

## شبیه‌سازی عددی و آشکارسازی جریان دوفازی گاز- پودر فلز در فرایند پوشش‌دهی لیزر

محمد باقر مهکی<sup>۱</sup>، مهدی نیلی احمدآبادی<sup>۲\*</sup> و احسان فروزمهر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳

### چکیده

فناوری پوشش‌دهی به وسیله لیزر، در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. پاشش پودر توسط گاز حامل از طریق نازل‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و کنترل فرآیند پوشش‌دهی توسط لیزر دارد، لذا، مطالعه آن اهمیت دارد. در این پژوهش، جریان دو فازی گاز- پودر فلز خروجی از نازل در یک فرآیند پوشش‌دهی توسط لیزر، شبیه‌سازی عددی شده و به منظور تأیید شبیه‌سازی عددی، نتایج آن با نتایج حاصل از بررسی تجربی جریان خروجی از نازل مقایسه شده است. شبیه‌سازی به صورت پایا، سه بعدی و توسط نرم افزار انسیس سی اف ایکس انجام گرفته است. بررسی تجربی توسط آشکارسازی جریان پودر انجام شده است. نتایج بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی انطباق مناسبی با هم دارند. در قسمت بعدی از این مطالعه، اثرات پارامترهای مختلفی مانند دبی ذرات، دبی گاز حامل و گاز محافظ بر تمرکز ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، با کاهش دبی گاز حامل، میزان بیشینه تمرکز ذرات افزایش می‌یابد و مکان تمرکز ذرات به خروجی نازل نزدیکتر می‌شود؛ همچنین، افزایش دبی پودر، تنها تمرکز ذرات را افزایش می‌دهد و بر سایر پارامترهای جریان پودر بی‌تأثیر است. تغییر در دبی گاز محافظ نیز اثری بر رفتار جریان پودر ندارد.

**کلمات کلیدی:** پوشش‌دهی لیزر؛ تمرکز پودر؛ شبیه‌سازی عددی؛ فاز گسسته.

## Numerical Simulation and Visualization of Gas-Metal Powder Flow in Laser Cladding Process

M. Mahaki<sup>1</sup>, M. Nili-Ahmadabadi<sup>2,\*</sup>, E. Foroozmehr<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MSc. Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahn, Iran.

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahn, Iran.

### Abstract

Laser cladding technology has received much attention in recent years. Injection of powder by carrier gas through the nozzles plays an important role in the quality and control of the laser cladding process, so it is important to be studied. In this study, a two-phase flow of gas-powder metal from the nozzle in a laser-cladding process is numerically simulated and compared with the results of an experimental study of the nozzle output to confirm the numerical simulation. The three-dimensional simulation was carried out steadily by Ansys CFX software. Experimental study is carried out by the visualization of powder flow. The results of the experimental study and the numerical simulation are in good agreement. In the next section, the effects of various parameters such as particle flow rate, carrier gas flow rate and shielding gas flow rate on particle concentration are investigated. The simulation results showed that by decreasing the carrier gas flow rate, the maximum concentration of particles increases and the particles concentration location gets closer to the nozzle outlet. Also, increasing the powder flow rate only increases the concentration of the particles and has no effect on the other parameters of the powder flow. The change in the shield gas flow rate also has no effect on the powder flow behavior.

**Keywords:** Laser Cladding; Powder Concentration; Numerical Simulation; Discrete Phase.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: +۹۸۳۱۳۳۹۱۵۲۴۰؛ فکس: +۹۸۳۱۳۳۹۱۲۶۲۸

آدرس پست الکترونیک: [m.nili@iut.ac.ir](mailto:m.nili@iut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

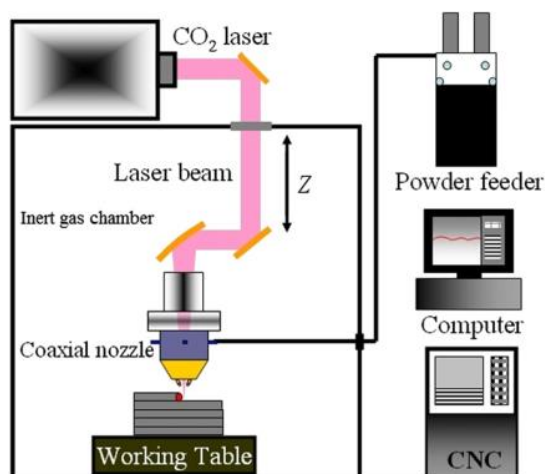
نوع نازل برای پوشش‌دهی در جهات مختلف مناسب نیست. نازل‌های هم‌محور با سیستم تابش پرتو لیزر مجتمع می‌شوند و جریان پودر، پرتو لیزر را در بر می‌گیرد (شکل ۲-ب). از مزایای نازل‌های هم‌محور، استقلال آن‌ها از جهت حرکت و تمرکز بیشتر ذرات پودر در این نازل‌ها است. از این نازل‌ها هم می‌توان برای پوشش‌دهی دو بعدی و هم برای پوشش‌دهی سه بعدی استفاده کرد [۲].

در نازل‌های هم‌محور ممکن است، ذرات پودر پس از برخورد با سطح قطعه کار و افزایش دما برگردند و به سطح لیزر برخورد کنند. در این شرایط به منظور محافظت از لیزر، جریانی از گاز که به آن گاز محافظ<sup>۴</sup> (معمولاً از جنس گاز حامل) گفته می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲-ب).

پارامترهای جریان مانند تمرکز ذرات پودر در صفحه تمرکز پرتو لیزر، نقش مهمی در کیفیت فرایند پوشش‌دهی لیزر دارند. لیو و لی [۴]، نشان دادند با افزایش توزیع تمرکز ذرات، ارتفاع لایه‌نشانی بیشتر و ضخامت آن کمتر می‌شود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود نوسانات در نرخ جرمی پودر باعث تخریب دیواره در حال رشد می‌شود. تان و همکاران [۳]، نیز نشان دادند که با افزایش سرعت ذرات، کیفیت پرداخت سطح بهبود می‌یابد و همچنین با افزایش سرعت ذرات، ارتفاع لایه‌نشانی کاهش می‌یابد. علاوه بر این

فرآوری مواد توسط لیزر<sup>۱</sup> در بسیاری از صنایع مانند صنایع خودرو، هوافضا، کشتی‌سازی، دفاعی و بسیاری از بخش‌های صنعتی دیگر به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود. پوشش‌دهی توسط لیزر<sup>۲</sup> به عنوان یکی از فناوری‌های فرآوری مواد توسط لیزر در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این امر به دلیل پتانسیل بالای این فرایند برای پرداخت مواد مانند، روکش دهی فلزات، تعمیر قطعات و تولید قطعات است. مزیت استفاده از پوشش‌دهی به کمک لیزر به جای دیگر روش‌های پرداخت مواد، کاهش منطقه متأثر از حرارت در این روش و به تبع آن کاهش اعوجاج، اتصال متالورژی با کیفیت بالا و عدم محدودیت در شکل و هندسه است [۲]. در فرایند پوشش‌دهی توسط لیزر با استفاده از یک منبع حرارت لیزر، یک لایه نازک از یک فلز دلخواه بر یک زیرلایه متحرک لایه‌نشانی می‌شود. ماده لایه‌نشانی شده می‌تواند به اشکال مختلف به زیرلایه منتقل شود: پاشش پودر، جانشانی قبلی پودر بر زیرلایه و استفاده از مفتول. از بین این روش‌ها، پوشش‌دهی توسط پاشش پودر از دیگر روش‌ها متداول‌تر است [۲]. شکل ۱ نمایی کلی را از اجزای سیستم پوشش‌دهی توسط لیزر نشان می‌دهد. در روش پاشش پودر، ذرات پودر یک فلز توسط یک گاز که به آن گاز حامل<sup>۳</sup> (معمولاً یک گاز نجیب مانند آرگون) گفته می‌شود، حمل شده و از طریق نازل‌هایی به ناحیه مورد نظر بر روی یک زیرلایه متحرک پاشیده می‌شوند. این ذرات در معرض تابش یک لیزر توان بالا قرار می‌گیرند. در اثر حرارت لیزر، ذرات پودر به همراه لایه نازکی از زیرلایه ذوب شده و پوششی را بر روی سطح زیرلایه ایجاد می‌کنند. با حرکت دادن زیرلایه (معمولاً توسط یک دستگاه CNC) می‌توان پوشش‌هایی با هندسه‌های مختلف روی آن ایجاد کرد.

