

# شبیه‌سازی عددی افشانه گرمایی پلاسمایی

زهرا عطاری<sup>۱</sup>، علی رضا گنجوئی\*<sup>۲</sup>، حسین قاضی‌زاده احسائی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده فوتونیک، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه

تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران

۲- عضو هیات علمی، پژوهشکده فوتونیک، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی

صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران

۳- کارشناس، پژوهشکده فوتونیک، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی

و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران

\*Ganjovi@kgut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۲۶)

## چکیده

پوشش‌هایی با کیفیت خوب به فهم مفصلی از اثرات گاز حامل روی افشانه پلاسما و رفتار ذره نیاز دارد. بنابراین، به عنوان یک پدیده مهم در پاشش پلاسمایی، تلاطم فشانه بوسیله جریان گاز حامل و ذرات و اثرات آن‌ها روی رفتار ذره به صورت محاسباتی و آزمایشگاهی بررسی می‌شود. بررسی آزمایشگاهی فرآیند افشانه پلاسما گرمایی مشکل است. بنابراین، برای آسان کردن فهم اثرات نرخ جریان گاز حامل روی خصوصیات افشانه پلاسما و ذره، شبیه‌سازی عددی دارای کاربرد زیادی است. در این مقاله، یک مدل سه بعدی افشانه پلاسما گرمایی به عنوان مخلوطی از آرگون-هیدروژن داخل اتمسفر ساکن به صورت عددی مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. اثر گاز حامل که به صورت عمودی تزریق می‌شود، بر رفتار ذره و گاز پلاسما مورد بررسی قرار گرفته است. ذرات به شکل کروی با اندازه میکرون مدل می‌شوند که برای توزیع آن‌ها مدل آماری گسسته در نظر گرفته می‌شوند. این مدل برای بررسی پدیده‌های فیزیکی ذرات از قبیل سرعت، دما، مسیر و همچنین اندازه ذره، ذوب و نوع گاز افشانه پلاسما و گاز حامل، جهت تأثیر بر عملکرد این فرآیند بسیار مفید است. با در نظر گرفتن گاز حامل با سرعت‌های خیلی پایین، بیشینه مقادیر سرعت و دمای سطح ذرات مشاهده شده‌اند.

## کلمات کلیدی:

افشانه گرمایی پلاسمایی، پردازش مواد، مدل‌سازی.

## ۱- مقدمه

اکثر قطعات مورد استفاده در صنایع و تکنولوژی جدید نیاز به پوشش‌های یک سری خواص حجمی و سطحی مشخص و متفاوت دارند. به ندرت دیده شده است که خواص حجمی و سطحی مورد نیاز را بتوان با انتخاب یک ماده تأمین کرد. لذا نیاز به عملیات سطحی و پوشش لازم وجود دارد. پاشش حرارتی نامی کلی از روش‌هایی است که برای ایجاد پوشش در سطح قطعات، با استفاده از ترکیبی

مخلوطی از گازهای آرگون و هیدروژن مدل‌سازی کردند [۱۲]. ماریوکس<sup>۱۱</sup> و واردلی<sup>۱۲</sup> شبیه‌سازی سه بعدی برای فرآیندهای افشانه پلازما انجام دادند و تبدیل انرژی در دهانه مشعل و توان الکتریکی به انرژی گرمایی را در نظر گرفتند. عموماً تعادل ترمودینامیکی، موضعی فرض می‌شود. بیشتر مدل‌های سه بعدی که تاکنون بررسی شده اند بر پایه فرضی هستند که ذره در طول پروازش در دمای یکنواخت می‌باشد و بعضی از مدل‌ها اثر ذرات روی گاز پلازما را نادیده می‌گیرند [۱۳-۱۴]. سلوان<sup>۱۳</sup> و راماچاندرا<sup>۱۴</sup> قدرت مشعل، ولتاژ قوس الکتریکی و بازده الکتروگرمایی را برای جریان‌های قوس الکتریکی و آهنگ‌های متفاوت جریان گاز اندازه گرفته و مدل عددی سه بعدی برای شبیه‌سازی قوس الکتریکی پلازما آرگون و هیدروژن را بررسی و اثر پارامترهای عمل‌کننده بر روی رفتارشان را مورد تحقیق قرار دادند [۱۵].

لیاورنگ<sup>۱۵</sup> افشانه پلاسمای سه بعدی برای کاربردهای پاشش را براساس شبیه‌سازی عددی مورد مطالعه قرار داد [۱۶]. پندر<sup>۱۶</sup> خصوصیات افشانه پلازما و برهم کنش آن با ذرات تزریق شده مورد استفاده برای پاشش پلاسمایی را بیان کرد [۱۷]. نوآوری‌های اخیر در پوشش‌های افشانه پلازما و معرفی مواد سرامیک نانو ساختار و همچنین حضور ذرات کاربید، انتظار افزایش قابلیت عایق بندی پوشش، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی را به وجود می‌آورد [۱۹-۲۰].

صالحی<sup>۱۷</sup> و همکارانش ذره‌های وارد شده از نوع زیرکونیوم در فرآیند افشانه پلاسمایی خلا را با استفاده از یک وسیله اندازه‌گیری اپتیکی تشخیص دادند [۲۱]. ویلیامسون<sup>۱۸</sup> یک تحقیق روی تمام پدیده‌هایی که ممکن است رفتارذرات در داخل پلازما را تحت تاثیر قرار دهند انجام و اثرات پارامترهای منحصر به فردی که رفتارذرات را تحت تاثیر قرار می‌دهند مورد مطالعه قرارداد [۲۲].

در این مقاله، از یک مدل محاسباتی برای بررسی تلاطم افشانه پلازما توسط گاز حامل و ذرات به صورت عددی شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین اثرات گاز حامل روی

از انرژی حرارتی و انرژی جنبشی انجام می‌گیرد. مواد اولیه مورد استفاده در این فرآیندها، به شکل پودر، سیم و یا میله است [۱-۳]. این فرآیند در سال ۱۹۱۰ در سوئیس ابداع شد [۴].

روش افشانه پلازما اتمسفری (APS) که یکی از مهمترین تکنیک‌های افشانه گرمایی می‌باشد، با پیچیدگی‌های مختلفی در صنعت مورد مطالعه قرار گرفته است. افشانه پلازما فرآیندی است که ذره داخل مشعل داغ تزریق شده، گرم می‌شود و به سمت زیر لایه شتاب می‌گیرد. فرآیندهای افشانه پلازما به طور عمیقی به تولید پوشش‌های فلزی و سرامیکی بنیادی متفاوت برای پوشش، خوردگی، مقاومت-فرسایش و حفاظت گرمایی، که دلیل آنها دمای نسبتاً بالای مشعل است می‌انجامد. این پوشش‌ها در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت، خودرو، فولاد، قدرت، نساجی و صنایع مدیریت از بین بردن زباله‌های سمی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین این کاربردها در حمل و نقل هوایی، دریایی، پزشکی، و زیست پزشکی نیز مشاهده شده است [۵-۷]. پاولوسکی<sup>۱</sup> یک بررسی جامع از تکنیک‌های مختلف کاربرد پوشش‌های افشانه گرمایی، شامل محدوده معمول از پارامترهای مربوط به پردازش مواد که استفاده شده است را فراهم کرد [۸]. هانگ بیگ<sup>۲</sup> و زنگ<sup>۳</sup> رفتار تلاطمی افشانه پلازما و همچنین اثرات آن روی رفتار ذره وارد شده را بررسی کردند [۹].

درک مناسبی از اثرات گاز حامل در افشانه پلازما و رفتار ذرات، برای کنترل و طراحی فرآیند افشانه پلازما مطلوب است. احمد<sup>۴</sup> برگمن<sup>۵</sup> ذرات سرامیک در افشانه پلازما Ar-H<sub>2</sub> که در یک مدل سه بعدی با کد محاسباتی تجاری فلوئنت عکوپل شده است را مطالعه کردند [۵]. لی<sup>۶</sup> و چن<sup>۸</sup> یک مدل محاسباتی سه بعدی که قادر به بررسی تزریق گاز حامل متقاطع و اثرات آن روی رفتار افشانه پلازما و مسیرهای ذرات است را توسعه داده‌اند [۱۰]. رمش<sup>۹</sup> یک آنالیز دینامیک سیال محاسباتی سه بعدی روی رفتار ذره وارد شده در طول فرآیند پاشش پلازما با تزریق ذره را بررسی کرد. در این بررسی گازهای پلازما آرگون و هیدروژن و گاز حامل را نیتروژن و ذرات ورودی را زیرکونیوم در نظر گرفت [۱۱]. برگمن<sup>۱۰</sup> و همکارانش یک افشانه پلازما را با

همچنین خصوصیات انتقال و ترمودینامیکی جریان مخلوط (ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی) بر پایه کسر مولی محاسبه می‌شود:

$$F = \sum_i \frac{X_i F_j}{\sum_j X_i \phi_{ij}} \quad (2)$$

که در آن  $F$  بیان‌کننده ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی می‌باشد. همچنین

$$\phi_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\gamma} \left( \frac{M_{w,j}}{M_{w,i}} \right)^{\gamma} \right]^{\gamma}}{\left[ 1 + \left( \frac{M_{w,j}}{M_{w,i}} \right)^{\gamma} \right]^{\gamma}} \quad (3)$$

و  $X$  کسر مولی گونه  $i$  است.

خصوصیات فیزیکی گرمای ویژه مخلوط بر پایه کسر جرمی می‌باشد:

$$C_p = \sum_i Y_i C_{p,i} \quad (4)$$

۲- تخلیه الکتریکی در حالت پایدار است.

۳- یونیزاسیون پلاسمای واکنش‌های شیمیایی اتفاق نمی‌افتد.

۴- سیستم در حالت پایدار با نوسانات تلاطم است.

۵- ترکیبات پلاسمای در تعادل ترمودینامیکی است.

۶- واکنش شیمیایی در محیط پلاسمایی سیستم افشانه اتفاق نمی‌افتد.

## ۲-۲- حوزه محاسباتی و شرایط مرزی

شکل ۱ حوزه محاسباتی بکار گرفته شده برای شبیه‌سازی عددی افشانه پلاسمای را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی براساس دامنه محاسباتی سه بعدی در سیستم مختصات استوانه‌ای  $(r, \theta, z)$  در نظر گرفته شده است. شعاع منطقه محاسباتی ۵۰ میلی‌متر و فاصله هدف با افشانه پلاسمای (L<sub>pld</sub>) ۱۰۰ میلی‌متر و  $2\pi$  در جهت دایروی در نظر گرفته شده است. همچنین شعاع ورودی افشانه ۴ میلی‌متر است. قطر هیدرولیکی تزریق‌کننده گاز حامل و ذرات (۵/۵ میلی‌متر از خروجی نازل و ۵ میلی‌متر بالای محور نازل) ۱/۹ میلی‌متر است. شعاع هدف نیز ۲۵ میلی‌متر و پهنای هدف ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این نوع شبیه‌سازی از خنک‌کننده نیز استفاده

رفتار ذره وارد شده و افشانه پلاسمای بررسی شده است. این مدل که دارای یک هندسه سه بعدی است به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی شده است. اثر گاز حامل که یک پارامتر مهم می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت و دمای گاز پلاسمای به صورت یک پروفایل مشخص در نظر گرفته شده است در حالی که در کارهای انجام شده توسط دیگران، این سرعت و دما به صورت خطی فرض شده اند. همچنین توزیع جرمی ذره به صورت نمایی بیان شده است. گاز حامل با سرعت‌های خیلی پایین در نظر گرفته شده است و افزایش سرعت آن تا بیشینه سرعت و دمای سطح ذرات پیش رفته است.

