

اثر شدت چرخش گاز در شبیه‌سازی ایجاد پوشش سطحی بر روی دیواره داخلی یک استوانه در فرآیندهای پاششی

سعید اسدی^{۱*}، محمد مقیمان^۲ و محمد پسندیده فرد^۲

^۱گروه مکانیک - دانشگاه پیام نور

^۲گروه مکانیک - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۸۸/۶/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۹/۱۰، تاریخ تصویب ۹۰/۱۰/۱۳)

چکیده

در این پژوهش اثر جریان فاز گاز خصوصاً شدت چرخش آن در ایجاد پوشش بر روی دیواره داخلی استوانه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. معادلات حاکم بر فاز گاز با استفاده از روش کنترل حجمی و با کمک الگوریتم سیمپل به همراه مدل سازی ریاضی جریان مغشوش، حل گردیده است. همچنین معادلات حاکم بر حرکت قطرات در سیستم لاگرانژین و در هر گام زمانی حل شده است. پس از تعیین محل، زاویه و سرعت برخورد قطره با سطح، دینامیک برخورد قطره، توسط شبیه سازی عددی سیالات با سطح آزاد، بررسی گردیده است. نتایج نشان‌دهنده اثر قابل توجه شدت چرخش گاز بر روی محل، زاویه، سرعت برخورد قطرات با سطح و ضخامت بدون بعد فیلم ایجاد شده می‌باشد. در ادامه نمودارهای مربوط به پارامترهای مهم در تشکیل پوشش بر روی سطح داخلی استوانه، رسم گردیده و تغییرات آنها مطالعه شده است. یکی از نتایج مهم به دست آمده، چگونگی تغییر دامنه و مقدار حداکثر توزیع پوشش ایجاد شده بر روی سطح در اعداد چرخش گوناگون (۰/۸-۱/۴) می‌باشد. همچنین اثر شدت چرخش گاز در محل پوشش ایجاد شده بر روی سطح مطالعه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با زیاد شدن عدد چرخش گاز، دامنه پوشش قطرات بر روی سطح داخلی استوانه کاهش یافته و مقدار حداکثر ضخامت بدون بعد در واحد زمان افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد چرخش گاز، نمودار توزیع پوشش ایجاد شده به نقطه شروع پاشش نزدیکتر می‌شود. در این مطالعه مشخص گردیده که رتبه ضخامت بدون بعد در واحد زمان، از درجه ۰/۰۱ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پوشش، دیواره داخلی استوانه، شبیه‌سازی، فرآیند پاششی، برخورد قطره، شدت چرخش گاز

مقدمه

کاهش هزینه فرآیندهایی که در آن، این پدیده رخ می‌دهد، می‌گردد. این مدل‌ها امکان مطالعه فرآیندهای جدید و یا توسعه فرآیندهای قبلی را بدون انجام آزمایش‌های پرهزینه، فراهم می‌کند. یک مدل کامل برای مطالعه برخورد قطره با سطح شامل دو مرحله مهم می‌باشد. ابتدا مطالعه تاثیر میدان جریان گاز بر روی محل، زاویه و سرعت برخورد قطره با سطح و سپس مطالعه برخورد قطره و پخش شدن آن بر روی سطح.

مطالعه عددی تاثیر میدان جریان گاز بر روی سرعت و زاویه برخورد قطره با سطح، به دو مرحله تقسیم می‌شود. ابتدا متغیرهای میدان جریان فاز پیوسته بوسیله حل معادلات حاکم بر فاز گاز شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم به همراه معادلات جریان مغشوش به دست می‌آید [۵]. در مرحله بعد، حل معادلات حرکت ذرات ریز مایع جهت پیدا کردن مسیر حرکت آنها ضروری است. بطور کلی دو روش اصلی لاگرانژین و اولرین را می‌توان