نازل‌های پاشش پودر نقش مهمی در تامین جریان پودر روی زیرلایه دارند و می‌توانند دارای دو نوع متفاوت نازل‌های جانبی و نازل‌های هم‌محور باشند. نازل‌های نوع اول به صورت جانبی نسبت به پرتو لیزر قرار می‌گیرند (شکل ۲-الف). این



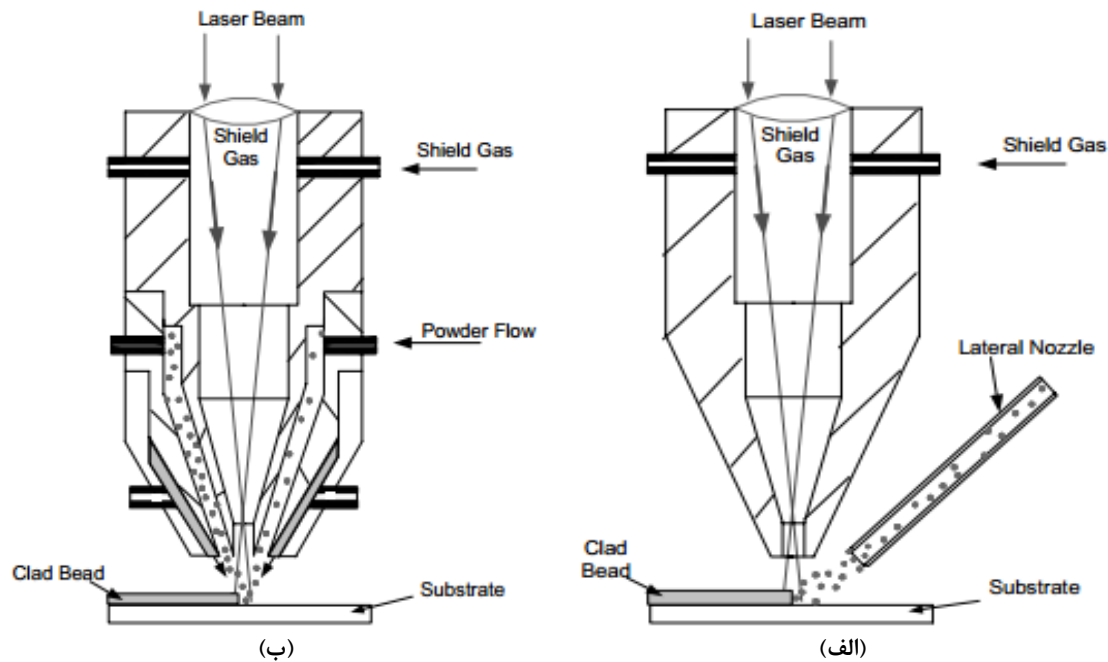
شکل ۱- نمایی از اجزای سیستم پوشش‌دهی توسط لیزر [۳]

<sup>۱</sup> Laser Material Processing

<sup>۲</sup> Laser Cladding

<sup>۳</sup> Career Gas

<sup>۴</sup> Shield Gas



شکل ۲- نازل‌های پاشش پودر، الف: نازل جانبی، ب: نازل هم‌محور [۲]

مطالعات دیگری نیز به منظور بهینه‌سازی تمرکز ذرات در جریان پودر انجام شده است [۴، ۹ و ۱۰]. یانگ [۱۰] یک مدل گاوسی با قابلیت پیش‌بینی کمی غلظت جریان پودر ارائه کرد. وی در این مقاله نشان داد با کاهش عرض خروجی نازل و همچنین با افزایش سرعت اولیه ذرات، فاصله بین ذرات پودر کم می‌شود، در نتیجه مقدار بیشینه غلظت ذرات هم کاهش می‌یابد و مکان آن نیز به خروجی نازل نزدیکتر می‌شود. در این مقاله از یک روش تجربی برای مقایسه با نتایج شبیه‌سازی استفاده شده است. در این مقاله تکنیک مرسوم برای مطالعه حرکت ذرات کوچک در گاز حامل، روش PIV<sup>۱</sup> است. تان و همکاران [۴]، یک سیستم تصویربرداری<sup>۲</sup> ارائه کردند که در طی آن با به کارگیری یک دوربین سرعت بالا، رفتارهای تزریق پودر بر اساس تصاویر به دست آمده از دوربین توضیح داده می‌شود. اجزای این سیستم عبارت است از یک دوربین سرعت بالا، یک پرتو نور با ضخامت ۰/۲ mm و یک مجموعه تزریق پودر با ۴ نازل هم‌محور. نتایج این مطالعه نشان داد با افزایش سرعت گاز حامل، سرعت ذرات

به علت دشواری و هزینه‌بر بودن تولید ذرات پودر، باید حتی‌الامکان از هدررفت ذرات جلوگیری کرد، این امر، موجب اهمیت مطالعه جریان خروجی از نازل به منظور کاهش تلفات پودر شده است.

جریان گاز حامل-پودر فلز بعد از خروج از نازل شامل دو فاز گسسته (ذرات پودر) و پیوسته (گاز حامل- گاز محافظ) است. مطالعات زیادی برای شبیه‌سازی این جریان انجام گرفته است. در برخی از این مطالعات، توزیع تمرکز ذرات در فواصل مختلف از خروجی نازل پوشش پودر، پیش‌بینی شده است [۵-۸]. زوکویچ و همکاران [۵]، جریان دوفازی خروجی از یک نازل را به صورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند و به وسیله روش‌های آشکارسازی این جریان را به صورت تجربی بررسی کردند. تابرنو و همکاران [۷]، نیز یک مدل برای پیش‌بینی جریان پودر برای یک نازل هم‌محور ارائه کردند. در این مطالعه برای بررسی صحت مدل از روش تجربی استوانه‌های توخالی استفاده شده است. در این روش استوانه‌های حفره‌دار با شعاع متفاوت را در فواصل مختلف از خروجی نازل قرار می‌دهند و با وزن کردن ذرات پودر داخل حفره‌ها، غلظت جرمی ذرات را به دست می‌آورند.

<sup>۱</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>۲</sup> Photographic



شکل ۳- هد پوشش‌دهی موجود در آزمایشگاه لیزر و اپتیک دانشگاه صنعتی اصفهان

می‌توان جریان را شامل دو فاز گسسته (ذرات پودر) و پیوسته (گاز حامل - گاز محافظ) در نظر گرفت. با توجه به کوتاه بودن زمان جریان گذرا به کل زمان فرایند، در این شبیه‌سازی جریان به صورت پایا تحلیل شده است.

شبیه‌سازی عددی حمل ذرات به وسیله سیال حامل نیاز به مدل کردن فاز پیوسته (سیال)، فاز گسسته (ذرات) و اندرکنش بین آن دو دارد. در این مطالعه، فاز پیوسته (گاز حامل و گاز محافظ) به وسیله فرمول بندی اویلری و فاز گسسته (ذرات پودر) به وسیله فرمول بندی لاگرانژی مدل شده است. رویکرد اویلری- لاگرانژی در بسیاری از مطالعات گذشته در مورد جریان دوفازی سیال-ذره استفاده شده است. در این مطالعات کسر حجمی فاز ذرات به گونه‌ای بوده است که این فاز صورت مجموعه‌ای از ذرات گسسته و منفرد در نظر گرفته شده است. از موارد استفاده از رویکرد اویلری- لاگرانژی می‌توان به شبیه‌سازی رسوب ذرات گرد و غبار معلق هوا در جو [۱۳]، جریان حاوی نانوذرات معلق در سیال

افزایش و تمرکز ذرات کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش نرخ ذرات، تمرکز آن‌ها نیز افزایش می‌یابد.

مطالعات دیگری نیز روی جریان گاز حامل- پودر فلز خروجی از نازل انجام گرفته است. ژبجیان و همکاران [۱۱]، یک نوع جدید از سیستم تامین پودر هم محور با شار پودر یکنواخت معرفی کردند. در این سیستم رینگ‌هایی برای تقسیم پودر در نازل تعبیه شده است. در این مطالعه از نرم‌افزار فلوئنت برای شبیه‌سازی ۳ بعدی جریان دوفازی گاز- پودر فلز در سیستم جدید بهره‌گیری شد. بالو و همکاران [۱۲]، ذراتی در ابعاد نانو و میکرو به پودر اصلی افزودند و با شبیه‌سازی عددی به وسیله فلوئنت اثر آن را بر جریان پودر مورد مطالعه قرار دادند.

به منظور استفاده حداکثری از ذرات پودر ضروری است، صفحه تمرکز ذرات<sup>۱</sup> بر مکان تمرکز پرتو لیزر منطبق باشد. به همین منظور در این مطالعه ابتدا جریان گاز- پودر فلز خروجی از نازل‌های پاشش پودر موجود در آزمایشگاه لیزر و اپتیک دانشگاه صنعتی اصفهان (شکل ۳) شبیه‌سازی شده است. هدف از این شبیه‌سازی، پیش‌بینی توزیع تمرکز ذرات در صفحات با فواصل مختلف از خروجی نازل و یافتن صفحه‌ای با بیشینه تمرکز ذرات است. به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی انجام شده، جریان خروجی از نازل به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

همان‌طور که گفته شد، تمرکز ذرات به عنوان یکی از پارامترهای مهم جریان پودر، تأثیر زیادی بر کیفیت پوشش و راندمان استفاده از ذرات دارد. اهمیت این امر باعث شده تا به منظور بهینه‌سازی نازل موجود در آزمایشگاه اپتیک و لیزر، اثر پارامترهایی چون دبی گاز حامل، دبی گاز محافظ و زاویه بین نازل‌ها بر تمرکز ذرات در فرایند پوشش‌دهی توسط نازل‌های پاشش پودر مطالعه شود.