## ۲- تعریف پارامترها

### ۲-۱- مدل افشانه پلاسمای

جریان افشانه پلاسمای به عنوان یک جریان فشرده، چند ترکیبی، متلاطم با این فرض که این جریان در تعادل ترمودینامیک موضعی ثابت باشد، شبیه‌سازی شده است. یک مدل قابل تحقق  $k-\epsilon$  جهت محاسبه خصوصیات تلاطمی افشانه پلاسمای بکار برده شده است. جریان با استفاده از روش حجم محدود و کمک‌گیری از الگوریتم سیمپل<sup>۲۰</sup> مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است [۲]. حل معادلات با استفاده از روش حل غیرهمزمان در نرم‌افزار فلوئنت انجام می‌شود.

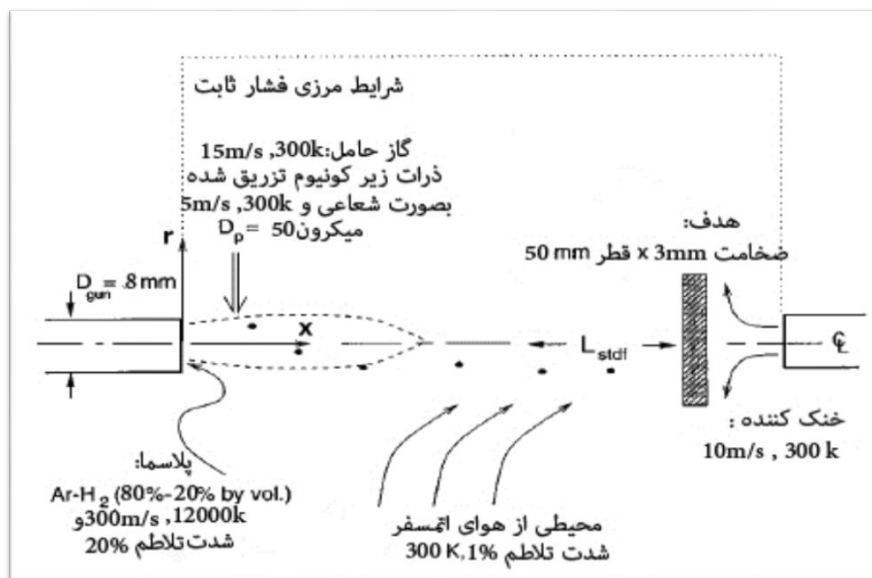
در اینجا یک جریان تلاطم با فرض‌های زیر که شامل بیش از یک گونه شیمیایی (جریان مخلوط) می‌باشد، شبیه‌سازی می‌شود. (در جریان مخلوط ترکیبات پلاسمای (آرگون- هیدروژن) و هوا در نظر گرفته شده است)

۱- چگالی همه گونه‌های یک سیال مخلوط با قانون گاز ایده آل مدل شده است:

$$\rho = \frac{p_{op}}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}} \quad (1)$$

که در آن،  $R$  ثابت جهانی گاز،  $Y_i$  کسر جرمی گونه  $i$ ،  $M_{w,i}$  وزن ملکولی گونه  $i$ ،  $p_{op}$  فشار عملیاتی گاز زمینه می‌باشد.

گردیده که شعاع آن همانند شعاع ورودی می‌باشد و در فاصله ۲۰ میلی متر از پشت هدف قرار گرفته است.



شکل (۱): هندسه محاسباتی برای شبیه‌سازی افشانه پلاسما

فشار صفر است. پلاسمایی که اینجا استفاده شده است پلاسمای آرگون-هیدروژن به نسبت ۲۰:۸۰ می‌باشد که شرایط اولیه آن در جدول ۱ آمده است. ذراتی که در شبیه‌سازی بکار می‌روند ذرات پوشش دهنده زیرکونیم هستند که خصوصیات فیزیکی و گرمایی آن در جدول ۲ نشان داده شده است [۵]. همچنین خصوصیات گاز آرگون در جدول ۳ ارائه شده اند.

جدول (۱): خصوصیات فیزیکی افشانه پلاسما

متغیرها	سرعت	دما
پلاسما	۳۰۰ m/s	۱۲۰۰ K
خنک کننده	۱۰ m/s	۳۰۰ K
گاز حامل	۵-۱۵ m/s	۳۰۰ K
دیوار پلاسما		۷۰۰ K

جدول (۲): خصوصیات زیرکونیم

$C = 620 \text{ J / kg - K}$	$k = 21.4 \text{ W / m - K}$
$\rho = 5700 \text{ kg / m}^3$	$T_{is} = 2980 \text{ K}$

شرایط مرزی ورودی، روی سرعت<sup>۲۱</sup> است و شرایط دیگر به صورت مرز باز<sup>۲۲</sup> تعریف شده اند. یعنی هوا نیز در حوزه محاسباتی وارد می‌شود. فشار اتمسفر استاندارد و دما ۳۰۰ و تلاطم ۱٪ مشخص می‌شود. دمای دیوار خنک کننده نیز مانند شرایط آزاد در نظر گرفته می‌شود. در مناطق جایی که جریان مخلوط پلاسما-هوا بیرون حوزه محاسباتی باشد برای همه متغیرها گرادیان صفر فرض می‌شود. همچنین به علت کمبود جزئیات فیزیکی، محاسبات بالا روی یک سطح تلاطم بالا حساب می‌شود که در اینجا شدت تلاطم در ورودی ۲۰٪ محاسبه می‌شود. دیوار افشانه به علت جلوگیری از دست دادن گرما از نازل، بی درو فرض می‌شود. دیوار قسمت تزریق کننده فرض می‌شود که ساختاری از مواد غیر هدایت گرمایی داشته باشد. هدف از جنس استیل با  $k=25.4 \text{ W/m-k}$  (در ۱۰۰۰ K) در نظر گرفته شده است. همچنین، در این مدل تغییرات دمایی روی هدف نیز بررسی می‌شود.

شبکه محاسباتی دارای شبکه بندی های منظم می باشد که این شبکه بندی به سمت داخل ریزتر می شود. اگر جریان منطقه محاسباتی را در مرزها ترک کند، گرادیان تمام متغیرها به غیر از

$$[\sigma] = (\mu + \mu_t) [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] + (\lambda + \lambda_t) \nabla \cdot \vec{u} \quad (9)$$

که در آن  $\mu$  ویسکوزیته ملکولی،  $\mu_t$  ویسکوزیته تلاطم،  $\lambda = -2\mu/3$ ،  $\lambda_t = -2\mu_t/3$  و  $I$  ماتریس واحد است. مدل تلاطم  $\varepsilon - k$  برای محاسبه اثرات تلاطم بکار می‌رود. در معادله ۸،  $\vec{q}$  بردار شار گرما است،  $\varepsilon$  نرخ پراکندگی ویسکوزیته،  $\dot{Q}_p$  نرخ انرژی داخلی به علت واکنش‌های شیمیایی،  $\dot{Q}_p$  نرخ گرمای تلف شده به علت تابش،  $\dot{Q}_p$  چشمه و چاه گرما به علت تزریق ذرات است.

### ۳-۲- مدل تلاطم

شدت تلاطم به عنوان ریشه میانگین مربع نوسانات سرعت به سرعت میانگین تعریف می‌شود که می‌توان آن را از رابطه زیر به دست آورد:

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.116 (Re)^{-1/8} \quad (10)$$

که در آن  $Re$  عدد رینولدز<sup>۲۳</sup> است که بر پایه قطر هیدرولیکی به عنوان مشخصه طول محاسبه می‌شود.

به جای استفاده از مقادیر صریح برای  $K$  و  $\varepsilon$  از کمیت‌های بهتر مانند  $I$  و  $L$  استفاده می‌شود که به طور معمول از یک رابطه تجربی بدست می‌آید. بنابراین، شرایط مرزی ورودی برای مدل تلاطم، شدت تلاطم و مقیاس طول در نظر گرفته می‌شود.

رابطه بین انرژی جنبشی تلاطم،  $k$  و شدت تلاطم،  $I$  به شرح زیر است:

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (11)$$

که  $u_{avg}$  سرعت متوسط جریان است.

رابطه بین نرخ پراکندگی تلاطم،  $\varepsilon$  و مقیاس طول  $L$ ، به شرح زیر است:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L} \quad (12)$$

جدول (۳): خصوصیات گاز آرگون

وزن ملکولی	$39/94746 \text{ kg/kmol}$
چگالی	$1 \text{ kg/m}^3$
ویسکوزیته	$1/72e^{-0.5} \text{ kg/m-s}$
آنتالپی حالت استاندارد	$1/526847e^{+0.9} \text{ j/kgmol}$
آنتروپی حالت استاندارد	$1/662933 \text{ j/kgmol-k}$

### ۳- روش انجام محاسبات

#### ۳-۱- معادلات حاکم

در بخش زیر، با توجه به فرضیات بالا، معادله پیوستگی برای گونه  $i$ ، معادلات بقا جرم، اندازه حرکت و انرژی، که معادلات ریاضی فرآیند ترمودینامیکی و فیزیکی داخل افشانه پلازما را توصیف می‌کند و در این شبه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، نوشته شده است [۹]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \vec{u}) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + \dot{\rho}_i^c \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla \left( P + \frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla [\sigma] + F_p \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{u}) = -P \nabla \cdot \vec{u} - \nabla \cdot \vec{q} + \rho \varepsilon + \dot{Q}_c + \dot{Q}_R + \dot{Q}_p \quad (8)$$

در اینجا  $\nabla$  عملگر دیفرانسیلی برداری در مختصات استوانه‌ای است. در معادله ۵،  $\mathbf{J}_i$  شار جرم انتشار و  $\dot{\rho}_i^c$  نرخ تغییر چگالی به علت واکنش شیمیایی است.  $F_p$  در معادله ۷ بیان‌کننده چاه یا چشمه اندازه حرکت به علت تزریق ذرات است،  $k$  انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم است،  $\sigma$  تانسور تنش برشی ویسکوزیته است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

## ۳-۴- مدل ذره

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (15)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (16)$$

که در آن  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  ثابت های مربوط به محدوده های متفاوت از  $Re$  هستند که به وسیله مورسی<sup>۲۶</sup> و الکساندر<sup>۲۷</sup> داده شده است [۲۳].

## ۳-۶- معادله انرژی ذره

گرمایش و سرمایش ذره توسط شار خالص انتقال گرما بین ذرات و پلاسمای اطراف محاسبه می شود. معادله تعادل انرژی، که انتقال انرژی را از پلازما به ذره توصیف می کند و انرژی مورد نیاز برای گرمای ذره و گرمای نهان ذوب را مهیا می کند به شرح زیر است:

$$hA_p (T_\infty - T_p) = m_p c_p \frac{dT_p}{dt} + m_p H_{sf} \frac{d\xi}{dt} \quad (17)$$

در این معادله  $\xi$  کسر مایع است. ضریب انتقال گرما  $h$  با استفاده از راتزل<sup>۲۸</sup> و مارشال<sup>۲۹</sup> مورد بررسی قرار می گیرد [۲۴]:

$$Nu = \frac{hD_p}{k} = 2 + 0.6 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \quad (18)$$

## ۳-۷- پروفایل های سرعت و دما

در اینجا از دو نوع مدل سرعت و دما استفاده شده است:

۱- دما و سرعت ورودی پلازما و دمای دیواره محیط پلازما به شکل ثابت اعمال شود. (مقادیر آن در جدول ۱ ارائه شده است).

