مدل‌سازی از جنس زیرکونیای پایدار شده با یوتریم بود. این پودر با علامت تجاری Sulzer Metco 204NS و مشخصات  $d_{10} = 16\mu\text{m}$ ،  $d_{50} = 50\mu\text{m}$  و  $d_{90} = 95\mu\text{m}$  دارای ذراتی به شکل کروی بود. با توجه به این که مشخصه‌ی  $d_{90} = 95\mu\text{m}$  به معنی آن است که ۹۰ درصد ذرات پودر قطری کم‌تر از  $95\mu\text{m}$  دارند، و هم‌چنین سایر مشخصات پودر، توزیع آماری مورد نظر را می‌توان تعیین کرد. افزون بر این، ذرات پودر با عنوان  $ZrO_2 \cdot 8Y_2O_3 - 125+11\mu\text{m}$  مشخص می‌شوند، و معنی آن این است که درون پودر ذراتی به قطر کوچک‌تر از  $11\mu\text{m}$  و بزرگ‌تر از  $125\mu\text{m}$  وجود ندارند. بنابراین در مدل‌سازی این تحقیق پس از به‌دست آوردن قطر ذرات، ذراتی را که قطر آن‌ها بین ۱۱ و ۱۲۵ میکرون هستند با استفاده از تابع آماری لگاریتمی نرمال (مشابه شکل ۵) انتخاب می‌کنیم.

اشکال این روش حل، فرض نادرست عدم وابستگی زاویه‌ی برگشت به ضخامت اسپلت است که در انجماد آن تأثیر زیادی دارد. افزون بر این، غفوری آذر نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نکرده و تنها بر استفاده از روش‌های آماری تأکید داشته است، با این حال کار او سرآغاز خوبی برای مدل‌سازی بوده است. زو و همکاران، [12]، برای بهبود کار غفوری آذر رابطه‌ی ساده‌ی زیر را برای تعیین زاویه‌ی برگشت لبه به‌دست آورده‌اند که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است:

$$\beta = \arctan\left(\frac{xR\alpha\Delta T}{h_s}\right) \quad (۳)$$

در این رابطه،  $h_s$  ضخامت اسپلت،  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی،  $R=D/2$  شعاع اسپلت،  $\Delta T$  اختلاف دما بین قطره و سطح و  $x$  نقطه‌ی شروع برگشت است (شکل (۳))، که همگی بر اساس داده‌های تجربی به‌دست آمده‌اند. در تحقیق زو و همکاران، [12]، صفحه‌گذاری مدل با مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج تجربی حاصل از بررسی مستقیم تخلخل، انجام شده است.

### مدل آماری

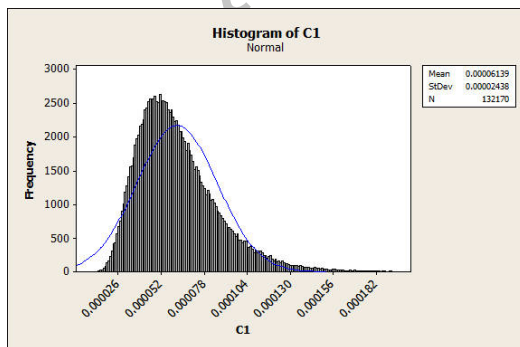
سه فرض اساسی در یک مدل آماری عبارتند از: عدم تداخل ذرات مذاب با یکدیگر، تصادفی بودن پاشش ذرات (هر ذره دارای اندازه، سرعت  $V$  و محل برخورد مشخص است)، و احتمال وجود یک ذره در هر لحظه مستقل از سایر ذرات. با این که پاشش فرایندی وابسته به زمان است و طبیعتاً باید از تعریف زنجیره‌ی مارکوف برای تعیین متغیرهای تصادفی مربوط به پارامترهای فرایند استفاده کرد، اما فرایند برای ساده‌سازی یکنواخت فرض شده است. با توجه به شرایط فوق، در این مدل فرض شده است که سرعت، دمای قطره و زاویه‌ی پاشش از تابع توزیع احتمال نرمال (رابطه‌ی ۴) و اندازه‌ی قطره‌ها از تابع توزیع احتمال لگاریتمی نرمال (رابطه‌ی ۵) پیروی کنند [۱۷ و ۱۶].