## ۲- معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی

جریان گاز حامل پودر بعد از خروج از نازل، جریان جت دوفازی توربولانس است و به همین علت دارای ماهیت فیزیکی پیچیده است. به دلیل آن که در این مطالعه، از گاز آرگون به عنوان گاز حامل و گاز محافظ استفاده شده است،

<sup>۱</sup> Focus Plane

بیان می‌شود. در این رابطه  $c_{\mu}$  یک ثابت است که معمولاً برابر است با  $0.09$  است [۵].  $k$  انرژی جنبشی توربولانس و نرخ اضمحلال انرژی توربولانس است. این دو پارامتر در مدل  $k-\varepsilon$  که بر مفهوم لزجت گردابه‌ای بنا شده تعریف می‌شوند.  $\phi_i$  نیز بیانگر انتقال ممنتوم کوپل شده از فاز ذرات است که در این مطالعه با نادیده گرفتن اثرات فاز ذرات (کوپلینگ یک طرفه) برابر صفر است [۵].

در این مطالعه همچون بیشتر مطالعات انجام گرفته قبلی در این زمینه از مدل توربولانسی  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده می‌شود [۵-۷ و ۱۱-۱۲]. مقدار  $k$  و  $\varepsilon$  نیز از معادلات دیفرانسیل پایستگی انرژی توربولانس و اضمحلال انرژی توربولانس به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{\varepsilon 3} P_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$P_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (8)$$

در این معادلات  $G_k$  تولید انرژی توربولانس بر اثر گرادیان سرعت متوسط (نیروهای ویسکوز) است و  $G_b$  نیز تولید انرژی توربولانس در اثر نیروی بویانسی است.  $P_{r_t}$  نیز بیانگر عدد پراتل توربولانس است؛ همچنین  $C_{\varepsilon 1}$ ،  $C_{\varepsilon 2}$ ،  $C_{\varepsilon 3}$  و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  ضرایب تجربی هستند که مقدار آن‌ها به ترتیب  $1/44$ ،  $1/92$ ،  $1/10$  و  $1/3$  است.

## ۲-۲- معادلات حاکم بر فاز گسسته

در نگرش لاگرانژی به فاز ذرات، معادله تعادل برای هر ذره به صورت مجزا نوشته می‌شود. نیروهای وارد بر ذره که بر شتاب آن تأثیر دارند، می‌توانند به دلیل اختلاف بین سرعت ذره و سرعت سیال و یا به دلیل جابجایی سیال توسط ذرات باشند. معادله تعادل برای هر ذره به صورت زیر بیان می‌شود:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_D + F_B + F_V + F_{VM} + F_P + F_B \quad (9)$$

[۱۴]، شبیه‌سازی عملکرد جداسازها<sup>۱</sup> در صنعت [۱۵]، شبیه‌سازی پاشش قطرات مایع در محیط گازی [۱۶] اشاره کرد. به دلیل کسر حجمی بسیار کم ذرات، از برخورد بین ذره‌ای و اثرات ذرات روی فاز پیوسته صرف‌نظر شده است (کوپلینگ یک طرفه<sup>۲</sup>). حل این معادلات توسط نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس انجام شده است.

## ۲-۱- معادلات حاکم بر فاز پیوسته

از آن جایی که ماهیت جریان سیال (گاز محافظ- گاز حامل)- پودر فلز، جریانی آشفته است، یک مدل توربولانسی برای حل معادلات ممنتوم و توربولانس در نظر گرفته شده است. در این مطالعه مدل سازی فاز پیوسته بر مبنای روش متوسط گیری زمانی رینولدز از معادلات ناویر استوکس است. برای مدل کردن اثرات توربولانس از مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان به صورت زیر بیان می‌شوند [۵]:

معادله پیوستگی جرم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی گاز و  $u_i$  و  $x_i$  بیانگر بردارهای سرعت و مکان هستند.

معادله پایستگی ممنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + \varphi_i \quad (2)$$

در این جا  $P$ ،  $g$ ،  $\tau_{ij}$  و  $\varphi_i$  به ترتیب بیانگر فشار، شتاب گرانش، تانسور تنش و یک ترم چشمه هستند.  $\tau_{ij}$  نیز به وسیله رابطه

$$\tau_{ij} = [(\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)] - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

توصیف می‌شود که  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی و  $\delta_{ij}$  تابع دلتای کرونیکر است.  $\mu_t$  ویسکوزیته توربولانس است که به صورت

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

<sup>۱</sup> Cyclones

<sup>۲</sup> One Way Coupling

داشتن زمان کافی از سوی ذرات برای پاسخ به نوسانات سرعت را مشخص می‌کند. عدد استوکس به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$St = \frac{1}{18} \gamma_d^2 \gamma_p Re \quad (10)$$

در این رابطه  $\gamma_d$  نسبت قطر ذره به یک طول مشخصه از جریان است (در این‌جا قطر خروجی نازل) و  $\gamma_p$  نیز نسبت چگالی ذره به چگالی سیال است [۶]. در معادله فوق،  $Re$  نیز عدد رینولدز ذره است که به شکل رابطه (۱۱) توصیف می‌شود.

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (11)$$

که در این معادله  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی گاز حامل و  $d_p$ ،  $\rho_p$  و  $u_p$  به ترتیب بیانگر چگالی، قطر و سرعت ذره هستند. یک محاسبه اولیه از عدد استوکس ذرات بیانگر آن است که مقدار آن به شکل قابل توجهی از یک بیشتر است، لذا ذرات تحت تاثیر نوسانات سرعت قرار نمی‌گیرند. با توجه به موارد گفته شده در خصوص ماهیت نیروهای وارد بر ذره و خصوصیات فیزیکی ذرات پودر، در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته از نیروهای جرم مجازی، کوریولیس، گرادیان فشار و پخش توربولانسی صرف نظر شده است؛ لذا شتاب وارد بر هر ذره به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} (u - u_p) + \frac{g(\rho - \rho_p)}{\rho_p} \quad (12)$$

در این معادله  $C_D$  ضریب درگ است که وابسته به مقدار عدد رینولدز ذره روابط مختلفی برای محاسبه و استخراج آن پیشنهاد شده است. در اعداد رینولدز پایین، ضریب درگ به صورت تحلیلی و با استفاده از آن قانون استوکس محاسبه می‌شود [۱۷].

$$C_D = \frac{24}{Re}, \quad Re \ll 1 \quad (13)$$

در اعداد رینولدز بالا ضریب درگ مستقل از عدد رینولدز است [۱۷].

$$C_D = 44, \quad 1000 \leq Re \leq 1 - 2 \times 10^5 \quad (14)$$

در ناحیه گذار بین این دو ناحیه ( $0.1 < Re < 1000$ )، ضریب درگ تابع پیچیده‌ای از عدد رینولدز ذره است که باید از طریق روش‌های تجربی تعیین شود. روابط تجربی متعددی برای محاسبه ضریب درگ ذرات کروی در ناحیه گذار موجود

در سمت راست این معادله به نیروهای زیر اشاره شده است:  $F_D$  به نیروهای درگ وارد بر ذره اشاره دارد و غیر قابل صرف نظر است.

$F_B$  نیز عبارت نیروهای بویانسی است. معمولاً در صورت غالب بودن نیروهای اینرسی و دراگ، از نیروهای بویانسی صرف نظر می‌شود.

$F_V$  که به نیروهای کوریولیس اشاره دارد، در صورتی وارد معادله تعادل ذره می‌شود که میدان حل دارای چرخش باشد.  $F_{VM}$  بیانگر نیروهای جرم مجازی یا جرم اضافه است. این نیرو به دلیل شتاب گرفتن جرمی مجازی از سیال در حجمی است که توسط ذره اشغال شده است. این نیرو فقط در صورت بیشتر بودن چگالی فاز سیال از چگالی فاز ذرات و یا در حضور شتاب بالا در نظر گرفته می‌شود.

$F_p$  به معنای نیروهای گرادیان فشار است. این نیرو به دلیل گرادیان فشاری است که در سیال اطراف ذره تحت تاثیر شتاب ذره به وجود می‌آید و فقط در صورتی غیر قابل صرف نظر است که چگالی سیال قابل مقایسه با چگالی ذرات و یا بیش از آن باشد.

$F_B$  نیز به نیروهای بست یا عبارت تاریخچه اشاره دارد که بیانگر انحرافات الگوی جریان از حالت پایا است. این نیرو در نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس در نظر گرفته نشده است [۱۷].

ذرات مورد بررسی در این مقاله، از جنس آلومینیوم-سیلیس (با چگالی  $2500 \text{ kg/m}^3$ ) هستند و به صورت کروی و با قطر ۹۰ میکرون در نظر گرفته شده‌اند.