۲- دما و سرعت ورودی پلازما و دمای دیواره محیط پلازما به صورت پرو فایلی اعمال شود:

سپس در محور نازل ( $y=0$ )، سرعت و دمای محوری افشانه پلازما به صورت زیر است [۹]:

$$V(r) = V_{cl} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^m \right] \quad (19)$$

برای بکار بردن دینامیک ذره، فرضیات زیر انجام می شوند:

۱- برهم کنش ذره با ذره نادیده گرفته شده است. این فرض بر پایه این است که فاصله ذره- ذره ده برابر قطر ذره، برای پراکندگی یکنواخت ذرات داخل گاز می باشد.

۲- از نیروهای دیگر به جز نیروی درگ<sup>۲۴</sup> بر روی ذره صرف نظر شده است.

۳- انتقال گرمای تابشی بین پلازما و ذرات نادیده گرفته شده است.

## ۳-۵- معادله دینامیک ذره

نیروهای وارد بر ذره، حرکت ذره و مسیر را هدایت می کند. در مدل شبیه سازی عددی مسیر ذرات بوسیله نیروهای وارد بر ذره که در چارچوب مرجع لاگراتژی نوشته شده است، پیش بینی می شود. این نیرو، اینرسی ذره را با نیروی اعمالی روی ذره برابر می کند و می تواند به این صورت (در جهت x در مختصات دکارتی) نوشته شود:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u - u_p) + \frac{g_x (\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (13)$$

که در آن  $F_x$  شتاب اضافی (نیرو/واحد جرم ذره) می باشد که در اینجا از آن صرف نظر شده است و مقدار نیروی درگ است که بر پایه قانون استوک<sup>۲۵</sup>، برای کره محاسبه می شود.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (14)$$

در اینجا،  $U$  سرعت فاز سیال،  $U_p$  سرعت ذره،  $\mu$  ویسکوزیته ملکولی سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_p$  چگالی ذره و  $d_p$  قطر ذره است.  $Re$  عدد رینولدز نسبی است که به صورت زیر تعریف می شود:

برای در نظر گرفتن یک مدل ذوب و انجماد برای ذره، فرض می‌شود که ذره به صورت کروی باشد و همرفت داخل قسمت ذوب شده ناچیز باشد. ذره کروی بوسیله گاز پلاسمای اطراف (شرایط موضعی) توسط همرفت گرم می‌شود. سپس توزیع دما در داخل ذره بوسیله هدایت گرمایی تعیین می‌شود که می‌توان آن را از رابطه زیر بدست آورد [۹]:

$$\rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_p r^2 \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \rho_p \frac{\partial b}{\partial t} \quad (23)$$

که در آن زیرنویس  $p$ ، ذره را بیان می‌کند و خصوصیات  $k_p$ ،  $c_p$ ،  $\rho_p$  مقادیر موضعی را می‌گیرند. اگر چه می‌توان آنها را برای سادگی به صورت کسری از دما و فاز در نظر گرفت، اما فقط اجازه تغییر فاز در مدل وجود دارد. به علت اینکه ذرات می‌توانند در طول پرواز تغییر فاز را تجربه کنند، فرآیندهایی از قبیل ذوب، انجماد، مرزهای تغییر-فاز داخلی به جای سطح ذره وجود دارد. مرز تغییر-فاز می‌تواند یا به عنوان یک منبع گرما یا به عنوان یک شرایط مرزی برای سیستم هدایت گرما رفتار کند. ترجیح داده شده که آن به عنوان یک مرز اضافی بین دو حوزه فاز متفاوت رفتار کند. تعداد مرز تغییر-فاز به توزیع دما داخل ذره بستگی دارد. شرایط مرزی برای ذوب جزئی ذره در مرکز و سطح آن در زیر آورده شده است:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (24)$$

$$\pi D^2 k_p \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=D/2} = \dot{Q}_{conv} \quad (25)$$

در معادله بالا،  $h$  شعاع ذره است. نرخ شار گرما در سطح ذره توسط همرفت به صورت  $\dot{Q}_{conv} = \pi D^2 h (T_\infty - T_w)$  است که در اینجا از شار گرما به عنوان تابش و تبخیر صرف نظر شده است و در آن  $h$ ، از عدد ناسلت<sup>۳۱</sup> بدست می‌آید.

$$T(r) = (T_{cl} - T_w) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^n \right] + T_w \quad (20)$$

که  $T_d$  و  $V_d$  بیشینه مقادیر از سرعت و دمای پلازما هستند در حالی که  $T_w$  دمای دیوار است.

در اینجا،  $n=6$  و  $m=1/2$ ،  $T_d=1200K$ ،  $V_d=300m/s$  است. همچنین سرعت روی دیواره پلازما به صورت تابعی از فاصله در نظر گرفته می‌شود [۲۵]:

$$T_w = 700 - 400 \frac{\ln(r/R_{in})}{\ln(R_{in}/R_{out})} \quad (21)$$

### ۳-۸- توزیع اندازه ذره

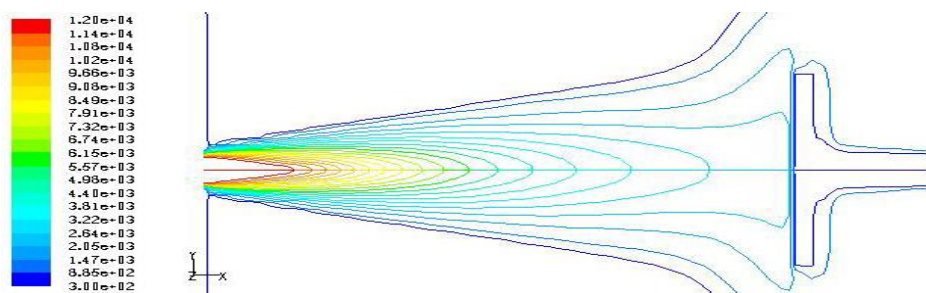
در اینجا اندازه ذرات ثابت نیست و به جرم آنها بستگی دارد. توزیع جرمی ذرات از توزیع روسین-راملر<sup>۳۰</sup> پیروی می‌کند [۲۶]. یک رابطه نمایی بین قطر ذره  $D$ ، و کسر جرم  $M_D$  برای قطره‌های ذره بزرگتر از  $D$  وجود دارد [۱۱]:

$$M_D = \exp \left[ - \left( \frac{D}{\bar{D}} \right)^n \right] \quad (22)$$

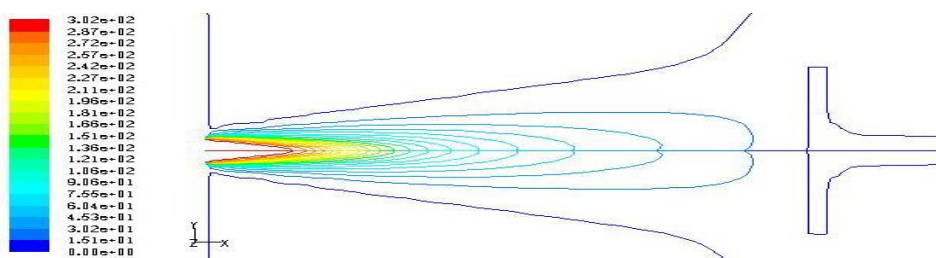
در این معادله  $\bar{D}$ ،  $n$  قطر میانگین و فاکتور گسترش می‌باشند. قطر میانگین و فاکتور گسترش برای محاسبات  $3/65$  و  $2/3486$  میکرومتر محاسبه شده است که برای سه نوع قطر ذره ( $30\mu m$ ،  $50\mu m$ ،  $70\mu m$ ) استفاده می‌شود.

### ۴- ذوب

در شبه‌سازی عددی انجام شده، ذرات به طور مجزا در روش لاگرانژ در نظر گرفته می‌شوند. در این روش ذرات در یک نقطه تزریق می‌شوند و سپس در طول پروازشان تعقیب می‌شوند. در این شبه‌سازی، در صورتی که مدل ذره به طور مناسب در نظر گرفته شود، با حل معادلات گاز پلازما اطلاعاتی روی شرایط خارجی ذره مهیا می‌شود و می‌توان انتقال گرما و تغییر فاز داخل ذره را بر پایه این اطلاعات محاسبه نمود.



الف



ب

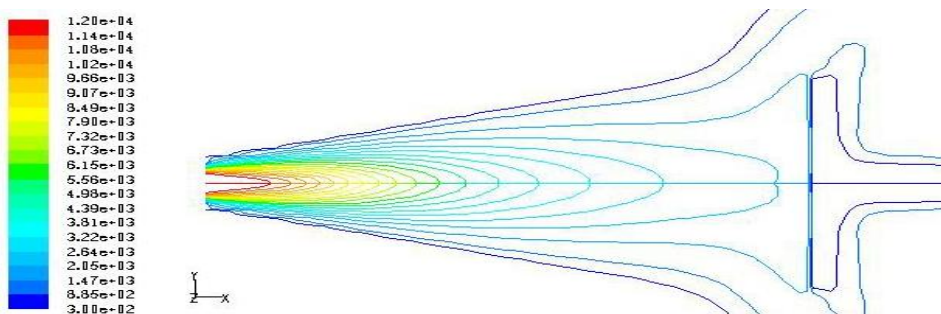
شکل (۲): توزیع دما برای افشانه پلاسما: (الف): بدون پروفایل، (ب): با پروفایل

پلاسما در نظر گرفته شده و بین آنها مقایسه ای انجام شده است که در شکل‌های ۲ و ۳ این مقایسه نشان داده شده است.

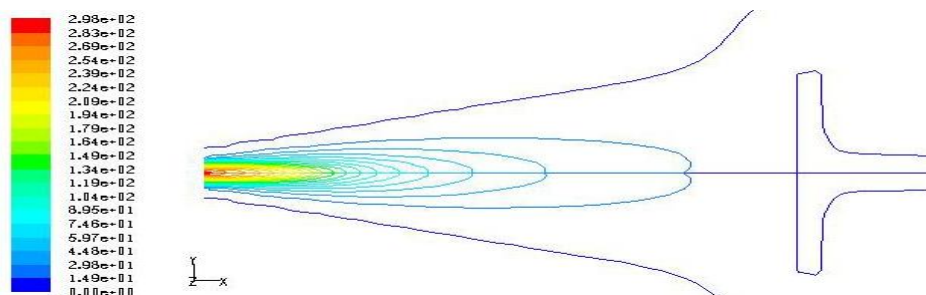
### ۵- نتایج و بحث

#### ۵-۱- افشانه پلاسما

در اینجا نتایج بدست آمده از حل عددی معادلات مربوط به حل افشانه پلاسما مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در ابتدا سرعت و دما در دو حالت بدون پروفایل و با پروفایل برای ورودی