قطره‌ی آلومینا با سرعت متوسط 100 m/s و قطر متوسط ۵۰ میکرون در مراحل مختلف، پس از برخورد ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ قطره با سطح نشان داده شده است.

**صحنه گذاری نتایج** برای صحنه گذاری نتایج مدل سازی، از داده‌ها و نتایج مار و همکاران، [۱۳]، استفاده شد. در این شرایط، مشخصات فرایند اسپری پلاسما (APS) برای زیرکونیای پایدار شده با یوتریم (YSZ) در نظر گرفته شد. این مواد از جنس Sulzer Metco 204NS (با مشخصات  $d_{10} = 16 \mu m$ ،  $d_{50} = 57 \mu m$  و  $d_{90} = 95 \mu m$ ) دارای توزیع لگاریتمی نرمال با میانگین  $57 \mu m$  و انحراف معیار  $1/47$  بوده‌اند. شرایط انجام آزمایش به همراه نتایج آن در جداول (۱) و (۲) آمده‌اند.

همان‌طور که در نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود، مدل سازی انجام شده در این تحقیق از توانمندی خوبی برخوردار بوده است. در این مدل، اگر چه میزان تخلخل محاسبه شده کم‌تر از مقادیر محاسبه شده توسط مار می‌باشد، اما روند تغییرات تقریباً یکسان است.

افزون بر این، برای اطمینان از توانمندی مدل به کار رفته، نتایج زو و همکاران نیز بررسی شدند و نتایج این بررسی در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۵ توزیع لگاریتمی نرمال مربوط به اندازه‌ی ذرات

## روش حل

پس از شبکه‌بندی میدان حل، ابتدا با استفاده از روش آماری عوامل مورد نیاز مشخص می‌شوند. برای پیدا کردن قطر اسپلت از رابطه‌ی ۲ استفاده کرده و با به‌کارگیری روش VOF، مرز اسپلت در میدان حل تعیین می‌شود. پس از پخش شدن قطره با توجه به رابطه‌ی ۳ و فرض کردن مقدار ثابت ۰,۶ برای  $\alpha$  زاویه‌ی برگشت محاسبه شده و از آن در جابجایی مرزهای اسپلت استفاده می‌شود. این عمل منجر به خالی شدن فضای زیر لبه‌های آن می‌شود. این کار برای قطره‌ی بعدی هم انجام می‌شود، با این تفاوت که هنگام استفاده از روش VOF برای پیدا کردن مرز قطره، وجود قطره‌های قبلی درون میدان حل در نظر گرفته می‌شود و پس از پیدا شدن موقعیت سطح زیرین، چگونگی پخش شدن قطره‌ی جدید بررسی می‌شود.