معادله (۹) برای حالتی است که فرض کنیم جریان سیال آرام است. در جریان توربولانس ممکن است، ذرات معلق در فاز سیال تحت اثر نوسانات سرعت سیال توربولانس قرار گیرند. از آن جایی که در فرایند پوشش‌دهی توسط لیزر، جریان گاز آشفته است، احتمال این مسأله وجود دارد که ذرات تحت اثر ادی‌های توربولانس و پخش توربولانسی قرار بگیرند. به همین خاطر دانستن این که آیا ذرات معلق به اندازه کافی سنگین هستند که تحت تاثیر نوسانات سرعت قرار نگیرند، دارای اهمیت است. این نکته به وسیله عدد استوکس<sup>۱</sup> ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد، پارامتر مهمی که

<sup>۱</sup> Stokes Number

کشیدگی ذرات، سرعت آن‌ها ( $u_p$ ) از رابطه (۱۷) استخراج می‌شود [۱۲].

$$u_p = \frac{L}{0.0001} \quad (17)$$

در این رابطه  $L$  طول کشیدگی ذرات و مخرج کسر، سرعت شاتر دوربین است.

#### ۴- شرایط مرزی

شکل ۴ هندسه مورد نظر در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. میدان حل در این مطالعه شامل، نازل پاشش پودر و مخروطی است که ورودی گاز محافظ لیزر به میدان حل است. اثرات محیط اطراف نازل توسط یک استوانه با حجم محدود، بررسی شده است. به دلیل متقارن بودن هندسه و بارگذاری‌ها و به منظور کاهش هزینه‌های محاسباتی، فقط یک چهارم از هندسه به عنوان میدان حل بررسی شده است (شکل ۵). شرایط مرزی مسأله در شکل ۵ آورده شده است.

سطحی که با شماره ۱ نشان داده شده است، ورودی گاز محافظ به میدان حل است. سطح شماره ۲ نیز ورودی گاز حامل و جریان پودر است. در شبیه‌سازی انجام گرفته، این دو مرز به صورت شرط مرزی ورودی سرعت در نظر گرفته شده‌اند؛ همچنین سطح شماره ۲ ورودی ذرات پودر به میدان حل است. ذرات در نقاط تلاقی سطوح شبکه محاسباتی<sup>۱</sup> به



شکل ۴- هندسه مورد نظر در شبیه‌سازی عددی

<sup>۱</sup> Faces Integration Points

است. یکی از این مدل‌ها که در نرم‌افزار ANSYS CFX پیشنهاد شده است، مدل Schiller Naumann است که در آن ضریب درگ به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (15)$$

در نرم‌افزار CFX، این رابطه به صورت زیر تصحیح شده است [۱۷]:

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), 44\right) \quad (16)$$

#### ۳- بستر آزمون برای بررسی تجربی جریان گاز-

##### پودر فلز

در قسمت دیگر این مطالعه، جریان گاز- پودر فلز خروجی از نازل به صورت تجربی و به وسیله مشاهده جریان و تصویربرداری از آن مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این کار، بررسی صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار انسیس سی اف ایکس است. اساس روش‌های آشکارسازی جریان بر دو قسمت استوار است: روشن کردن جریان توسط یک منبع نور و تصویربرداری از جریان.

تصویربرداری از جریان پودرخروجی از نازل، نیازمند ابزاری برای ثبت تصاویر است. بدین منظور در این مطالعه از دوربین حرفه‌ای استفاده شده است. به دلیل اینکه جریان دارای سرعت است بایستی سرعت عکس‌برداری طوری تنظیم شود که بتوان به خوبی تصاویر جریان را ثبت نمود، به همین منظور تنظیمات طوری انجام شده است که شاتر دوربین در ۰/۱ ms باز و بسته شود.

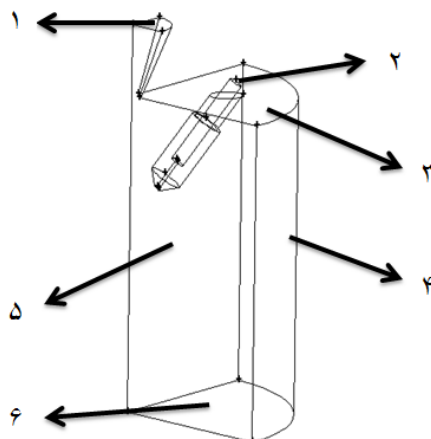
به دلیل زمان کم باز و بسته شدن شاتر دوربین و به تناسب آن زمان پایین نورگیری توسط دوربین، تصاویری که در حالت عادی گرفته می‌شود، تاریک شده و دارای کیفیت نامناسبی خواهند بود [۱۸]. برای حل این مشکل از فلاش عکاسی استفاده شده است. نحوه استفاده از فلاش به این صورت است که با قرار دادن فلاش در محل مناسب و همزمان‌سازی آن با دوربین، از جریان تصویر تهیه می‌شود.

برای به دست آوردن سرعت ذرات از یک روش تقریبی استفاده شده است. اساس این روش بر پایه طول کشیدگی ذرات در تصاویر گرفته شده و مقدار سرعت شاتر دوربین است. با داشتن سرعت شاتر دوربین (۰/۱ ms) و طول

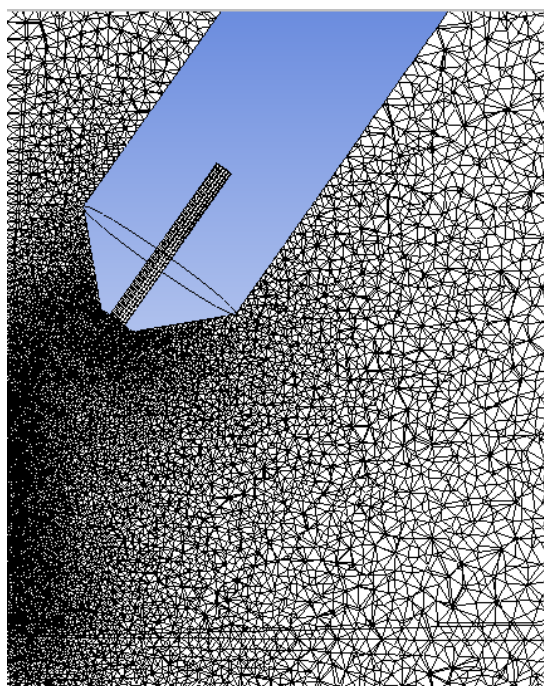


### ۵- بررسی شرط استقلال از شبکه

مرحله‌ی بعد از تولید هندسه، شبکه‌بندی آن است. در این مطالعه، استقلال از شبکه به صورت تجربی و با ریز کردن مکرر شبکه‌ها، انجام شبیه‌سازی برای آن‌ها و بررسی نتایج، حاصل شده است. تولید شبکه در این پروژه توسط نرم‌افزار GAMBIT انجام شده است. شبکه تولید شده ترکیبی از شبکه‌های سازمان یافته و بی‌سازمان است. بخشی از این شبکه تولید شده (در نزدیکی خروجی نازل) در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- میدان حل و شرایط مرزی مفروض در شبیه‌سازی



شکل ۶-نمایی نزدیک از شبکه تولید شده در این مطالعه

میدان حل تزریق می‌شوند و سرعت آن‌ها نیز برابر با سرعت جریان گاز حامل در ورودی به میدان حل است. در شبیه‌سازی اولیه، دبی گاز حامل، گاز محافظ و پودر به ترتیب ۶ lit/min، ۶ gr/min و ۱۰ lit/min فرض شده است. در مطالعات پارامتری انجام گرفته، اثر هر یک از این دبی‌ها بر جریان پودر، بررسی شده و مقادیر جدید شرایط مرزی آورده شده است. برای سطح شماره ۳ نیز شرط مرزی دیواره در نظر گرفته شده است. سطح شماره ۴ که به اثرات محیط بر روی جریان اشاره دارد، شرط مرزی دهانه آزاد<sup>۱</sup> است. در این سطح فشار نسبت به فشار مرجع تفاوتی ندارد و سیال می‌تواند از طریق آن به میدان حل وارد و یا از آن خارج شود. سطوحی که با شماره ۵ نشان داده شده‌اند، صفحات پرپودیک مسأله هستند و تقارن موجود در میدان حل شبیه‌سازی را بازتاب می‌دهند. برای سطح شماره ۶، شرط مرزی دیواره در نظر گرفته شده است؛ همچنین اندرکنش این سطح با ذرات پودر به صورت برخورد پلاستیک در نظر گرفته شده است، یعنی ذرات پودر پس از برخورد به این صفحه، به آن می‌چسبند و دیگر به میدان حل برنمی‌گردند.

در شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته از پارامتر کسر حجمی برای گزارش نتایج استفاده شده است. مقدار این پارامتر در هر سلول از شبکه محاسباتی با حجمی از سلول برابری می‌کند که توسط فاز گسسته اشغال شده است.