الف



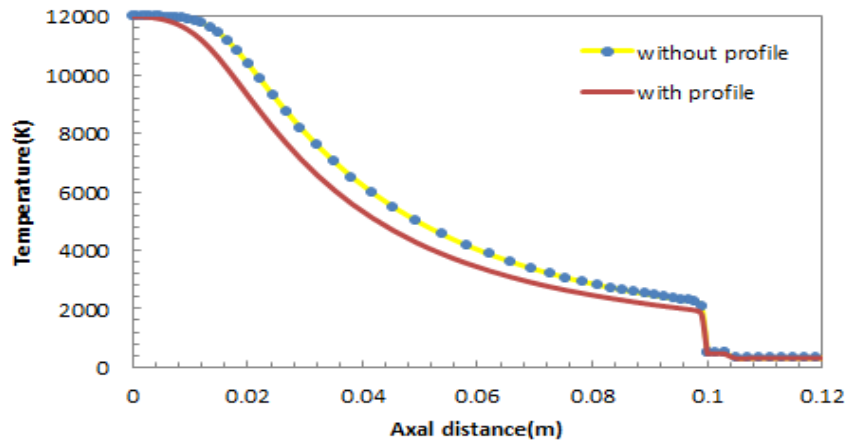
ب

شکل (۳): توزیع سرعت برای افشانه پلاسما: (الف): بدون پروفایل، (ب): با پروفایل

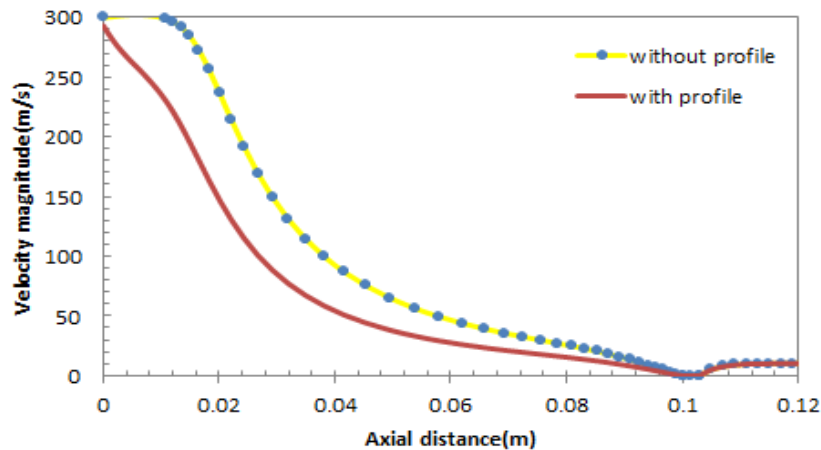


سرعت از این مکان خارج می‌شود. در انتها نیز مقایسه ای به صورت نموداری در شکل ۴ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود در قسمت ورودی پودر، میزان دما و سرعت در حالت پروفایل (معادلات ۱۹ و ۲۰) بیشتر از حالت عادی است که نشان دهنده ذوب بهتر ذره می‌باشد. ذره در این نقطه سریع به دمای ذوب خود می‌رسد و با



الف

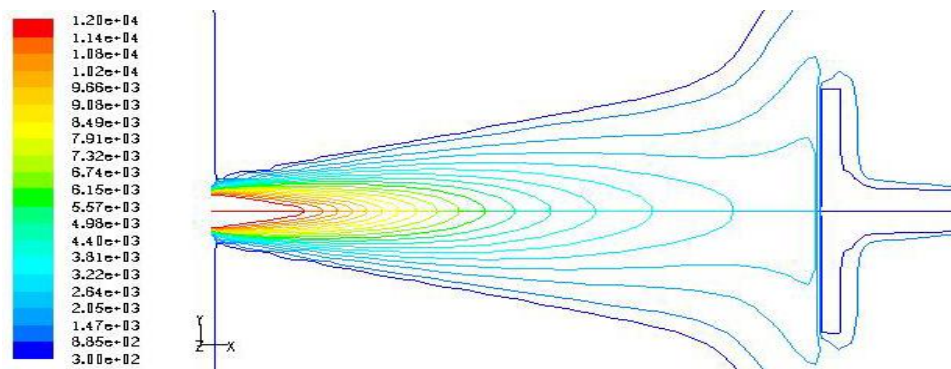


ب

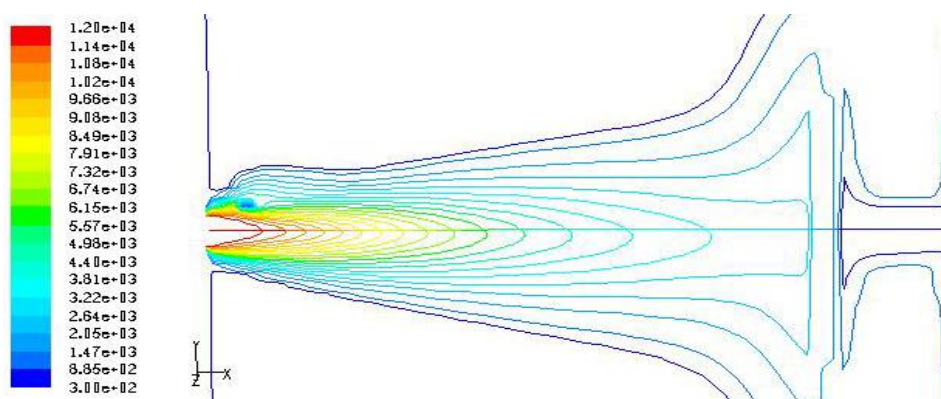
شکل (۴): مقایسه (الف): دما، (ب): سرعت بین دو حالت بدون پروفایل و با پروفایل

زیر لایه شده که این امر موجب می‌شود هنگام رسیدن به زیر لایه، حالت بهتری (حالتی بین ذوب و جامد-حالت خمیری) را برای پوشش سطح داشته باشد. همچنین ذره با سرعت کمتری با زیر لایه برخورد می‌کند که این امر موجب پوشش دهی با تخلخل کم‌تر است و در نهایت پوشش دارای کیفیت بالاتری خواهد بود.

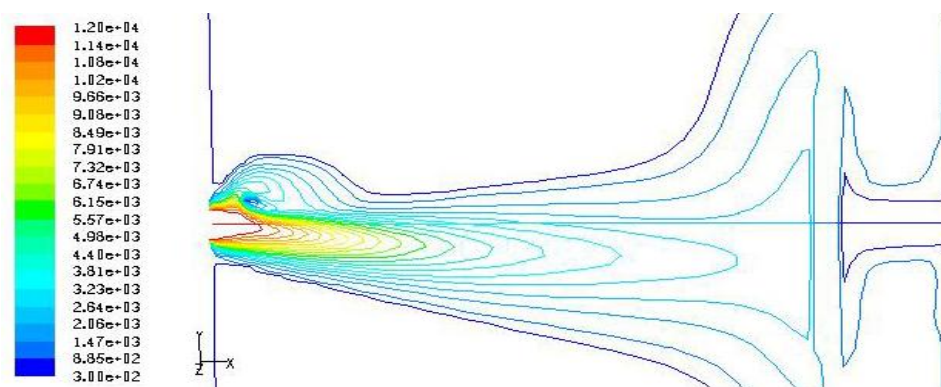
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در حالت پروفایلی (معادلات ۱۹ و ۲۰) دما و سرعت نسبت به حالت عادی بیشتر است. در حقیقت، در قسمت ورودی پودر دما و سرعت یک تیزی بیشتری نسبت به حالت عادی دارند که باعث ذوب سریعتر و سرعت بیشتری می‌شود، اما در طول پرواز سرعت و دمای ذره سریعتر کاهش پیدا می‌کند که باعث انجماد در فاصله دورتر از



الف



ب



ج

شکل (۵): توزیع دما برای افشانه پلاسما: (الف): بدون گاز حامل، (ب): گاز حامل با سرعت ۵ m/s، (ج): گاز حامل با سرعت ۱۵ m/s

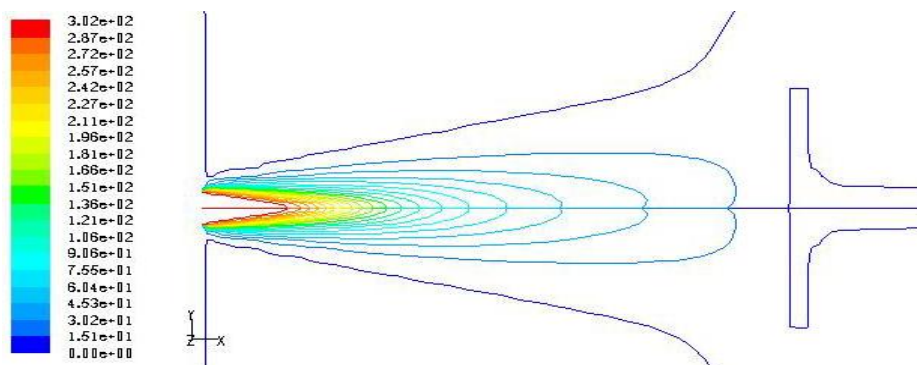
گیرند. قانون درگ اعمال می‌شود و ذرات با سرعت مشخص وارد افشانه پلاسما می‌شوند.

در ابتدا توزیع دما و سرعت در حالت بدون گاز حامل و گاز حامل با سرعتهای ۵ m/s و ۱۵ m/s در شکل‌های ۵ و ۶ رسم

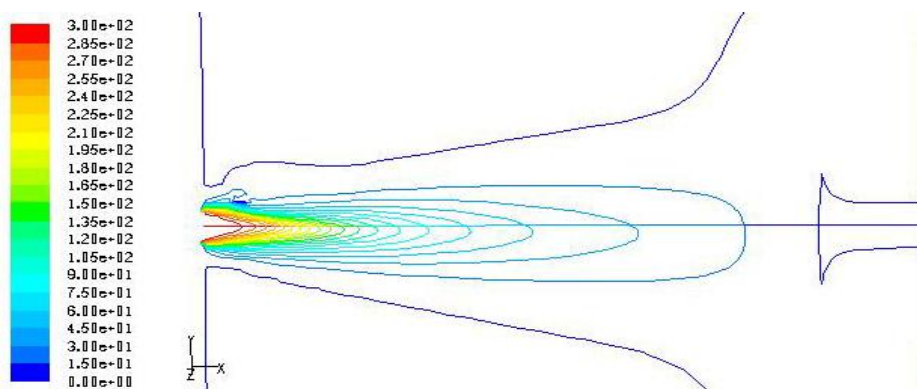
#### ۲-۵- اثرات گاز حامل روی افشانه پلاسما

در این قسمت، نتایج مربوط به جریان پلاسما همراه با اثر گاز حامل ارائه شده‌اند. سرعت و دمای مشخص شده برای قسمت دوم، در شرایطی که ذرات وارد می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌

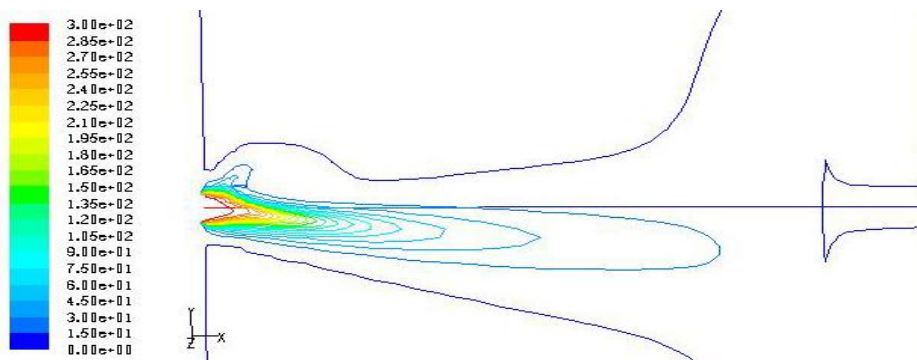
شده اند. در این قسمت، اثرات گاز حامل روی افشانه پلازما مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع در اینجا انحراف گاز پلازما از حالت اولیه مد نظر می باشد.