ایجاد پوشش بر روی دیواره داخلی استوانه و لوله‌ها به روش پاششی، کاربرد زیادی در فرآیندهای صنعتی دارد. در این پدیده، قطرات ریز توسط جریان گاز حامل، به طرف سطح مورد نظر هدایت و روی آن پاشیده می‌شود. این قطرات معمولاً ذرات فلزی یا غیر فلزی ذوب شده می‌باشند. قطرات پس از برخورد با سطح، بر روی آن پخش شده و لایه‌ای نازک ایجاد می‌کنند. وضعیت گاز حامل، از جمله شدت چرخش آن، نقش مهمی در تشکیل و وضعیت پوشش ایجاد شده بر روی سطح داخل استوانه دارد [۱]. پاشش حرارتی، مخصوصاً پاشش پلاسمایی به جدار داخلی لوله‌های با قطر بسیار کم [۲]، پوشش دادن داخل باتری‌های NAS [۳] و ایجاد پوشش داخل سوراخ‌های ریز^۲ و لوله ای شکل انواع دستگاهها [۴]، نمونه‌هایی از اینگونه فرآیندها هستند. مطالعه و توسعه مدل‌های عددی و یا تحلیلی که بتواند پوشش ایجاد شده توسط برخورد قطره با سطح را پیش‌بینی نماید، باعث

مسیر حرکت ذرات را در فاز گاز پیش‌بینی نمودند. مقایسه نتایج آنها با نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده تطابق خوب جواب‌های به دست آمده می‌باشد.

از طرفی پژوهشگران زیادی رفتار برخورد قطره با سطح جامد را، از لحظه برخورد قطره به سطح تا پخش شدن آن، مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۱-۲۱]. در مطالعات اخیر Pasandideh-Fard و همکاران [۲۱]، شکل اسپلت‌های^۴ تشکیل شده را در پاشش حرارتی بررسی و شبیه‌سازی کردند. آنها برخورد عمودی قطرات سیال به سطح جامد را بررسی کرده و مطالعات گسترده‌ای روی تخمین مقاومت حرارتی بین قطره و سطح جامد انجام دادند. مطالعات Pasandideh-Fard و همکاران [۲۰، ۲۱] نشان داده است که در پاشش‌های حرارتی، عمل پخش شدن قطره بر روی سطح، بسیار سریع انجام می‌پذیرد (در حد میکرو ثانیه). بنابراین در شبیه‌سازی عددی برخورد قطره می‌توان مرحله پخش شدن را جدا از مرحله انتقال حرارت و انجماد بررسی کرد. Asadi و همکاران [۲۲] برخورد مایل قطره به سطح را در پاشش پلاسمایی، به صورت عددی و تحلیلی شبیه‌سازی کردند. سپس Asadi و همکاران [۲۳]، تاثیر زامیه تماس را در برخورد قطره با سطح، مطالعه نمودند. Asadi و همکاران [۲۴] در مطالعه دیگری، برخورد قطره با سطح خیس را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. در مطالعات اخیر نیز برخورد نانوقطرات با سطح توسط Asadi شبیه‌سازی گردیده است [۲۵].

تاکنون شبیه‌سازی حرکت قطره در فاز گاز به همراه مرحله پخش شدن قطره بر روی سطح، به صورت یکپارچه، انجام نشده است. خصوصاً، مطالعه عددی بر روی پوشش دادن دیواره داخلی استوانه‌ها، گزارش نگردیده است. در این مقاله پوشش دادن دیواره داخلی استوانه به وسیله فرآیند پاشش، شبیه‌سازی عددی می‌گردد. بدین منظور، ابتدا میدان گاز داخل استوانه شبیه‌سازی شده و سپس حرکت قطرات در فاز گاز مدل‌سازی می‌گردد. در ادامه مرحله پخش شدن قطره بر روی سطح و ایجاد لایه نازک بر روی آن توسط شبیه‌سازی عددی مطالعه شده و در نهایت توزیع ضخامت لایه ایجاد شده بر روی سطح، و عوامل موثر بر آن، بررسی و نتایج به دست آمده ارائه گردیده است.