شکل ۷ نتایج استقلال از شبکه را برای توزیع تمرکز ذرات بر روی محور نازل‌ها نشان می‌دهد (توزیع محوری). شکل ۸ در یک صفحه با فاصله خاصی از خروج نازل، توزیع تمرکز ذرات برای شبکه‌های مختلف را بر حسب فاصله از محور نازل نشان می‌دهد (توزیع شعاعی). در جدول ۱ و جدول ۲، نتایج این بررسی برای طول و عرض ناحیه تمرکز نشان داده شده است. طول ناحیه تمرکز نشانگر طولی از محور نازل است که در آن تمرکز ذرات وجود دارد و بیش از صفر است. عرض ناحیه تمرکز نیز بیانگر آن است که در صفحه مورد نظر، در چه فاصله‌ای از محور نازل، ذرات متمرکز

<sup>۱</sup> Opening

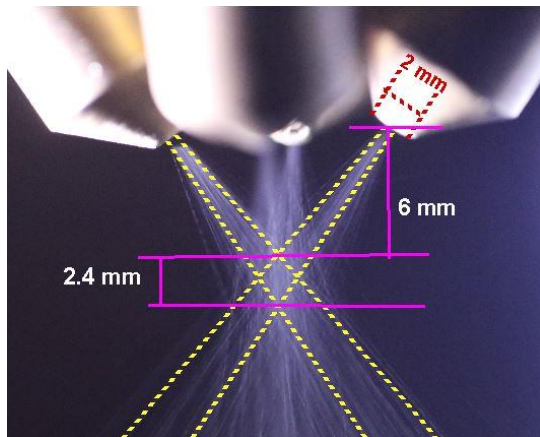


جدول ۱- مقایسه طول ناحیه تمرکز ذرات در شبکه‌ها

تعداد المان	طول ناحیه تمرکز (mm)	خطای طول ناحیه تمرکز (%)
۴۰۷۹۴۰	۲/۸۲	۳۴
۶۷۱۸۸۶	۲/۳۵	۱۲
۱۰۳۹۷۶۱	۲/۱۵	۲
۱۳۷۵۴۲۱	۱/۲	-

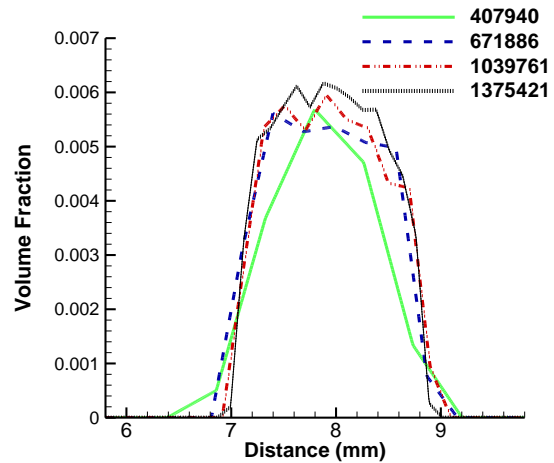
جدول ۲- مقایسه عرض ناحیه تمرکز ذرات در شبکه‌ها

تعداد المان	عرض ناحیه تمرکز (mm)	خطای عرض ناحیه تمرکز (%)
۴۰۷۹۴۰	۱/۰۳	۳
۶۷۱۸۸۶	۱/۱۳	۱۳
۱۰۳۹۷۶۱	۱/۰۳	۳
۱۳۷۵۴۲۱	۱	-

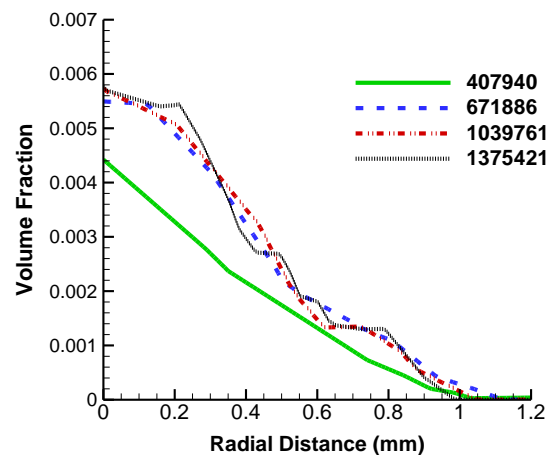


شکل ۹- استخراج مکان صفحه‌ی تمرکز بیشینه و طول آن از تصویر گرفته شده از جریان پودر

تمرکز پودر، فاصله آن از خروجی نازل و همچنین طول کل ناحیه نشان داده شده است. با اطلاعات موجود در شکل ۱۰ نیز می‌توان به صورت تقریبی سرعت ذرات را هنگام خروج از نازل تخمین زد. در این تصاویر طول کشیدگی ذرات عکس- برداری شده اندازه گرفته شده و با استفاده از رابطه ۸، سرعت



شکل ۷- توزیع محوری تمرکز ذرات برای شبکه‌های بررسی شده



شکل ۸- توزیع شعاعی تمرکز ذرات برای شبکه‌های بررسی شده

شده‌اند. این نتایج بیانگر آن است که برای شبکه‌های با بیش از ۱۰۳۹۷۶۱ المان، نتایج مستقل از تعداد المان است.

### ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی

در این قسمت، از جریان خروجی از نازل عکس‌برداری شده و با استخراج پارامترهای جریان پودر از عکس گرفته شده، نتایج شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی با هم مقایسه می‌شود. در این تصاویر، قطر نازل (۲ mm) به عنوان شاخص طولی محسوب می‌شود. در شکل ۹ تصویر گرفته شده از جریان پودر و اطلاعات استخراج شده از آن مانند ناحیه

### ۷- نتایج بررسی پارامترها

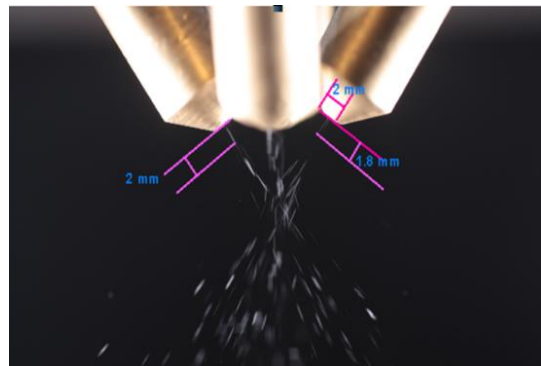
در این قسمت، اثر پارامترهایی چون دبی گاز حامل، دبی گاز محافظ و زاویه بین نازل‌ها روی رفتار جریان پودر خروجی از نازل موجود در آزمایشگاه اپتیک و لیزر مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۷-۱- بررسی اثر دبی گاز حامل بر تمرکز ذرات

جدول ۴ شرایط مرزی را برای بررسی اثر دبی گاز حامل نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ توزیع محوری کسر حجمی پودر در طول خط مرکزی نشان داده شده است. شکل ۱۲ نیز توزیع شعاعی کسر حجمی پودر را در صفحه‌ای با فاصله mm ۷/۵ از خروجی نشان می‌دهد. از نمودارهای به دست آمده این نتیجه حاصل می‌شود که کاهش دبی گاز حامل، مقدار تمرکز ذرات را افزایش می‌دهد و به مقدار اندکی طول جریان پودر را کاهش و عرض آن را افزایش می‌دهد. دلیل این امر می‌تواند این مسأله باشد که با افزایش دبی گاز حامل، مقدار آن در مرز ورودی میدان حل زیاد شده و در نتیجه با ثابت ماندن دبی ذرات و مقدار آن در میدان حل، کسر حجمی آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، با افزایش سرعت گاز حامل، میزان بازشدگی جت خروجی از نازل که حامل ذرات پودر است بیشتر می‌شود، به همین دلیل سرعت ذرات و سرعت پخش شدن آنها در محیط نیز افزایش می‌یابد. لذا در دبی ثابت ذرات پودر، فاصله ذرات از یکدیگر بیشتر می‌شود و تمرکز ذرات نیز کم می‌شود. با این توضیحات می‌توان به این نتیجه رسید که در محدوده بررسی شده در این مطالعه کمترین دبی گاز حامل (۴/۵ lit/min)، باعث تمرکز بیشتر جریان پودر روی قطعه کار و در مقابل پرتو لیزر می‌شود و در این حالت، بهینه‌ترین بازده استفاده از پودر فلز واقع می‌شود.

ذرات تخمین زده شده است. سرعت ذرات در شبیه‌سازی هم توسط ردگیری ذرات و مشاهده سرعت آن‌ها در هنگام خروج از نازل، به دست می‌آید. در جدول ۳ نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی آورده شده و خطای حاصل از شبیه‌سازی عددی نیز به دست آمده است.

عدم دقت کافی دستگاه‌های آزمایش و همچنین اندازه‌گیری‌ها می‌تواند باعث ایجاد خطا در انجام آزمایش شده باشد. احتمال نشتی گاز سیستم تغذیه گاز و دستگاه تأمین پودر نیز باعث شده دبی‌های گاز حامل و گاز محافظ منظور شده کاملاً دقیق و منطبق بر نتایج تجربی نباشند؛ همچنین احتمال رسوب ذرات در شیلنگ‌های پاشش پودر نیز باعث شده جریان پودر در این شیلنگ‌ها جریانی دقیقاً پایا نباشد. ممکن است مسیر حرکت ذراتی که در عکس‌های گرفته شده حضور دارند، دقیقاً در صفحه تصویربرداری نباشد. لذا کشیدگی ذرات در صفحه عکس‌برداری، تصویر شده است و مقدار کمتری نسبت به حالت واقعی را نشان می‌دهد. این مسأله باعث شده است، در تصاویر سرعت کمتری برای ذرات گزارش شود.