الف



ب



ج

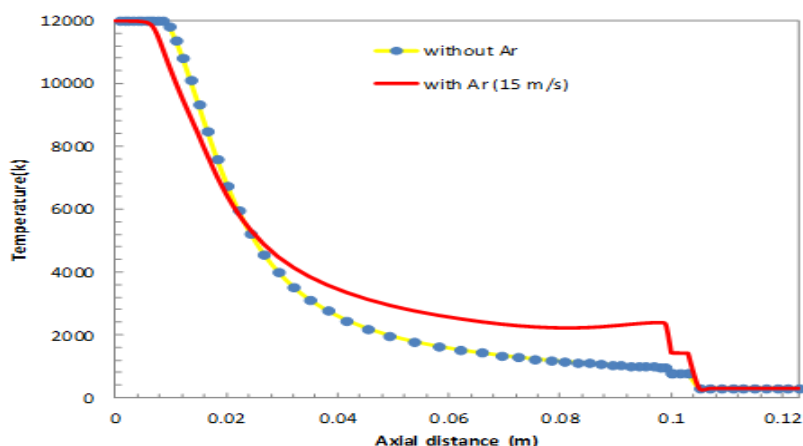
شکل (۶): توزیع سرعت برای افشانه پلازما: (الف): بدون گاز حامل، (ب): گاز حامل با سرعت ۵ m/s، (ج): گاز حامل با سرعت ۱۵ m/s

مطابقت دارد [۵]. اثر گاز حامل روی جریان افشانه پلازما به سرعت گاز حامل، موقعیت تزریق و شرایط پلازما بستگی دارد. در حالتی که سرعت گاز حامل پایین است، این انحراف بسیار کوچک می باشد و با افزایش سرعت گاز حامل این انحراف

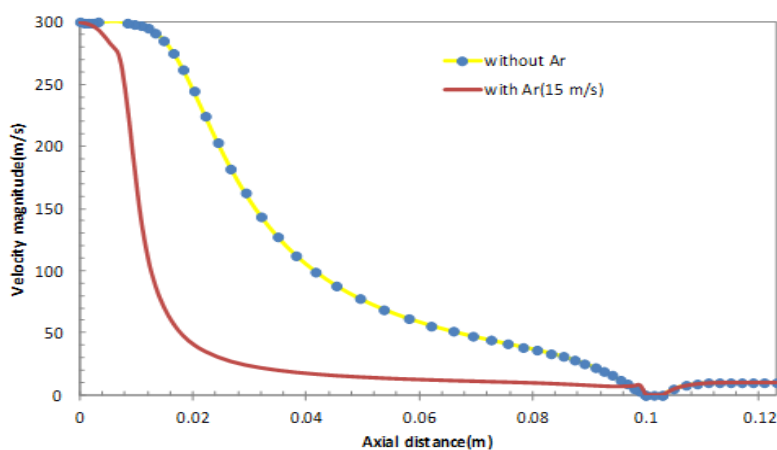
مقایسه نتایج (بدون گاز حامل و گاز حامل) نشان می دهد که خطوط هم دما در حالت وجود گاز حامل متقارن نیست و از خط مرکزی منحرف می شود که دلیل آن تاثیر گاز حامل بر روی افشانه پلازما می باشد، که با نتایج کار احمد و برگمن

می‌شود که این امر باعث افزایش توانایی نگهداری دمای مخلوط می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود سرعت نسبت به حالت بدون گاز حامل با افت بیشتری روبرو است. دلیل آن می‌تواند برهم‌کنش‌های زیاد بین گازها باشد که باعث کاهش سرعت گازها می‌شود. همچنین، به دلیل سنگینی گاز، سرعت کاهش می‌یابد.

افزایش می‌یابد. در واقع بین سرعت گاز حامل و انحراف گاز پلاسما رابطه‌ی مستقیمی وجود دارد. علاوه بر این، مقایسه بین سرعت و دما در موقعیت محور مرکزی جریان پلاسما برای دو حالت با گاز حامل  $15 \text{ m/s}$  و بدون گاز حامل در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار دما با ورود گاز حامل نسبت به حالت بدون گاز حامل بیشتر می‌شود. مخلوط شدن دو گاز باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی



الف



ب

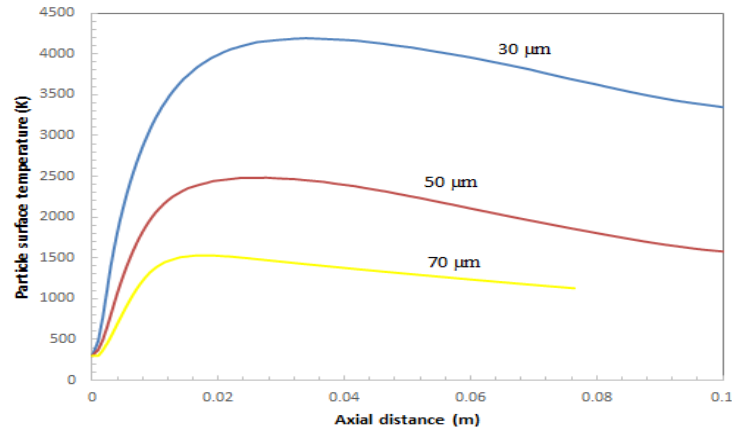
شکل (۷): مقایسه: (الف): دما، (ب): سرعت بین دو حالت بدون گاز حامل و گاز حامل با سرعت  $15 \text{ m/s}$

گرفته، دیده می‌شود که دما و سرعت ذرات با اندازه مختلف به طور گسترده‌ای متفاوت است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه ذره، سرعت و دمای سطح آن کاهش پیدا

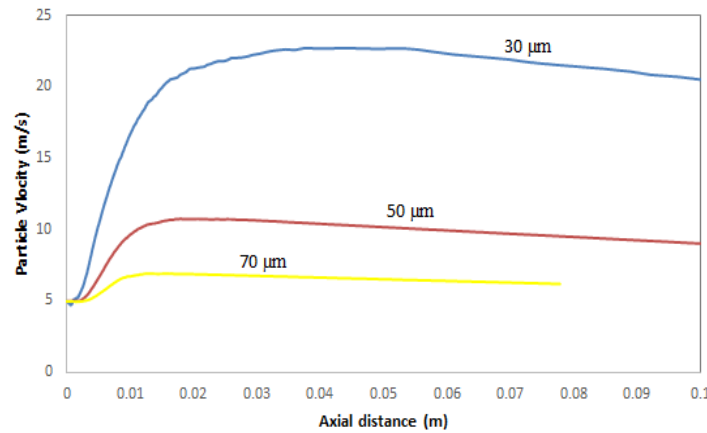
### ۵-۳- اثرات گاز حامل روی رفتار ذرات تزریق شده

در ابتدا مقایسه‌ای برای دمای سطح و سرعت ذره‌ها برای سه اندازه مختلف ( $30 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $70 \mu\text{m}$ ) در شکل ۸ ارائه شده است. براساس مقایسه‌ای که بر روی دمای ذره و سرعت صورت

می‌کند که این روند در کار احمد و برگمن نیز قابل مشاهده است [۲۰].



الف



ب

شکل (۸): (الف): دمای سطح ذره، (ب): سرعت ذره برای سه ذره با اندازه‌های مختلف ( $30\mu\text{m}$ ,  $50\mu\text{m}$ ,  $70\mu\text{m}$ ) بدون گاز حامل

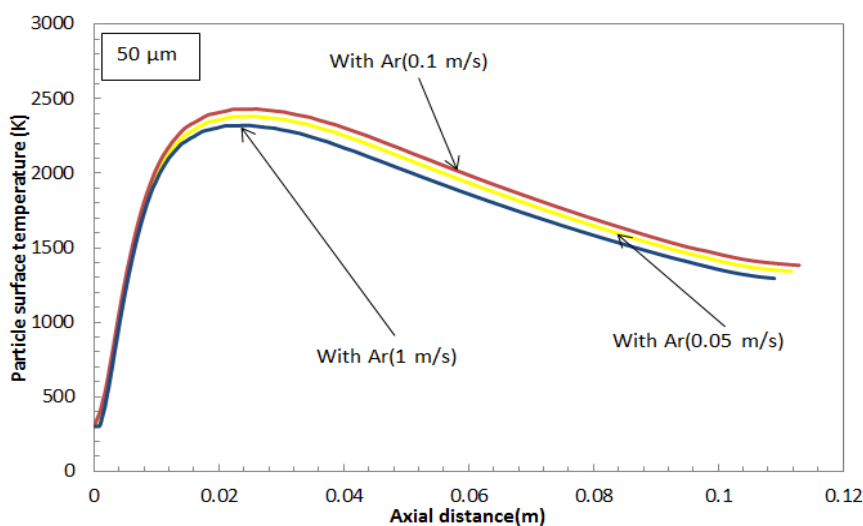
جریان گاز حامل وابسته است. در ابتدا با افزایش سرعت گاز حامل تا بیشینه  $0.1\text{ m/s}$ ، دمای سطح ذره افزایش می‌یابد و بعد از آن با افزایش بیشتر سرعت گاز حامل، دمای سطح ذره کاهش می‌یابد. بررسی سرعت ذره با سرعت‌های متفاوت برای گاز حامل نیز حاوی نتایج جالب توجهی است. در اینجا نیز در ابتدا با افزایش سرعت گاز حامل تا بیشینه  $0.05\text{ m/s}$ ، سرعت ذره افزایش می‌یابد و بعد از آن با افزایش بیشتر سرعت گاز حامل، سرعت ذره کاهش می‌یابد که روند آن مطابق با کار رمش و همکارانش می‌باشد [۱۱]. دلیل وجود چنین رفتاری را می‌توان به این صورت بیان کرد که وقتی سرعت گاز حامل خیلی پایین

#### ۵-۴- سرعت پایین گاز حامل

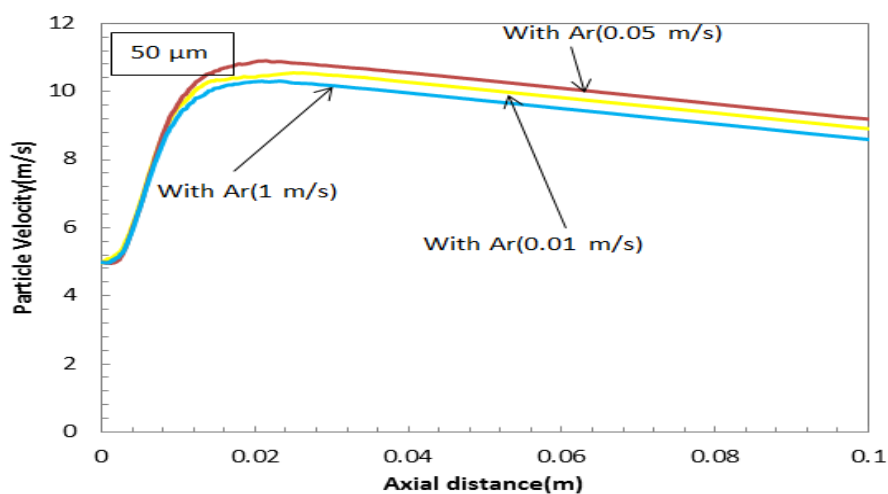
در این قسمت ذرات همراه با سرعت‌های گاز حامل گوناگون وارد شده و دما، سرعت و مسیر آن‌ها با هم مقایسه شده است. برای بررسی اثرگذاری گاز حامل بر روی ذره تزریق شده، ابتدا مقایسه‌ای برای ذره با اندازه  $50\mu\text{m}$  میکرومتر برای سه حالت گاز حامل با سرعت‌های  $0.1\text{ m/s}$ ،  $0.05\text{ m/s}$  جهت بررسی دمای سطح ذره و گاز حامل با سرعت‌های  $0.1\text{ m/s}$ ،  $0.05\text{ m/s}$  جهت بررسی سرعت ذره در نظر گرفته و نتایج این بررسی در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای سطح و سرعت ذرات به طور قوی به سرعت

نمی‌کنند، در نتیجه، یک دما و سرعت پایین برای ذرات به دست می‌آید و زمان مقاومت پایین تری را داخل مرکز مشعل پلاسما تجربه می‌کنند. بنابراین، با افزایش گاز حامل، کاهش می‌یابد.