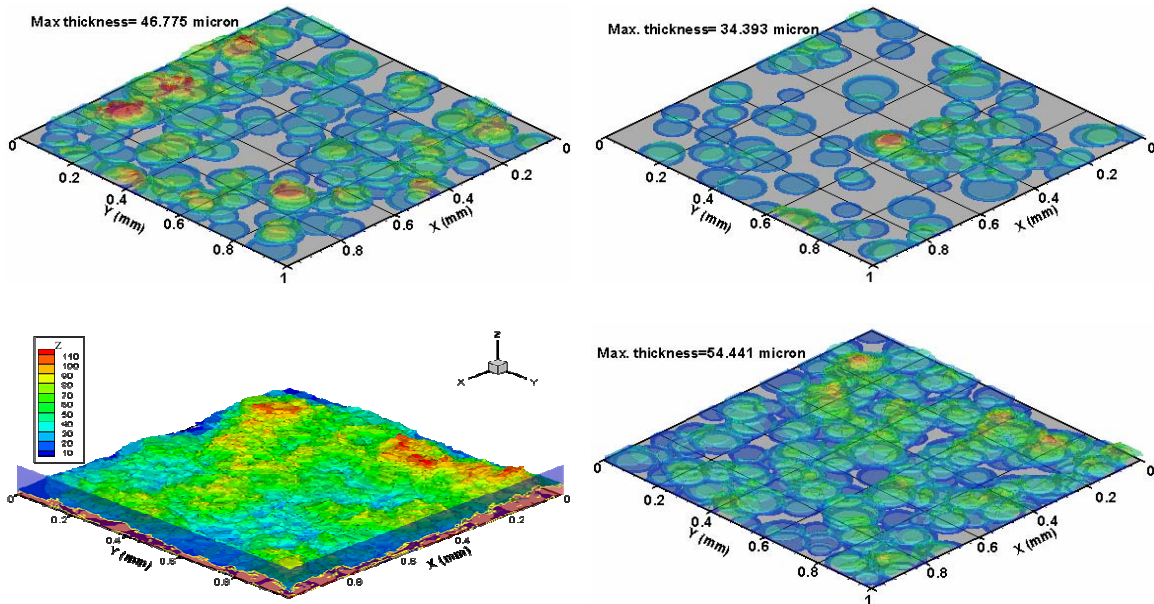
برای تولید اعداد تصادفی، از الگوریتم ارائه شده توسط آلن میلر استفاده شده است. در نهایت پس از پایان مرحله‌ی پاشش قطره‌ها و برای محاسبه‌ی ضخامت و میزان تخلخل، الگوریتم‌های متفاوتی به کار برده شدند. رابطه‌ی زیر برای تعیین میزان تخلخل استفاده شد:

$$\text{porosity} = \frac{V_g}{V_g + V_m} \times 100 \quad (6)$$

که در آن،  $V_g$  فضای خالی محاسبه شده بین قطره‌های پخش شده و  $V_m$  حجم اشغال شده توسط ماده می‌باشد.

## نتایج و بحث

شکل (۶) آنچه که هنگام پوشش دهی اتفاق می‌افتد را در چند مرحله نشان می‌دهد. در این شکل، پراکندگی آماری برخورد قطره‌ها با سطح مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برخورد ۵۰۰



شکل ۶ طرح‌واره‌ای از پوشش دهی در سطحی به ابعاد  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  (قطر متوسط ذرات  $50\ \mu\text{m}$  و سرعت برخورد متوسط ذرات با سطح  $100\ \text{m/s}$  بوده‌اند)

جدول ۱ مشخصات فرآیند پوشش سطح

سرعت پاشش پودر	$25\ \text{g/min}$
فاصله مشعل از سطح	متغیر از $200$ تا $250$ میلی‌متر
سرعت حرکت مشعل	$500\ \text{mm/s}$
تعداد سیکل حرکت مشعل	۵ رفت و برگشت

جدول ۲ مقایسه‌ی با نتایج مار و همکاران [13]

ردیف	فاصله‌ی مشعل از سطح (mm)	دمای ذرات ( $^{\circ}\text{C}$ )	سرعت ذرات (m/s)	تخلخل (از نتایج مار و همکاران)	تخلخل (محاسبه شده)	ضخامت ( $\mu\text{m}$ ) (از نتایج مار و همکاران)	ضخامت ( $\mu\text{m}$ ) (محاسبه شده)
۱	۲۰۰	۲۷۶۰	۱۸۹	۹/۴۳	۹/۲	۴۰۸	۴۰۰
۲	۲۰۰	۲۸۲۴	۱۹۷	۸/۳	۸/۱	۴۰۷	۳۸۷
۳	۲۵۰	۲۷۰۲	۱۸۳	۹/۴۳	۹/۳	۴۱۸	۴۰۳

جدول ۳ مقایسه‌ی نتایج با نتایج زو و همکاران [17]