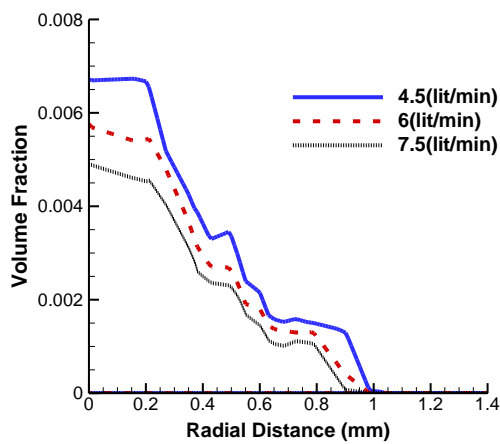
شکل ۱۰- کشیدگی ذرات در خروج از نازل

#### جدول ۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایش تجربی

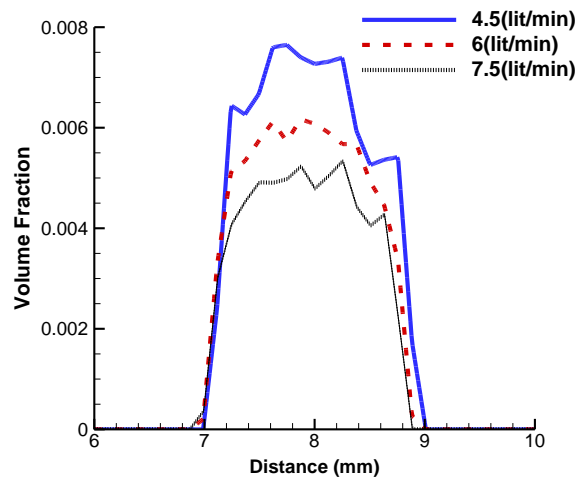
سرعت ذرات در خروج از نازل (m/s)	فاصله ناحیه تمرکز از خروجی نازل (mm)	طول ناحیه تمرکز (mm)	شبیه‌سازی
۸/۱-۱۰/۱	۶/۸۵	۲/۱۵	شبیه‌سازی
۷/۴-۸/۵	۶	۲/۴	تجربی
۸-۱۷	۱۴	۱۰	خطا (%)

#### جدول ۴- شرایط مرزی برای بررسی اثر دبی گاز حامل

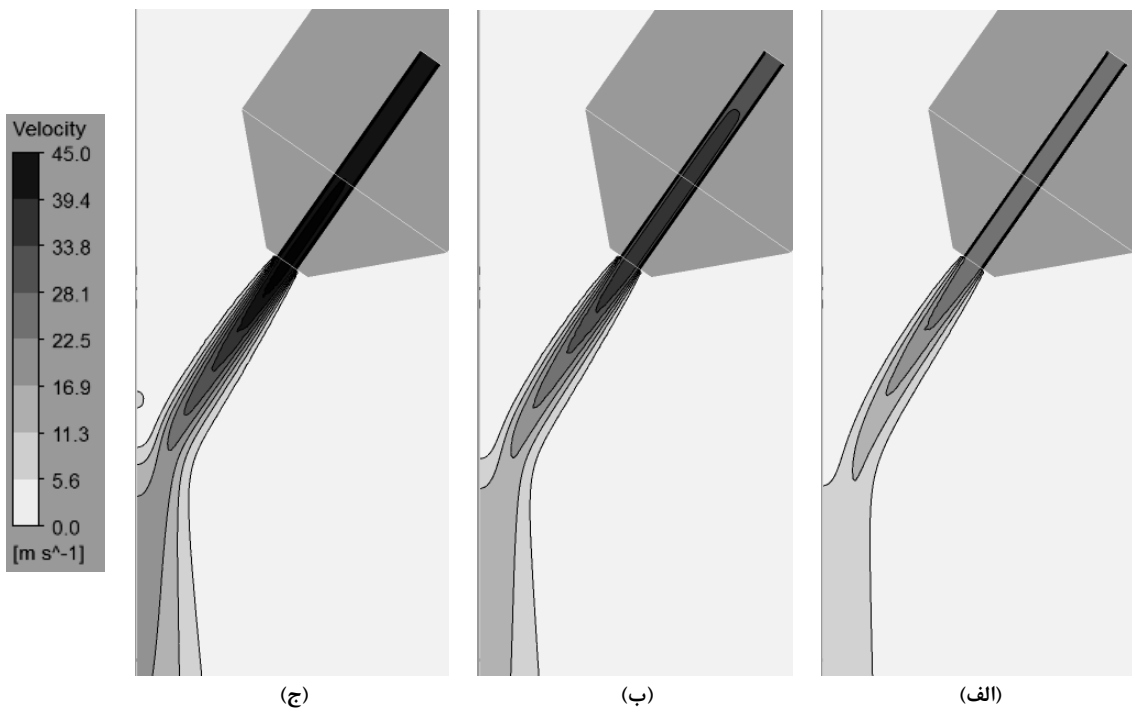
دبی پودر (gr/min)	دبی گاز حامل (lit/min)	دبی گاز محافظ (lit/min)	ردیف
۶	۴/۵	۱۰	۱
۶	۶	۱۰	۲
۶	۷/۵	۱۰	۳



شکل ۱۲- مقایسه توزیع شعاعی کسر حجمی ذرات بر اساس دبی گاز حامل



شکل ۱۱- مقایسه توزیع محوری کسر حجمی ذرات بر اساس دبی گاز حامل

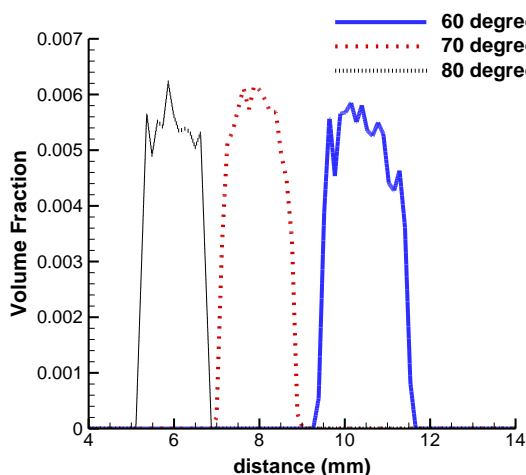


شکل ۱۳- کانتور سرعت گاز آرگون در دبی‌های مختلف گاز حامل الف) ۴/۵ lit/min (ب) ۶ lit/min (ج) ۷/۵ lit/min

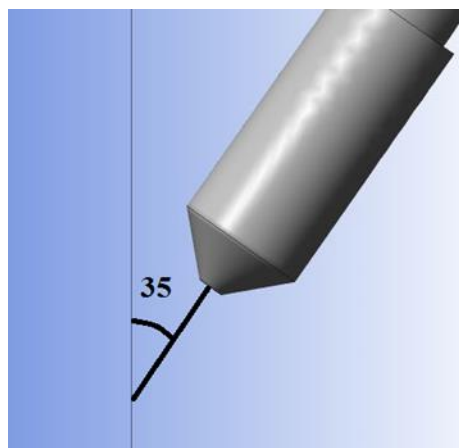
دو برابر زاویه‌ای است که امتداد محور نازل‌ها با خط محوری ایجاد می‌کند. زاویه بین نازل‌های موجود در آزمایشگاه اپتیک و لیزر و محور مرکزی آن‌ها ۳۵ درجه و در نتیجه زاویه بین نازل‌ها ۷۰ درجه است (شکل ۱۴). به منظور بهینه نمودن طراحی نازل، این حالت از چیدمان نازل‌ها با

۲-۷- بررسی اثر زاویه بین نازل‌ها بر تمرکز ذرات در این قسمت از پژوهش، اثر زاویه بین نازل‌ها بر روی پارامترهای جریان پودر مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از زاویه بین نازل‌ها زاویه‌ای است که امتداد دو نازل روبه روی همدیگر بر روی خط محوری نازل‌ها ایجاد می‌کند. این زاویه

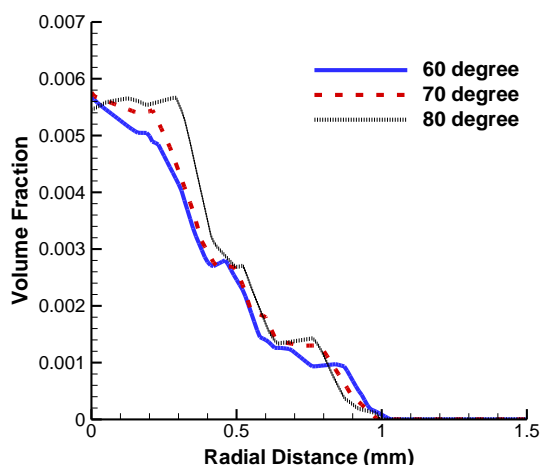
پودر فلز روی قطعه کار، محدوده مناسب قرارگیری قطعه کار را بیشتر می‌کند.