جهت محاسبات عددی فازی که حاوی ذرات ریز است به کار برد، مزیت اصلی روش اولرین، اقتصادی بودن محاسبات آن در جریان‌های دارای غلظت زیاد قطرات است [۶، ۷].

روش لاگرانژین که در مطالعات مربوط به حرکت قطرات مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر مفهوم دو محیط داخل هم، پایه ریزی شده است. از مزایای این روش فرمول بندی ساده، حافظه و محاسبات کامپیوتری کمتر در غلظت کم قطرات می‌باشد [۷]. در این روش مسیر حرکت هر گروه از قطرات به وسیله حل معادلات دیفرانسیل تابع زمان، با توجه به اثرات اغتشاش گاز بر روی رفتار آنها، و توسط انتگرال گیری در گام‌های زمانی متوالی انجام می‌شود و فرض می‌گردد که دانسیته قطرات یا ذرات کم باشد تا اثرات متقابل بین قطرات ناچیز بوده و ساختمان درهم (مغشوش) گاز تحت تأثیر فاز دوم نباشد. مزیت اصلی روش لاگرانژین مطالعه حرکت هر قطره به تنهایی می‌باشد، زیرا جزئیات حرکت هر قطره بطور مستقیم در بردارنده تاثیر نیروهای وارده بر آن است [۵، ۷]. در این تحقیق از روش لاگرانژین برای مطالعه حرکت قطره در فاز گاز استفاده شده است.

Sommerfeld [۸] تاثیر جریان گاز بر روی حرکت ذرات را در سیستم لاگرانژین مدل‌سازی کرده و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود. پس از آن Tu [۵] جریان حاوی ذرات ریز را به صورت عددی و در سیستم لاگرانژین شبیه‌سازی و برخورد آنها را با سطح بیرونی استوانه مطالعه کرد. Moghiman و Maneshkarimi [۹] ضمن مطالعه عددی تاثیر میدان جریان گاز بر حرکت ذرات به صورت لاگرانژین، اثر حرارت بر تبخیر ذرات و کاهش جرم و در نتیجه تغییر مسیر آنها در میدان گاز را بررسی کردند. سپس Lee و همکاران [۶] شبیه‌سازی عددی برخورد ذرات ریز با دیواره را توسعه داده و اثر جریان گاز بر حرکت ذرات را در سیستم لاگرانژین و اولرین بررسی و مقایسه نمودند. Tu و همکاران [۱۰] حرکت ذرات را در داخل فاز گاز و برخورد و برگشت آنها را از روی سطح منحنی، در سیستم لاگرانژین مطالعه و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. Tian و همکاران [۷] شبیه‌سازی عددی حرکت ذرات در داخل فاز گاز را در پشت یک پله^۳ توسعه دادند. آنها ابتدا میدان جریان گاز را حل کرده و سپس به وسیله روش لاگرانژین

خواهد بود. وقتی ذره جامد خیلی کوچک نباشد، حرکت نسبی بین سیال و ذره بخاطر نیروهای اینرسی و نیروهای جاذبه، ایجاد خواهد شد. نیروهای خارجی وارد بر قطرات، در حالت کلی، نیروهای جاذبه و دراگ^۷ (با توجه به حرکت نسبی، بین ذره و سیال در داخل محفظه) می‌باشند. نیروی اینرسی تابعی از اندازه ذره مایع بوده و بنابراین باید توزیع اندازه ذره در داخل محفظه، معلوم باشد. از آنجا که در عمل، فاز مایع به اندازه‌های مختلف پخش می‌شود، توزیع آنها به وسیله یک فرمول ریاضی، توسط تعداد مناسبی از اندازه‌های قطرات (مثلاً ۱۰ نوع) تقریب‌شده و هر کدام با قطر متوسط d_i مربوط به خود در نظر گرفته می‌شوند [۸، ۹، ۱۰]. در این پژوهش از روش لاگرانژی در مطالعات مربوط به ذره مورد استفاده شده است. در این روش مسیر گروه‌های مختلف قطرات مایع، بوسیله حل معادلات دیفرانسیل معمولی ارزیابی می‌شود. فرض بر این است که غلظت فاز مایع در فاز گازی به اندازه کافی رقیق بوده، به طوری که اثر متقابل قطرات بر هم و انتقال ممتنم بین آنها قابل صرف نظر کردن باشد [۸-۱۰]. با موازنه نیروهای گریز از مرکز و نیروی دراگ، معادله حرکت ذره به دست می‌آید. نتیجه نهایی در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{du_d}{dt} = -F(u_d - u - u') \quad (5)$$