ردیف	دمای ذرات ( $^{\circ}\text{C}$ )	سرعت ذرات (m/s)	قطر ذرات ( $\mu\text{m}$ )	تخلخل (از نتایج محاسبات زو و همکاران)	تخلخل (از نتایج تجربی زو و همکاران)	تخلخل (محاسبه شده با رابطه‌ی ۶)
۱	۲۷۱۶	۱۶۸	۶۱	۹/۶	۱۰/۷	۱۰/۵
۲	۲۷۸۴	۱۸۱	۵۰	۸/۸	۷	۶/۳
۳	۲۸۲۱	۲۰۶	۳۹	۶/۸	۵/۶	۵/۱

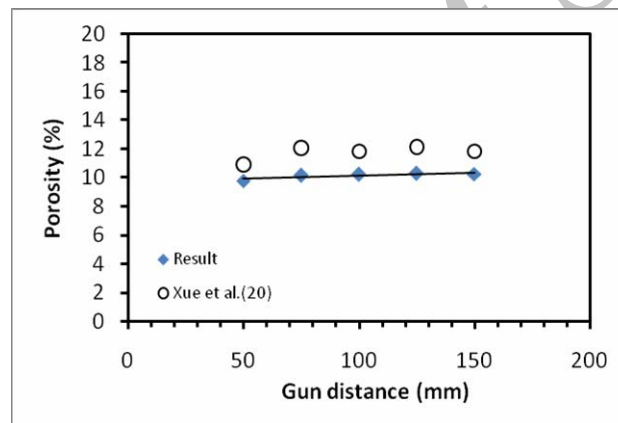


(۸). در مدل‌سازی‌ها، سرعت مشعل برابر با  $400 \text{ mm/s}$  و دبی جرمی پودر برابر با  $0.13 \text{ gr/s}$  فرض شده‌اند. شکل (۷) نشان می‌دهد که فاصله‌ی مشعل از سطح تاثیر زیادی بر میزان تخلخل نداشته و در آن تخلخل تقریباً ثابت مانده است. در این حالت نیز تخلخل محاسبه شده کم‌تر از میزان آن در نتایج زو بوده است.

در شکل (۸) دیده می‌شود که با افزایش فاصله‌ی مشعل، ضخامت کاهش می‌یابد. دلیل کاهش ضخامت، برخورد کم‌تر ذرات به محدوده‌ی مورد نظر از سطح می‌باشد. در این حالت، مطابقت روند تغییرات با نتایج زو چشم‌گیر است.

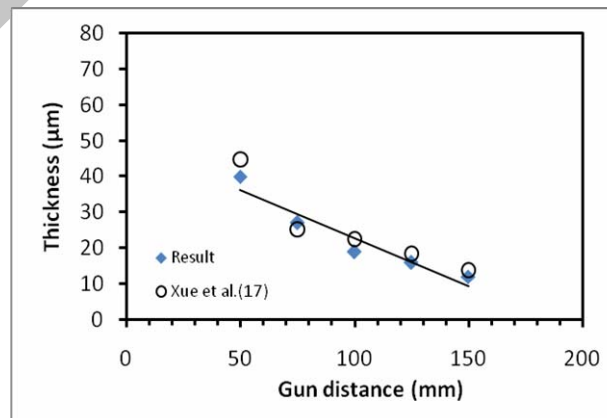
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این مقایسه نیز میزان تخلخل محاسبه شده از رابطه‌ی ۶ کم‌تر از میزان آن در نتایج زو است، اما دارای روند یکسانی بوده و در مقایسه با نتایج محاسبات زو به واقعیت نزدیک است.