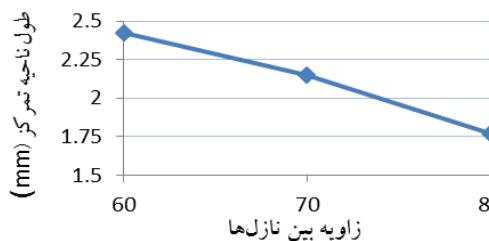
شکل ۱۴- نمایی از زاویه بین نازل و محور مرکزی در این مطالعه



شکل ۱۵- مقایسه توزیع محوری کسر حجمی ذرات بر اساس زاویه بین نازل‌ها



شکل ۱۶- مقایسه توزیع شعاعی کسر حجمی ذرات بر اساس زاویه بین نازل‌ها



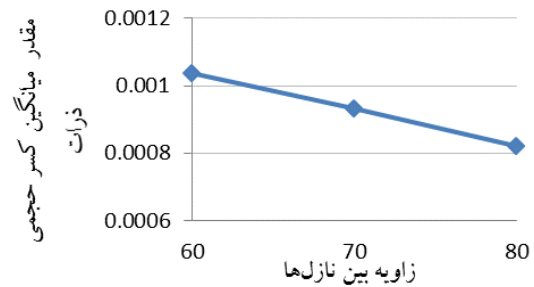
شکل ۱۷- مقایسه طول ناحیه تمرکز ذرات بر اساس زاویه بین نازل‌ها

زمانی مقایسه شده است که زاویه بین نازل‌ها ۶۰ و ۸۰ درجه است. شرایط مرزی در این مطالعه همان مقادیر شبیه‌سازی اولیه است.

شکل ۱۵ توزیع محوری کسر حجمی ذرات را بر حسب زاویه بین نازل‌ها نشان می‌دهد. شکل ۱۶ نیز توزیع شعاعی کسر حجمی ذرات را در ناحیه تمرکز برای هر کدام از حالات نشان می‌دهد. در این شکل نتایج برای زوایای ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه بین نازل‌ها به ترتیب در فاصله‌ی ۱۰/۵، ۷/۵ و ۵/۵ mm از خروجی نازل گزارش شده است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نیز به ترتیب نمودار طول ناحیه تمرکز و مقدار میانگین کسر حجمی ذرات را بر حسب زاویه بین نازل‌ها نشان می‌دهند. این نتایج بیانگر آن است که کاهش زاویه بین نازل‌ها، با جابجا کردن ناحیه تمرکز، آن را از خروجی نازل دور می‌کند و طول آن را افزایش می‌دهد؛ همچنین باعث افزایش مقدار میانگین تمرکز ذرات می‌شود. البته در فاصله‌های مشخص شده از خروجی نازل، زاویه نازل‌ها در محدوده‌ی بررسی شده، تأثیری بر عرض جریان پودر ندارد. با ذکر این نتایج می‌توان به این نکته رسید که وقتی زاویه بین نازل‌ها کاهش می‌یابد، قطعه کار در فاصله دورتری از نازل قرار می‌گیرد؛ اما طول آن ناحیه‌ای که قطعه کار می‌تواند در آن قرار بگیرد طولانی‌تر می‌شود؛ یعنی بازه مناسب برای پوشش‌دهی توسط لیزر گسترده‌تر می‌شود. به بیان دیگر در محدوده مورد مطالعه در این مقاله، زاویه ۶۰ درجه بین نازل‌ها بدون تأثیر روی تمرکز

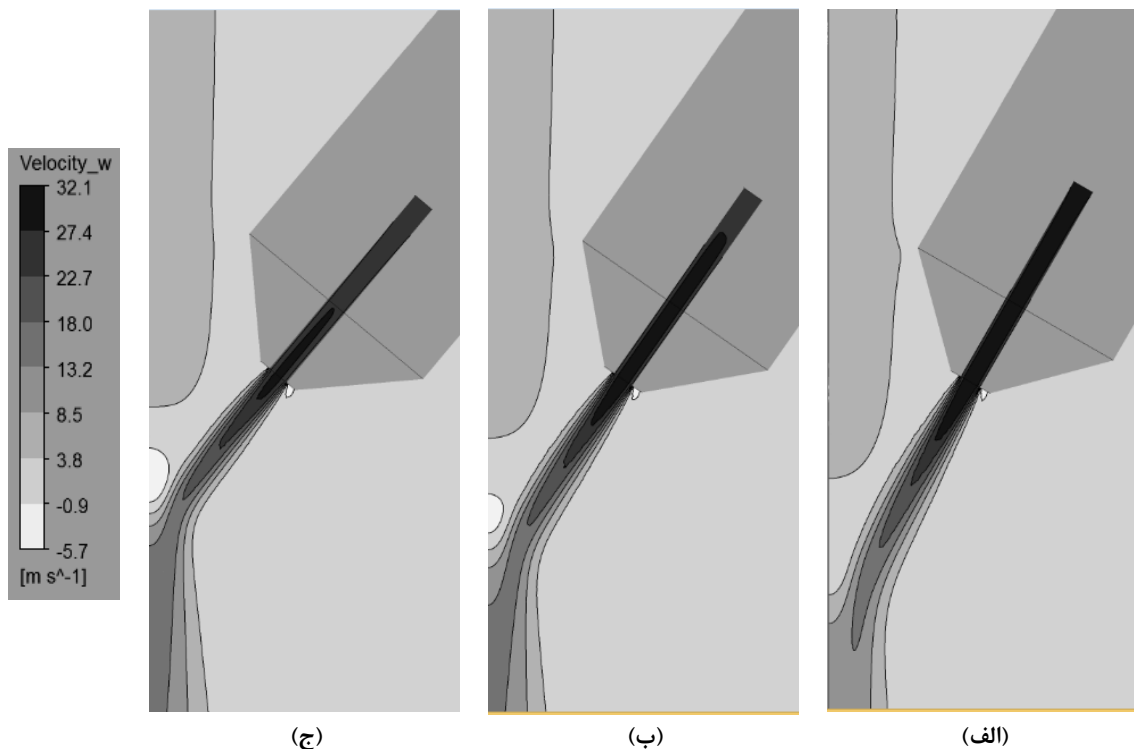
۷-۳- بررسی اثر دبی گاز محافظ بر تمرکز ذرات

در این قسمت، اثر دبی‌های مختلف گاز حامل بر رفتار جریان پودر بررسی شده است. جدول ۵ شرایط مرزی را برای هر کدام از موارد شبیه‌سازی شده، نشان می‌دهد. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ اثر دبی گاز محافظ را بر توزیع شعاعی و محوری جریان پودر نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که در محدوده‌ی پارامترهای انتخاب شده، تغییر دبی گاز محافظ تأثیر چندانی بر پارامترهای جریان پودر مانند طول و عرض ناحیه تمرکز و مقدار کسر حجمی ذرات ندارد. شکل ۲۲ نیز کانتور سرعت گاز آرگون را برای بیشینه دبی مطالعه شده گاز حامل در صفحه‌ای نشان می‌دهد که با دو صفحه تقارن زاویه ۴۵ درجه می‌سازد. این کانتورها نشان می‌دهد که حتی در این حالت نیز ممنتوم گاز محافظ در زمان رسیدن به ناحیه تمرکز ذرات کمتر از آن است که بتواند بر تمرکز ذرات اثرگذار باشد، بنابراین در محدوده پارامترهای انتخاب شده، دبی گاز محافظ اثر محسوسی بر پارامترهای جریان پودر

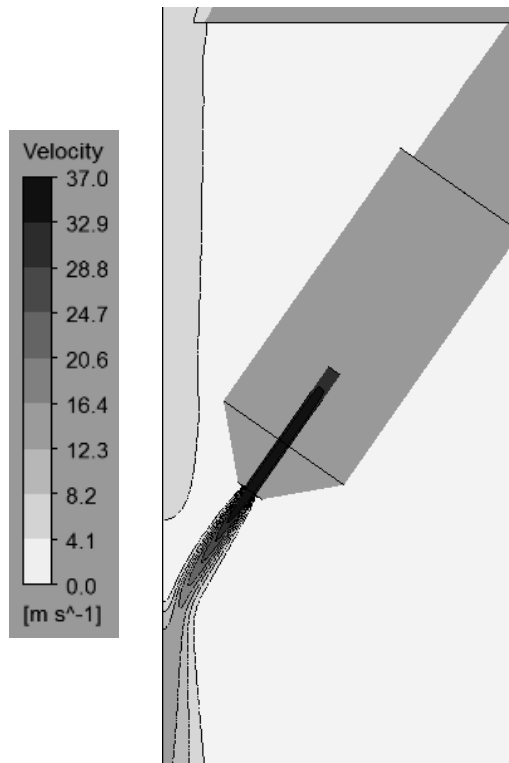


شکل ۱۸- مقایسه مقدار میانگین کسر حجمی ذرات بر اساس زاویه بین نازلها

در تحلیل این نتایج به این نکته می‌توان اشاره کرد که با کاهش زاویه بین نازلها، سرعت گاز حامل و در پی آن سرعت ذرات دارای مقدار مؤلفه عمودی بیشتری می‌شود؛ لذا ذرات در فواصل دورتری از خروجی نازل متمرکز می‌شوند. به همین دلیل جریان سیال و پودر فرصت بیشتری برای باز شدن در محیط دارند. پس طول ناحیه تمرکز ذرات نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- کانتور سرعت عمودی گاز آرگون برای زاویه‌های الف: ۶۰، ب: ۷۰ و ج: ۸۰ درجه بین نازلها