باشد اثر کمتری روی ذرات دارد و در نتیجه داخل مشعل پلاسما باقی می‌ماند. بنابراین، دما و سرعت سطح ذره بالا باقی می‌ماند و با افزایش گاز حامل افزایش می‌یابد تا به یک بیشینه می‌رسد. برای جریان گاز حامل با سرعت بالاتر، ذرات تحت تأثیر گاز حامل قرار می‌گیرند و داخل ناحیه مرکزی پلاسما نفوذ



شکل (۹): مقایسه دمای سطح ذره برای سه حالت با گاز حامل (۰/۰۵ m/s, ۰/۱ m/s, ۱ m/s) برای ذره با اندازه (۵۰ μm)



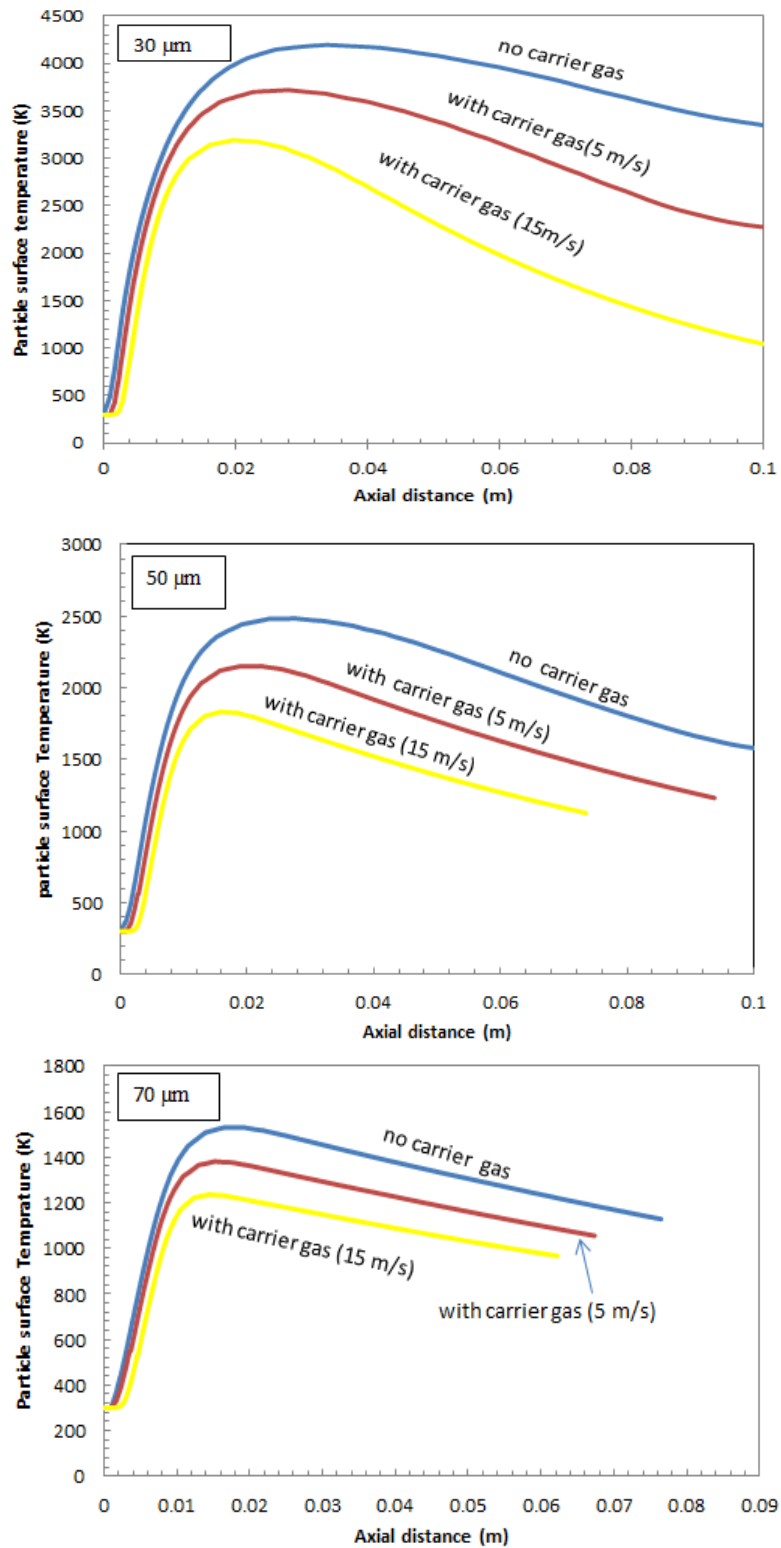
شکل (۱۰): مقایسه سرعت ذره برای سه حالت با سرعت گاز حامل (۰/۰۱ m/s, ۰/۰۵ m/s, ۱ m/s) برای ذره با اندازه (۵۰ μm)

همانطور که دیده می‌شود با افزایش سرعت گاز حامل، دمای سطح ذرات کمتر می‌شود. این نتایج برای گاز حامل با سرعت‌های بالا می‌باشد که با نتایج قبلی مطابقت دارد. همچنین این روند تغییرات با کار رمش و همکارانش تطابق خوبی دارد [۱۱]. در نهایت بعد از مقایسه ی سه منحنی در شکل ۱۱، نتیجه

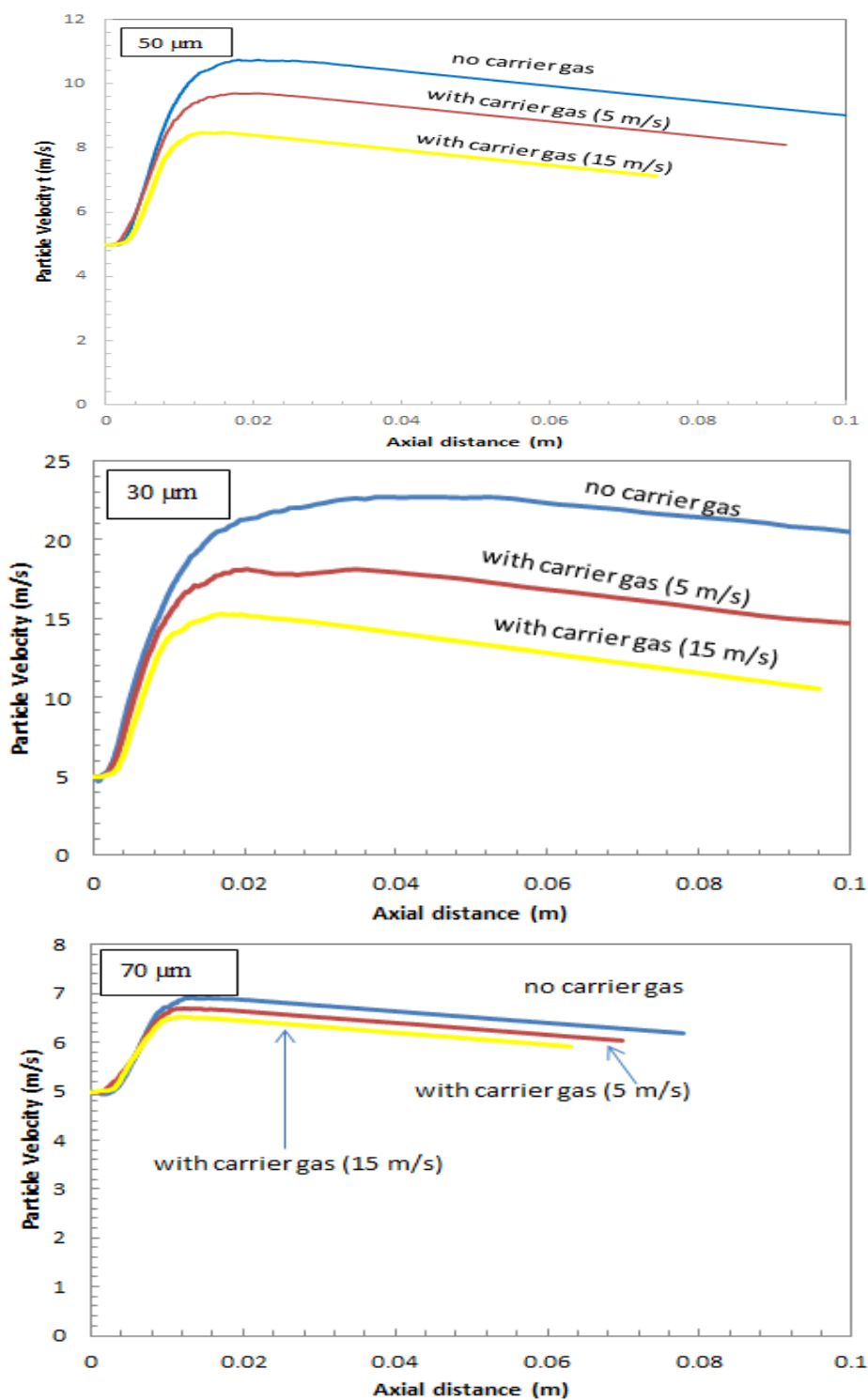
### ۵-۵- سرعت بالای گاز حامل

در ادامه، یک مقایسه برای سه ذره با اندازه های مختلف  $30\mu m$ ,  $50\mu m$ ,  $70\mu m$  برای سه حالت بدون گاز حامل، گاز حامل با سرعت‌های متفاوت  $5m/s$ ,  $15m/s$  برای دمای سطح ذره صورت گرفته و نتایج آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

گرفته می‌شود که برای ذرات با اندازه بزرگ، گاز حامل تاثیر چندانی ندارد. در نهایت، مطالعه ای مشابه برای سرعت ذره در



شکل (۱۱): مقایسه دما سطح ذره برای سه حالت با گاز حامل (۵m/s, ۱۵m/s) و بدون گاز حامل



شکل (۱۲): مقایسه سرعت برای دو حالت با گاز حامل (۵ m/s, ۱۵ m/s) و بدون گاز حامل

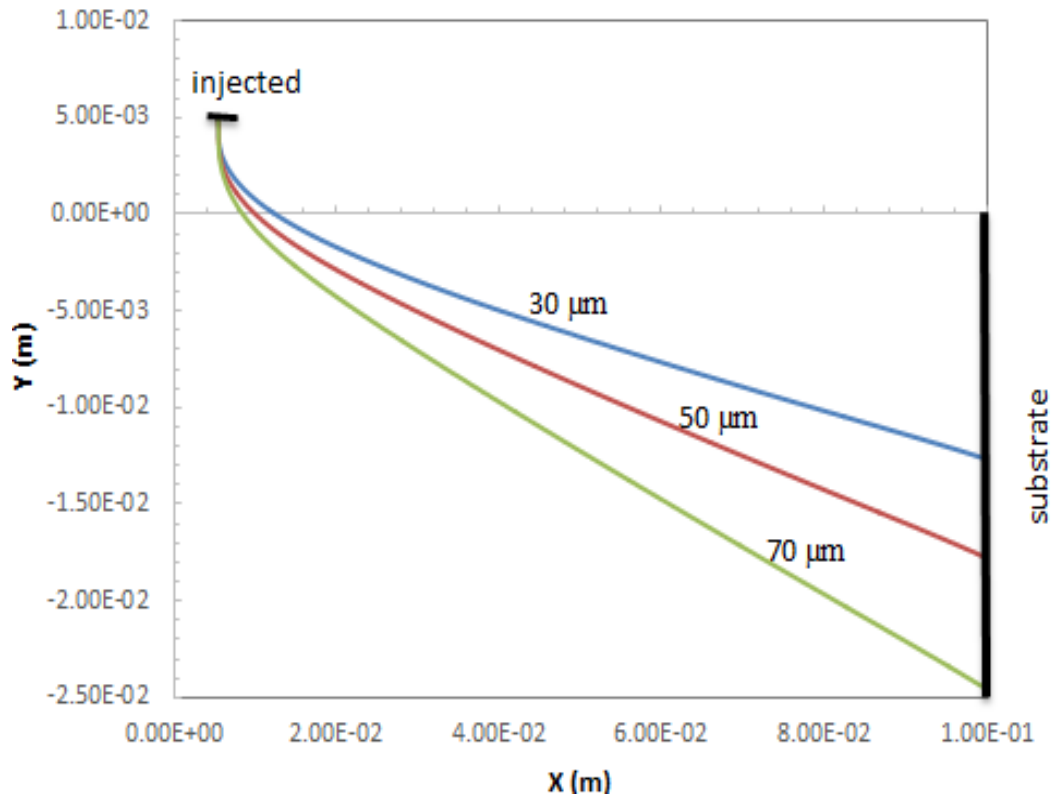
توزیع با سرعت یکسان منتشر می‌شوند، اما آنها را می‌توان براساس زمان رسیدن به هدف و همچنین بر طبق اندازه و

مسیر ذرات برای سه اندازه مختلف در حالت بدون تزریق گاز حامل در شکل ۱۳ آمده است. اگرچه همه ذرات از قسمت



بزرگتر از منطقه هسته عبور می‌کنند و در پایین‌ترین موقعیت به هدف برخورد می‌کنند. بنابراین پوشش بیشتر با ذرات کوچکتر امکان‌پذیر است. همانطور که انتظار می‌رود مسیر ذرات با کار احمد و برگمن مطابقت دارد [۵].