**بررسی عوامل مهم فرایند پاشش.** پس از کسب اطمینان از صحت مدل‌سازی صورت گرفته، به بررسی تاثیر عوامل مختلف فرایند بر میزان تخلخل، ضخامت و زبری سطح پوشش داده شده پرداخته‌ایم و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده توسط زو مقایسه شده‌اند. فاصله‌ی مشعل از سطح عاملی است که فرایند مورد نظر را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد (شکل‌های (۷) و



شکل ۷ تغییرات ضخامت بر حسب فاصله‌ی مشعل از سطح

(سرعت مشعل برابر با  $400 \text{ mm/s}$ ، دبی جرمی پودر برابر با  $0.13 \text{ gr/s}$  و قطر متوسط ذرات برابر با  $25 \mu\text{m}$ )

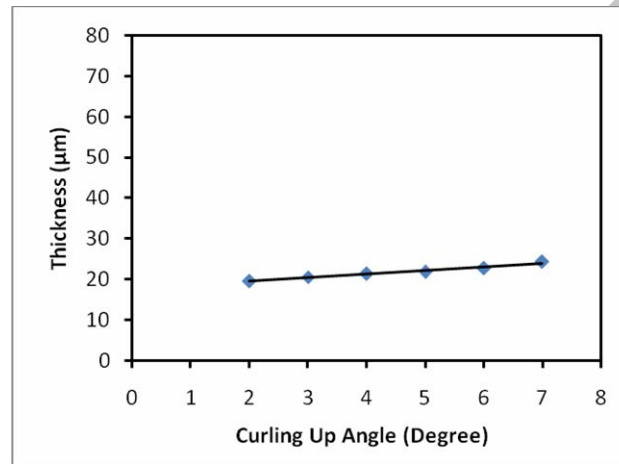


شکل ۸ تغییرات تخلخل بر حسب فاصله‌ی مشعل از سطح

(سرعت مشعل برابر با  $400 \text{ mm/s}$ ، دبی جرمی پودر برابر با  $0.13 \text{ gr/s}$  و قطر متوسط ذرات برابر با  $25 \mu\text{m}$ )

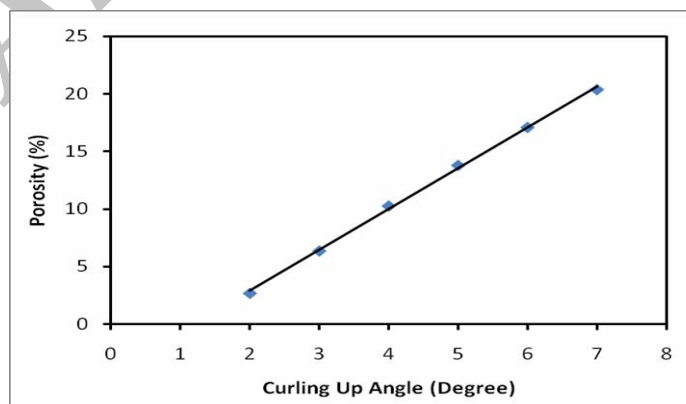
در شکل (۹) نشان داده شده است که زاویه‌ی برگشت تأثیر زیادی بر ضخامت محاسبه شده ندارد، اما از شکل (۱۰) می‌توان دریافت که زاویه‌ی برگشت لبه تأثیر بسیار زیادی بر تخلخل محاسبه شده دارد. با افزایش زاویه‌ی برگشت لبه، میزان تخلخل به دلیل ایجاد فضای خالی زیاد در زیر اسپلت، افزایش زیادی می‌یابد. بنابراین، انتخاب رابطه‌ی مناسبی برای محاسبه‌ی این زاویه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

برای نمایش تاثیر محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه بر محاسبات در شکل‌های (۹) و (۱۰)، زاویه‌ی برگشت لبه استثنائاً از رابطه‌ی (۳) محاسبه نشده است. اگر چه این حالت واقعی نیست، اما برای نشان دادن تأثیر زاویه و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن ضروری است. به این ترتیب، برای زاویه‌های مختلف با انحراف معیار ثابت ۰/۵ و فاصله‌ی ثابت مشعل از سطح برابر با mm ۱۵۰، میزان‌های تخلخل و ضخامت محاسبه شده‌اند.