شکل ۲۲- کانتور سرعت گاز آرگون برای بیشترین دبی مطالعه شده از گاز محافظ (10 lit/min)

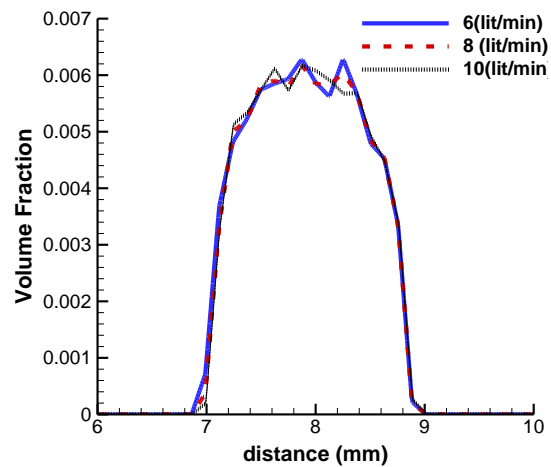
#### ۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به وسیله جریان دوفازی گاز-پودر فلز خروجی از یک نازل به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در بخش عددی از یک مدل اولبری-لاگرانژی استفاده شد. در قسمت تجربی مطالعه نیز از تکنیک‌های آشکارسازی جریان بهره گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که جریان خروجی از نازل به سه ناحیه همگرایی، تمرکز و واگرایی تقسیم می‌شود. انطباق مناسب بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج بررسی تجربی بیانگر این بود که می‌توان از مدل عددی صحت‌سنجی شده برای کاربردهای مشابه استفاده کرد. به همین دلیل نتایج بررسی اثر پارامترهای مختلف بر جریان پودر نیز مورد مطالعه قرار گرفت. این نتایج حاکی از آن بود که با افزایش دبی گاز حامل، جریان پودر غیر متمرکزتری روی قطعه کار ایجاد می‌شود. با افزایش زاویه بین نازل‌ها نیز فاصله ناحیه تمرکز ذرات از خروجی نازل و طول این ناحیه کمتر می‌شود. همچنین پس از انجام شبیه‌سازی‌ها این نتیجه حاصل شد که

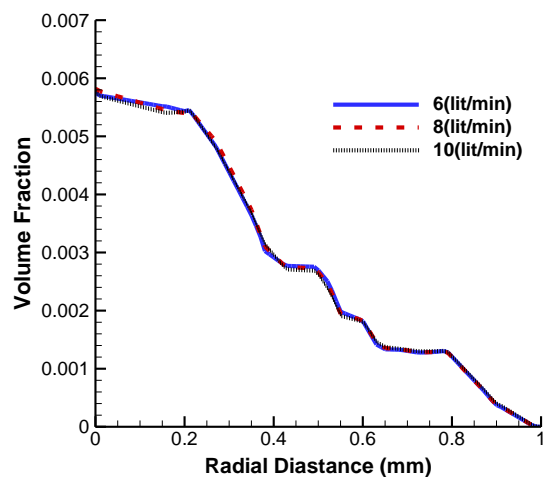
نداشته است. به این ترتیب، به منظور محافظت بهتر از لنز می‌توان دبی گاز محافظ را بیشینه انتخاب کرد.

جدول ۵- شرایط مرزی برای بررسی اثر دبی گاز محافظ

ردیف	دبی پودر (gr/min)	دبی گاز حامل (lit/min)	دبی گاز محافظ (lit/min)
۱	۶	۶	۶
۲	۶	۶	۸
۳	۶	۶	۱۰



شکل ۲۰- مقایسه توزیع محوری کسر حجمی ذرات بر اساس دبی گاز محافظ



شکل ۲۱- مقایسه توزیع شعاعی کسر حجمی ذرات بر اساس دبی گاز محافظ



- [9] Lin, J (1999) Concentration mode of the powder stream in coaxial laser cladding. *Opt Laser Technol* 31(3): 251-257.
- [10] Yang, N (2009) Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding. *Opt Laser Technol* 41(1): 94-98.
- [11] Wang Z, Zhang A, Shang X (2009) 3-D Design and Numerical Simulation of Two-Phase Flow in the Laser Rapid Prototyping Coaxial Powder Delivery System. *Tsinghua Sci Technol* 14(1): 200-205
- [12] Balu P, Leggett P, Kovacevic R (2012) Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process. *J Mater Process Tech* 212(7): 1598-1610.

[۱۳] هاشمی پرینچی م، مؤیدی م، جباری ا (۱۳۹۷) شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز ذرات معلق در هوا و مطالعه پیرامون رفتار ذرات گردوغبار تحت شرایط مختلف جوی و فرآیند رسوب ذرات گرد و غبار. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۶۴-۲۵۱: ۸(۲).

[۱۴] جمشید اصلی د، عباسی ع (۱۳۹۲) شبیه‌سازی عددی دوفازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها در میکرو چاه حرارتی با استفاده از مدل مخلوط همگن. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۶۳-۵۱: ۳(۲).

[۱۵] پرواز ف، رفعی ر، طالبی ف (۱۳۹۷) بررسی اثرات تغییر قطر لوله خروجی آئروسیکلون بر عملکرد آن در جریان دو فاز گاز و قطره. مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۵۳-۴۵: ۲(۲): ۴۸.

[۱۶] خالقی ح، صدوقی ا (۱۴۰۰) بررسی عددی پاشش اسپری اتانول و استون در محیط گازی. نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۷-۷: ۵۳(۵).

[17] ANSYS Inc (2013) ANSYS 14 CFX Userguide.

[۱۸] طاهریان غ، نیلی احمدآبادی م، ضابطیان م، کرباسی‌پور م (۱۳۹۳) بررسی دوبعدی جریان جابجایی آزاد حول یک استوانه افقی داغ غوطه ور در آب با استفاده از تکنیک PIV. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۱۷-۱۰۷: ۴(۱).

کاهش زاویه بین نازل‌ها با جابجا کردن ناحیه تمرکز، آن را از خروجی نازل دور می‌کند؛ همچنین در محدوده بررسی شده در این مطالعه، تغییر دبی گاز محافظ نیز اثری بر جریان پودر نداشت، به همین خاطر می‌توان در طی فرآیند پوشش‌دهی، دبی گاز حامل را افزایش داد. از نتایج حاصل شده از این مطالعه می‌توان برای تعیین کسر حجمی ذرات در حوضچه مذاب، افزایش بازدهی استفاده از پودر و انتخاب مکان مناسب قرارگیری قطعه کار و به طور کلی برای بهینه کردن فرایند پوشش‌دهی لیزر استفاده کرد.

## ۹- مراجع

- [۱] نبوی س، فرشیدیان فر ا، فرشیدیان فر م (۱۳۹۸) اساس لیزر و کاربرد آن در صنعت روز. مجله علمی مهندسی مکانیک ۷۱-۶۱: ۴(۴): ۲۸.
- [2] Toyserkani E, Corbin S (2005) *Laser Cladding*. 1st edn. CRC Press, Florida.
- [3] Tan H, Zhang F, Wena R, Chen J, Huang W (2012) Experiment study of powder flow feed behavior of laser solid forming. *Opt Laser Eng* 50(3): 391-398.
- [4] Liu J, Li L, (2005) Effects of powder concentration distribution on fabrication of thin-wall parts in coaxial laser cladding. *Opt Laser Technol* 37(4): 287-292.
- [5] Zekovic S, Dwivedi R, Kovacevic R (2007) Numerical simulation and experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition. *Int J Mach Tool Manu* 47(1): 112-123.
- [6] Wen SY, Shin Yc, Murthy JY, Sojka SE (2009) Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process. *Int J Heat Mass Tran* 52(25-26): 5867-5877.
- [7] Tabernero I, Lamikiz A, Ukar E, de Lacalle L, Angulo C, Urbikain G (2010) Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *J Mater Process Tech* 210(15): 2125-2134.
- [8] Morville S, Carin M, Carron D, Le Masson P, Gharbi M, Peyre P, Fabbro R (2012) Numerical Modeling of Powder Flow during Coaxial Laser Direct Metal Deposition –Comparison between Ti-6Al-4V Alloy and Stainless Steel 316L. In: COMSOL Conference, Milan.