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{w_d^2}{r_d} - F(v_d - v - v') \quad (6)$$

$$\frac{dw_d}{dt} = -\frac{v_d w_d}{r_d} - F(w_d - w - w') \quad (7)$$

$$F = \left(\frac{18\mu}{\rho_d D_p^2}\right) \left(\frac{C_D Re}{24}\right) \quad (8)$$

زیرنویس d نشاندهنده قطره است. t زمان، μ ویسکوزیته دینامیکی گاز و D_p قطر قطره می‌باشند. Re نشاندهنده رینولدز نسبی و معادل $Re = \rho D_p |\bar{u}_p - \bar{u}| / \mu$ است.

C_D ضریب دراگ است که تابعی از Re می‌باشد [۲۶]. معادلات دیفرانسیل حرکت ذره توسط روش انتگرال‌گیری مرحله‌ای اوپلر قابل حل خواهد بود و به شکل زیر بیان می‌گردد [۲]، [۸].

$$u_d = (u + u') + [u_{d,0} - (u + u')] \exp(-F(t - t_0)) \quad (9)$$

شبیه‌سازی عددی

الف - معادلات حاکم

الف - ۱ - میدان جریان گاز

معادلات حاکم برای فاز گاز شامل معادلات پیوستگی و ممتنم می‌باشد که در حالت تقارن محوری و برای مختصات استوانه‌ای (α, r, θ) ، به شکل زیر است [۹].

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(r \rho u u) + \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v u) \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u' v') - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u' u') + F_x \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(r \rho u v) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v v) - \rho w^2 \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u' v') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v' v') - \frac{1}{r} \rho w' w' + F_r \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x}(r \rho u w) + \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v w) + \rho v w \right] = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u' w') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v' w') - \frac{1}{r}(\rho v' w') + F_\theta \quad (4)$$

که w و v مولفه‌های متوسط سرعت در سه جهت x ، r و θ بوده و علامت (\prime) نشان‌دهنده مقادیر لحظه‌ای و متوسط می‌باشد. جملات $\overline{u' u'}$ تنشهای رینولدز هستند. مقادیر F_x ، F_r و F_θ نشان‌دهنده اثر متقابل ممتنم مابین فاز گاز و قطرات هستند. به دلیل عدم توانایی مدل $k-\epsilon$ در جریانهای متلاطم ناهمسانگرد^۸ [۹]، از یک مدل جبری، تنشهای جریان متلاطم، بدست می‌آیند [۹]. تابع دیوار مناسب، در نزدیکی دیواره و بین دیواره تا لایه زیرین ویسکوز^۹ در نظر گرفته می‌شود و اولین نقطه شبکه، از دیواره و در محدوده $16 \leq y^+ \leq 50$ ، می‌باشد [۹].

الف - ۲ - مسیر یابی قطرات

رفتار قطرات در داخل یک میدان جریان به وسیله موقعیت، جرم و سرعت اولیه آنها و سپس به وسیله بالانس نیروهای خارجی مانند، نیروی وارده از طرف سیال و در صورت لزوم، نیروی جاذبه گرانشی قابل ارزیابی است. اگر قطرات به اندازه کافی ریز باشند، به طوری که مخلوط گاز-قطرات، همجنس در نظر گرفته شوند، اثر بار مایع به صورت اضافه کردن دانسیته گاز و کاهش ویسکوزیته گاز

تغییرات سرعت ذره مایع باشند. این معادلات در منابع [۲۷، ۹] ارائه گردیده‌اند.