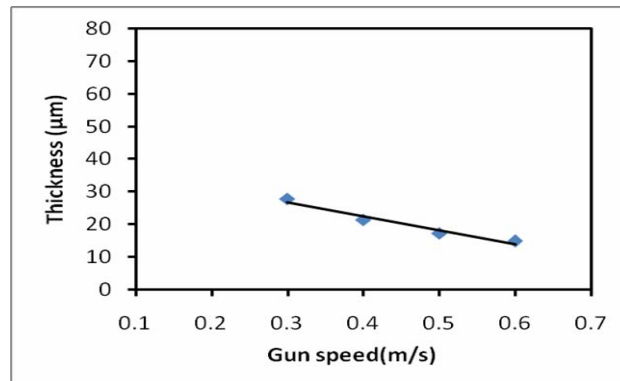


شکل ۹ تغییرات ضخامت بر حسب زاویه‌ی برگشت لبه

(سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm و فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm)

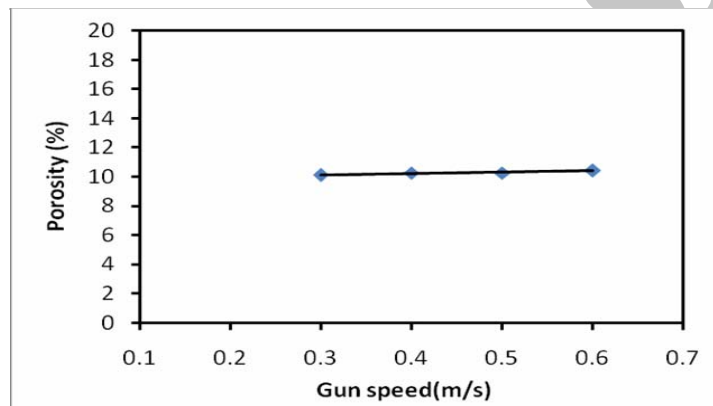


شکل ۱۰ تغییرات تخلخل بر حسب زاویه‌ی برگشت لبه (سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm و فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm)



شکل ۱۱ تغییرات ضخامت بر حسب سرعت حرکت مشعل

فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 μm و زاویه‌ی متوسط برگشت لبه برابر با 4°)



شکل ۱۲ تغییرات تخلخل بر حسب سرعت حرکت مشعل

فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm، دبی جرمی پودر برابر با 0.13 gr/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 μm و زاویه‌ی متوسط برگشت لبه برابر با 4°)

زمان ثابت پاشش دانست که منجر به کم‌تر شدن میزان ماده‌ای می‌شود که بر روی سطح می‌نشیند. از طرف دیگر، در شکل (۱۲) دیده می‌شود که سرعت حرکت مشعل تأثیری بر میزان تخلخل محاسبه شده ندارد. دلیل عدم تأثیر میزان تخلخل، سرعت نسبی بسیار کم حرکت مشعل نسبت به سرعت برخورد قطره‌ها با سطح است که باعث ثابت ماندن زاویه‌ی برخورد قطره با سطح می‌شود. به این ترتیب، روند مطابق انتظار است. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، تأثیر مقدار دبی

برای بررسی تأثیر سرعت حرکت مشعل، آنرا بین ۰/۳ تا ۰/۶ متر بر ثانیه تغییر داده و برای جلوگیری از تأثیر تغییرات زاویه‌ی برگشت لبه در این مرحله، آنرا ثابت و برابر با ۴ درجه فرض کردیم. نتایج به‌دست آمده با حفظ فاصله‌ی ۱۵۰ میلی‌متر مشعل از سطح، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل (۱۱) دیده می‌شود، با افزایش سرعت مشعل ضخامت کاهش می‌یابد. دلیل منطقی آن را می‌توان برخورد تعداد کم‌تری قطره در

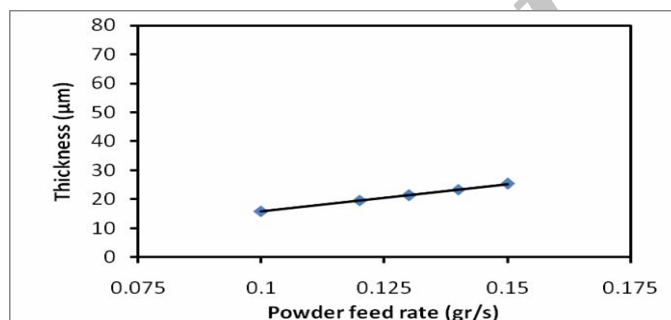
### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرآیند پاشش حرارتی به روش آماری مدل‌سازی شد و در آن، تأثیر عوامل مختلف فرآیند بر روی تخلخل به دست آمده و ضخامت پوشش بررسی شد و نتایج زیر به دست آمدند:

۱- مقایسه‌ی نتایج حاصل از این تحقیق که با داده‌های تجربی موجود و نتایج عددی تحقیق دیگر در جدول (۲) صحه گذاری شده است نشان می‌دهد که کد تدوین شده ابزار مناسبی برای مدل‌سازی پوشش‌دهی سطح می‌باشد.

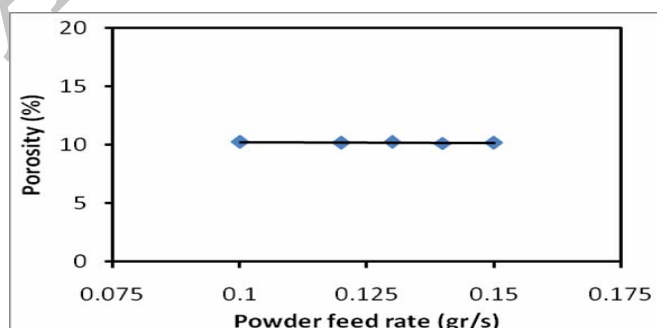
جرمی پودر پاشیده شده به سطح بر عوامل فیزیکی پوشش نشان داده شده است. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که با افزایش دبی جرمی پودر، ضخامت افزایش می‌یابد. دلیل آن را می‌توان، همانند شکل (۱۱)، مقدار جرم موادی دانست که بر روی سطح می‌نشیند. واضح است که با افزایش دبی جرمی، میزان مواد پاشیده شده بر روی سطح بیش‌تر می‌شود و در نتیجه، ضخامت افزایش می‌یابد.

شکل (۱۴) نشان می‌دهد که با تغییر دبی، میزان تخلخل ثابت می‌ماند. از آن‌جا که دبی تأثیری بر برگشت لبه ندارد، بر روی فضای خالی زیر لبه‌های اسپلت و در نتیجه، بر میزان تخلخل نیز تأثیری ندارد.



شکل ۱۳ تغییرات ضخامت بر حسب دبی جرمی پودر

(فاصله‌ی مشعل از سطح برابر با 150 mm، سرعت مشعل برابر با 400 mm/s، قطر متوسط ذرات برابر با 25 µm، زاویه‌ی متوسط برگشت لبه برابر با 4°)



شکل ۱۴ تغییرات ضخامت بر حسب دبی جرمی پودر

(فاصله مشعل از سطح=150mm، سرعت مشعل= 400 mm/s، قطر متوسط ذرات= 25µm، زاویه متوسط برگشتگی لبه=4°)

- ۲- نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهند که نحوه‌ی محاسبه‌ی زاویه‌ی برگشت لبه تأثیر زیادی بر نتایج دارد (شکل (۱۰)).
- ۳- نتایج نشان می‌دهند که عواملی از قبیل فاصله‌ی مشعل از سطح، سرعت مشعل و دبی جرمی پودر
- تأثیری بر میزان تخلخل ندارند.
- ۴- افزون بر این، نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت مشعل و فاصله‌ی مشعل از سطح، ضخامت پوشش کاهش می‌یابد.