جرمشان طبقه‌بندی کرد. می‌توان ذرات را براساس تفاوت در نیروهای درگ که ذرات با اندازه‌های متفاوت تجربه می‌کنند و همچنین اندازه حرکت که هر ذره به سبب جرمش حمل می‌کند، تشریح کرد. ذرات کوچکتر قادر به نفوذ تا داخل هسته پلازما نیستند و در بالاترین موقعیت به هدف می‌رسند. ذرات

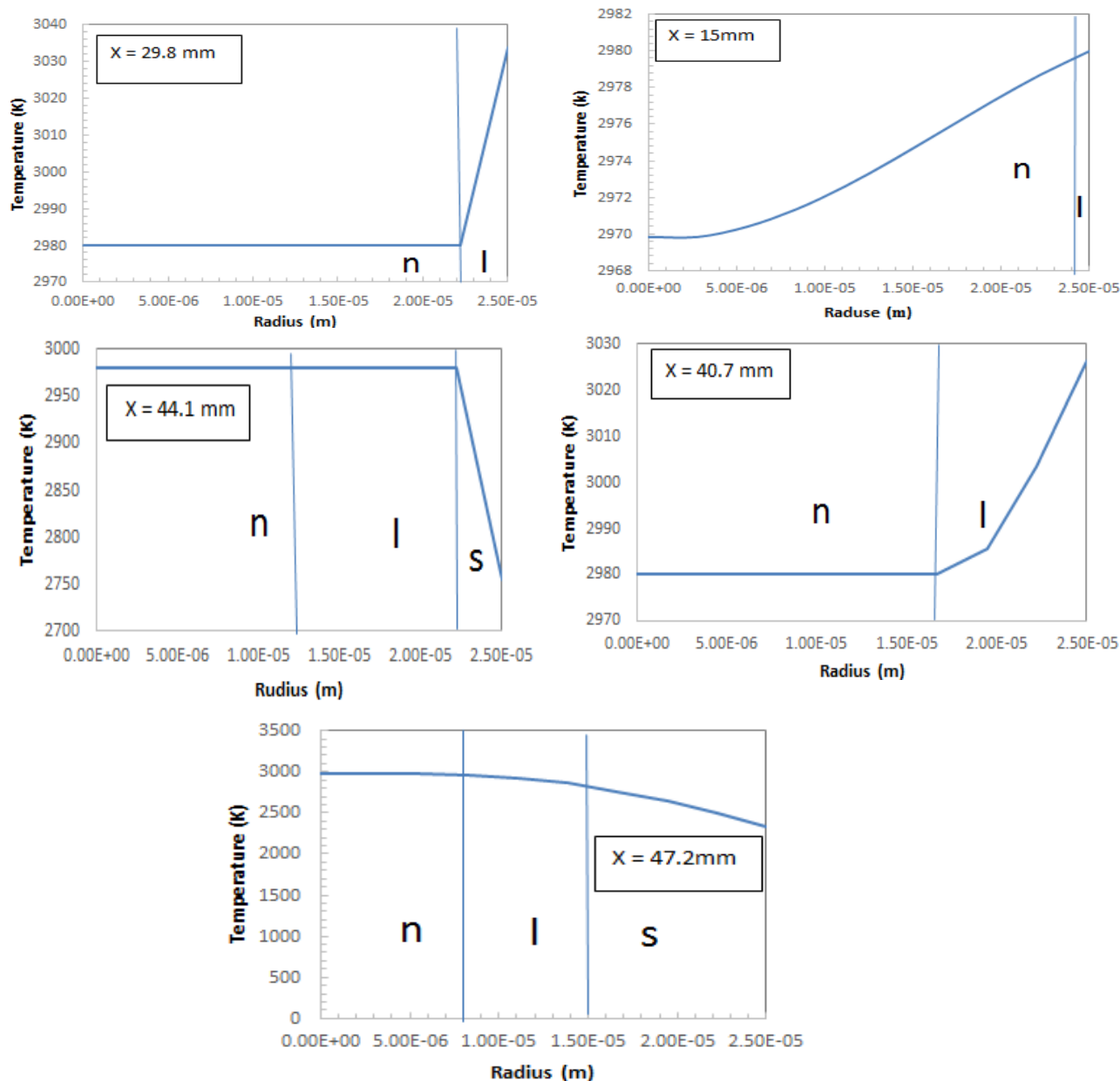


شکل (۱۳): میانگین مسیر برای سه ذره مختلف با گاز حامل

تا زمانی که ذره به  $x=44/1$  میلی‌متر برسد. در این نقطه، به دلیل ورود ذره به ناحیه ی پلازما با دما پایین، ذره شروع به انجماد می‌کند. یک مرز جامد-مایع دوم ظاهر شده و به سمت داخل شروع به حرکت می‌کند. از آنجا که تغییر فاز ثانویه مناطق درونی ذرات در یک حالت تقریباً هم‌دما می‌باشد، مرز اولیه برای باقی مانده مسیر ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، پوسته میانی مذاب بین هسته (که هرگز ذوب نمی‌شود) و پوسته جامد بیرونی (که نانو ساختار خود را از دست داده است) به دام می‌افتد. این تحقیق دارای نتایج مشابه با نتایج احمد و همکارانش می‌باشد [۵].

## ۶- ذوب ذره

در اینجا رفتار ذوب برای حالت بدون تزریق گاز حامل بررسی می‌گردد. پدیده ذوب و انجماد در شکل ۱۴ برای یک ذره ۵۰ میکرومتر که مسیر میانگینی از ۳۰۰ ذره را پیروی می‌کنند، نشان داده شده است. ذرات ۵۰ میکرومتر یک تاریخچه غنی در شرایط پدیده ذوب و انجماد دارند. بسیاری از این ذرات ذوب جزئی را تجربه می‌کند. علاوه بر این، وقتی که ذرات از مشعل پلازما داغ فاصله می‌گیرند، دوباره منجمد می‌شوند. هنگامی که ذرات وارد پلازما می‌شوند، گرم شده و مرز جامد-مایع (که به عنوان یک خط عمودی پیوسته نشان داده شده است) حرکت می‌کند

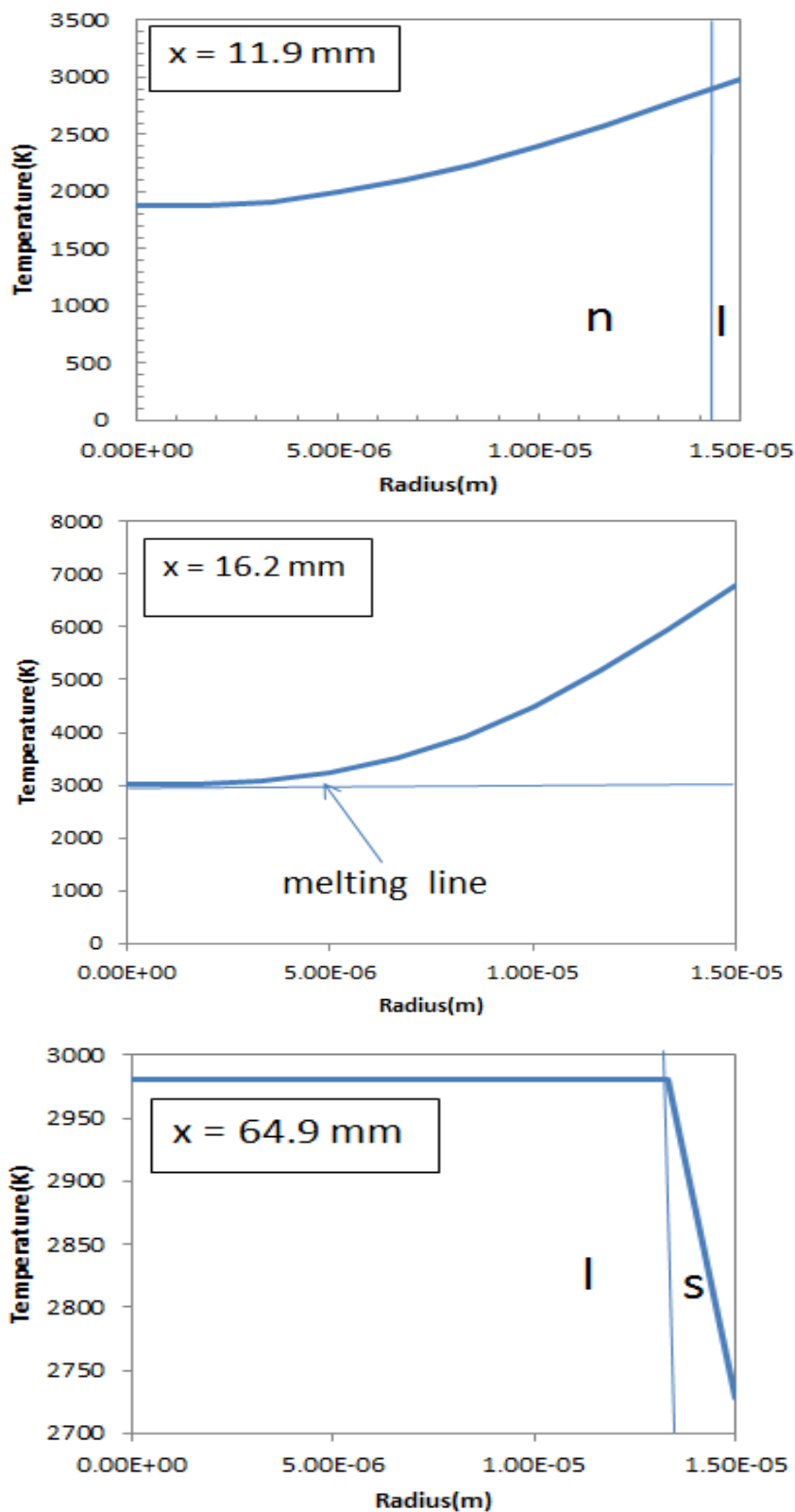


شکل (۱۴): تغییر فاز داخل یک ذره ( $50\mu m$ ) (بدون گاز حامل). خط عمودی سطح مشترک جامد-مایع با  $n$  نانو ساختار مواد،  $l$  ماده ذوب شده و  $s$  مواد انجماد

نشان می‌دهد

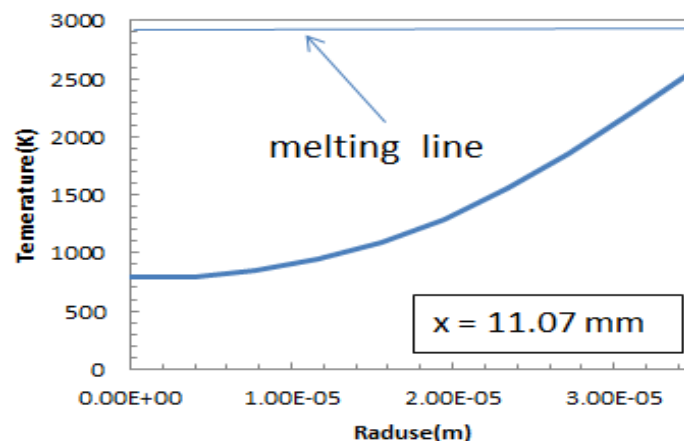
کامل در طول مسیر پروازشان ذوب باقی می‌مانند. همانگونه که در شکل ۱۶ دیده می‌شود ذرات  $70\mu m$  میکرومتر هرگز در طول مسیر پروازش ذوب نمی‌شوند (حتی به صورت جزئی). در نهایت، در شکل ۱۷، مقایسه دما برای سه ذره با اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد که با نتایج بالا همخوانی دارد.