## مراجع

1. L. Pawlowski. "The science and engineering of thermal spray coatings", 1<sup>st</sup> edition John Wiley & Sons, (1995).
2. M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi, R. Salimijazi, " Formation of pores in thermal spray coatings due to incomplete filling of crevices in patterned surfaces", *Plasma Chemistry Plasma Process*, 27:647-657, (2007).
3. Moreau, C., Cielo, P. and Lamonta, M. "Flattening and solidification of thermal sprayed particles", *Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition*, 761-766, ASM International, Orlando, FL, USA, (1992).
4. Bholra, R. and Chandra, S. "Parameters controlling solidification of molten wax droplets falling on a solid surface", *Journal of Materials Science* 34(19), 4883-4894, (1999).
5. M. Fukamoto and Y. Huang "Flattening mechanism in thermal sprayed nickel particle impinging on flat substrate surface", *Journal of Thermal Spray Coating*, 8(3):427-432, (1999).
6. S. D. Aziz and S. Chandra, "Impact, recoil and splashing of molten droplets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43:2841-2857, (2000).
7. Attinger, D., Zhao, Z. and Poulikakos, D. "An experimental study of molten microdroplet surface deposition and solidification: transient behavior and wetting angle dynamics", *Journal of Heat Transfer* 122(3), 544-556, (2000).
8. G. Trapaga, E. F. Matthys, J. J. Valencia and J. Szekely, "Fluid Flow, Heat transfer and solidification of molten droplets impinging on substrates: comparison and experimental results", *Metallurgical Transactions B*, 23B:701-718, (1992).
9. R. Ghafouri-azar, J. Mostaghimi and S. Chandra, "Numerical Study of Impact and Solidification of a Droplet Over a Deposited Frozen Splat", *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 18 (2), pp. 133-138, (2004).
10. H. Fukanuma, "A porosity formation and flattening model of an impinging molten droplet in thermal spray coatings", *J. of Thermal Spray Technology*, Vol.3 (1), (1994).
11. V. V. Sobolev and J. M. Guilemany, "Flattening of droplets and formation of splats in thermal

- spraying: a review of recent work –part1", *Journal of Thermal Spray Technology*, 8 :(1): 87-101, (1999).
12. M. Xue, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Investigation of splat curling up in thermal spray coatings", *J. of Thermal spray Technology*, Vol.15 (4), 2006.
  13. G.Mauer, R.Vasen, D.Stover , "Atmospheric plasma spraying of yttria-stabilized zirconia coatings with specific porosity" , *Surface & Coatings Technology* 204, 172–179, (2009).
  14. V.E. Belashchenko and Yu. B. Chernyak, "Stochastic approach to the modeling and optimization of thermal spray coating formation", *J. of Thermal Spray Technology*. Vol.2 (2), (1993).
  15. S. Cirolini, H. Harding, and G. Jacucci, "Computer Simulation of plasma-sprayed coatings deposition model", *Surf. Coat. Technology*, Vol. 48, (1991).
  16. R. Ghafouri-Azar, J. Mostaghimi, S.Chandra and M. Charmchi, "A stochastic model to simulate the formation of a thermal spray coating", *J. of Thermal Spray Technology*, Vol.12, 2003.
  17. M. Xue, S. Chandra, J. Mostaghimi and C. Moreau, "A stochastic coating model to predict the microstructure of plasma sprayed zirconia coatings", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol.16(6), (2008).
  18. M. Pasandideh-Fard, R. Bhola, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Deposition of tin droplets on a steel plate: simulation and experiments", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. Vol.41, (1998).
  19. M. Pasandideh-Fard, Y. M. Qiao, S. Chandra, and J. Mostaghimi, "Capillary effects during droplet impact on a solid surface", *Phys. Fluids* 8 (3), pp650-659,(1996).
۲۰. س. اسدی، م. پسندیده‌فرد و م. مقیمان، " شبیه‌سازی عددی و مدل تحلیلی برخورد مایل قطره با سطح زیر لایه در فرایند لایه نشانی به روش پاشش حرارتی"، *مجله‌ی علوم و مهندسی سطح*، ج (۴)، ص ۱-۱۴، (۱۳۸۶).
21. J. Mostaghimi, S. Chandra. "Splat formation in plasma-spray coating process", *Pure Applied Chemistry*, Vol.74 No.3, (2002).
  22. A.Abedini, A. Pourmoussa, S. Chandra and J. Mostaghimi, "Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying", *J. Surface and Technology*, (2006).