همانطور که از شکل ۱۴ نتیجه می‌شود، ذره با اندازه  $50\mu m$  میکرو متر به طور جزئی ذوب می‌شود. به هر حال، ذوب جزئی مورد نظر است. بنابراین، این اندازه ذره برای ذوب مناسب می‌باشد. سپس برای ذره با اندازه‌های  $70\mu m$  و  $30\mu m$  میکرومتر نیز مراحل ذوب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که (شکل ۱۵) ذرات  $30\mu m$  میکرو متر به زودی ذوب می‌شوند و به طور

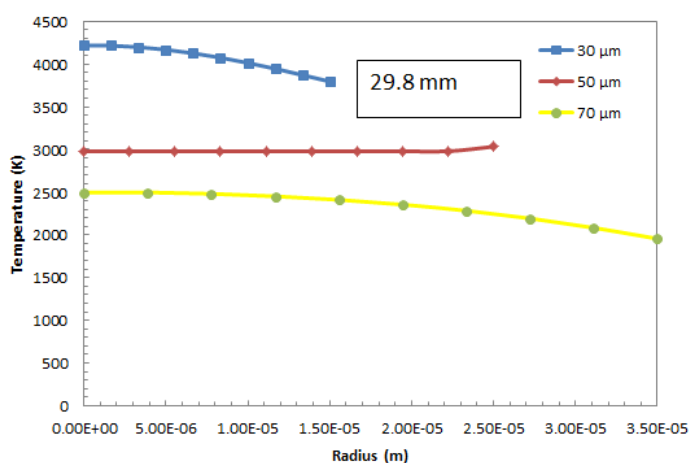


شکل (۱۵): تغییر فاز داخل یک ذره ( $30\mu m$ ) (بدون گاز حامل). خط عمودی سطح مشترک جامد-مایع با n نانو ساختار مواد، I ماده ذوب شده و S مواد انجماد

نشان می‌دهد



شکل ۱۶: تغییر فاز داخل یک ذره ( $70\ \mu\text{m}$ ) (بدون گاز حامل)



شکل ۱۷: مقایسه دما برای سه ذره با اندازه های مختلف ( $30\ \mu\text{m}$ ,  $50\ \mu\text{m}$ ,  $70\ \mu\text{m}$ ) در فاصله  $29.8\ \text{mm}$

## ۲- نتیجه گیری

حامل وجود ندارد ذره مسیر عادی خود را طی می کند و به هدف می رسد، اما زمانی که گاز حامل وارد می شود به دلیل برهم کنش ذره با گاز حامل، مسیر آن منحرف می شود. علاوه بر این، مشاهده شد که دما و سرعت سطح ذره با افزایش سرعت گاز حامل افزایش و سپس کاهش می یابد. بیشینه سرعت گاز حامل برای سطح ذرات  $0.1\ \text{m/s}$  و بیشینه سرعت گاز حامل برای سرعت ذرات  $0.05\ \text{m/s}$  است. ذرات سبکتر در فاصله کمتری از خط مرکزی مشعل به هدف برخورد می کنند و هر چه ذره بزرگتر می شود مکانی که ذره به هدف می خورد از خط مرکزی پایین تر است. این نتیجه می دهد که گاز حامل روی افشانه پلاسما و ذره وارد شده اثر قوی دارد.

در این مقاله، پدیده های فیزیکی مربوط به ذرات از قبیل سرعت، دما، مسیر و همچنین اندازه ذره، ذوب جهت تأثیر بر روی عملکرد افشانه پلاسما بررسی شد. مقایسه ای برای دو کمیت دما و سرعت در حالت های بدون تزریق گاز حامل و با تزریق گاز حامل انجام شد که با ورود گاز حامل، شاهد انحراف در کمیت ها بوده که این انحراف با افزایش سرعت گاز حامل، افزایش پیدا می کند. افت در کمیت ها نیز مشاهده گردید که نشان دهنده اثر قابل توجه گاز حامل در عملکرد افشانه پلاسما است. مشخص شد که گاز حامل روی ذرات نیز اثر می گذارد و مسیر، دما و سرعت آن ها را تغییر می دهد. در حالتی که گاز

- simulation of plasma spray: effects of carrier gas flow and particle injection on plasma jet and entrained particle behavior”, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 47, No. 24, pp. 5189-5200, 2004.
- [10] H. P. Li & X. Chen, “Three-dimensional modeling of the turbulent plasma jet impinging upon a flat plate and with transverse particle and carrier-gas injection”, *Plasma chemistry and plasma processing*, Vol. 22, No. 1, pp. 27-58, 2002.
- [11] K. Remesh, S. Yu, H. Ng & C. Berndt, “Computational study and experimental comparison of the in-flight particle behavior for an external injection plasma spray process”, *Journal of thermal spray technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 508-522, 2003.
- [12] B. M. Cetegen & W. Yu: *Thermal Spray Technol*, 1999.
- [13] G. Mariaux, E. Legros & A. Vardelle, “Modeling of coating formation and heat flux to substrate by particles and plasma jet in plasma spraying”, *Proceedings of the ITSC 2003: International Thermal Spray Conference 2003: Advancing the Science and Applying the Technology*, pp. 895-903, 2003.
- [14] M. Vardelle, P. Fauchais, A. Vardelle & K. I. Li, B. Dussoubs & N. Themelis, “Controlling particle injection in plasma spraying”, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 267-284, 2001.
- [15] B. Selvan, K. Ramachandran, K. P. Sreekumar & T. K. Thiyagarajan, P. V. Ananthapadmanabhan: *Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch*, 2010.
- [16] M. Leylaverigne, B. Dussoubs, A. Vardelle & N. Goubot, *J. Thermal Spray Technol.* 7 Ž4. Ž1998. 527.
- [17] E. Pfender, *Thin Solid Films* 238 Ž1994. 228.
- [18] B. Kear & P. Strutt, “Chemical processing and applications for nanostructured materials”, *Nanostructured materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 227-236, 1995.
- [19] M. Gell, “The potential for nanostructured materials in gas turbine engines”, *Nanostructured Materials*, Vol. 6, No. 5, pp. 997-1000, 1995.
- در نهایت، نتیجه دیگری که بدست آمد مربوط به کاهش دما و سرعت سطح ذره با افزایش قطر است. کاهش دما به علت وجود فضای بیشتر و انتقال کمتر انرژی می‌باشد. کاهش سرعت به علت کاهش نیروی درگ می‌باشد که با افزایش قطر، جرم بیشتر شده و در نتیجه سرعت آن کاهش می‌یابد. ذرات با قطر کوچکتر به طور کامل ذوب می‌شوند و هر چه قطر بزرگتر شود، ذوب ذرات سخت تر می‌شود تا جایی که ذرات ۷۰ میکرو متر اصلاً ذوب نمی‌شوند و ذرات ۳۰ میکرومتر به طور کامل ذوب می‌شوند.
- ### ۸- مراجع
- [1] J. Ramshaw & C. Chang, “Computational fluid dynamics modeling of multicomponent thermal plasmas”, *Plasma chemistry and plasma processing*, Vol. 12, No. 3, pp. 299-325, 1992.
- [2] S. V. Patankar, “Numerical heat transfer and fluid flow”, Taylor & Francis, 1980.
- [3] <http://www.wikipg.com/wiki>.
- [4] <http://coating.blogfa.com/post-25.aspx>.
- [5] I. Ahmed & T. Bergman, “Simulation of thermal plasma spraying of partially molten ceramics: effect of carrier gas on particle deposition and phase change phenomena”, *Journal of heat transfer*, Vol. 123, No. 1, pp. 188-196, 2001.
- [6] Y. Wan, V. Prasad, G. X. Wang, S. Sampath & J. Fincke, “Model and powder particle heating, melting, resolidification, and evaporation in plasma spraying processes”, *Journal of heat transfer*, Vol. 121, No. 3, pp. 691-699, 1999.
- [7] C. Ang, A. Devasenapathi, H. Ng, S. Yu, & Y. Lam, “A proposed process control chart for DC plasma spraying process. Part II. Experimental verification for spraying alumina”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 21, No. 3, pp. 401-420, 2001.
- [8] L. Pawlowski, “The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings”, Guildford, Surrey: Wiley, Vol. 414, 1995.
- [9] H. B. Xiong, L. L. Zheng, S. Sampath, R. L. Williamson, & J. R. Fincke, “Three-dimensional

- [15] Leylavergne.  
 [16] Pfender  
 [17] Salhi  
 [18] Williamson.  
 [19] Realizable  
 [20] Simple  
 [21] velocity-inlet  
 [22] open-boundary  
 [23] Reynolds  
 [24] drag  
 [25] Stoke  
 [26] Morsi  
 [27] Alexander  
 [28] Ranzel  
 [29] Marshal  
 [30] Rosin-Rammler  
 [31] Nusselt
- [20] I. Ahmed, T. Bergman, "Three-dimensional simulation of thermal plasma spraying of partially molten ceramic agglomerates", *Journal of thermal spray technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 215-224, 2000.
- [21] S. Salhi & N. Guessasma, Fenineche: Yttria-Stabilized Zirconia In-Flight Particle characteristics under vacuum plasma Spray Conditions, 2009.
- [22] R. L. Williamson, J. R. Fincke & C. H. Chang: "A Computational Examination of the Sources of Statistical Variances in Particle Parameters During Thermal Plasma Spraying," *Plasma Chem. Plasma Process*, Vol. 20, No. 3, pp. 299-324, 2000.
- [23] S. Morsi & A. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems", *J. Fluid Mech*, Vol. 55, No. 2, pp. 193-208, 1972.
- [24] W. Ranz & W. Marshall, "Evaporation from drops", *Chem. Eng. Prog*, Vol. 48, No. 3, pp. 141-146, 1952.
- [25] R. Williamson, J. Fincke, D. Crawford, S. Snyder, W. Swank & D. Haggard, "Entrainment in high-velocity", high-temperature plasma jets.: Part II: computational results and comparison to experiment, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 46, No. 22, pp. 4215-4228, 2003.
- [26] L. S. Fan & C. Zhu, "Principles of Gas -Solid Flows, Cambridge Series in Chemical Engineering", ed: Cambridge University Press, United Kingdom, 1998.

## ۹- پی نوشت

- [1] Pawlowski  
 [2] Hong-Bing  
 [3] Zheng  
 [4] Ahmed  
 [5] Bergman  
 [6] FLUENT  
 [7] Li  
 [8] Chen  
 [9] Remesh.  
 [10] Bergman.  
 [11] Mariuax.  
 [12] Vardelle.  
 [13] Selvan.  
 [14] Ramachandran.