برای تعیین ترکیب دلخواه قطرات، تعداد گروه قطرات، به همراه حداقل و حداکثر قطر ذره مایع، به عنوان داده در رابطه زیر گذاشته می‌شود:

$$d_i = [d_s + (i-1)(d_l - d_s)/(N-1)] \quad (14)$$

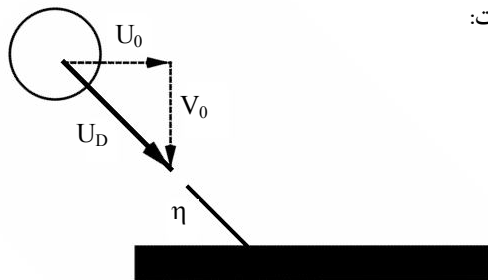
و از آن قطر متوسط قطرات موجود محاسبه می‌گردد. در رابطه فوق d_i ذره i ام و d_s حداقل و d_l حداکثر قطر N تعداد دسته‌بندی قطرات است. با به دست آوردن قطر دسته‌های مختلف قطرات مایع، نهایتاً برای به دست آوردن جرم هر دسته، ابتدا از رابطه Rosin- Rammler نسبت جرمی قطرات، به شکل زیر بدست می‌آید:

$$R_{mi} = \frac{1}{\exp[(d_i/d)^n]} \quad (15)$$

که در آن R_{mi} جزء جرمی قطرات با اندازه بزرگتر از d_i ، d قطر متوسط و n پارامتر توزیع می‌باشد، سپس دبی جرمی قطرات محاسبه می‌گردد [۲۸].

الف - ۳ - برخورد و تغییر شکل قطرات

شکل (۱) طرح کلی از برخورد مایل قطره با سطح را نشان می‌دهد. معادلات حاکم شامل بقاء جرم، ممنتوم و معادله‌ای برای حرکت سطح آزاد می‌باشند. توضیح ریاضی مسئله بر اساس فرض‌های زیر انجام شده است:



شکل ۱: طرح کلی از برخورد قطره با سرعت U_D و با زاویه η به سطح صاف.

سیال، مایع غیرقابل تراکم و نیوتنی با دانسیته، ویسکوزیته و تنش سطحی ثابت بوده و جریان در طول برخورد آرام باشد (مطالعات قبلی در مراجع [۱۹، ۲۰، ۲۱] نشان می‌دهد که در طول برخورد یک قطره مایع با سطح، حتی در شرایط پلاسما، فرض جریان آرام قابل قبول می‌باشد. لازم به ذکر است که مطالعاتی که تا کنون بر

$$v_d = (v + v') - \frac{w_{d,0}^2}{F r_{d,0}} + [v_{d,0} - (v + v') - \frac{w_{d,0}^2}{F r_{d,0}}] \exp(-F(t - t_0)) \quad (10)$$

$$w_d = (w + w') + \frac{w_{d,0} v_{d,0}}{F r_{d,0}} + [w_{d,0} - (w + w') - \frac{w_{d,0} v_{d,0}}{F r_{d,0}}] \exp(-F(t - t_0)) \quad (11)$$

که اندیس صفر (0) مربوط به خصوصیات اولیه قطره در ابتدای هر گام زمانی موردنظر می‌باشد. در پایان هر مرحله انتگرال‌گیری، شرایط سرعت و جرم جدید به دست آمده از حل معادلات بقای حرکت، جرم و انرژی قطرات، مجدداً به عنوان خصوصیات اولیه، در گام زمانی بعدی قرار داده می‌شود.

مؤلفه‌های نوسانی سرعت گاز که در معادلات حرکت ظاهر می‌گردند به وسیله استفاده از یک روش اتفاقی^۱ قابل ارزیابی می‌باشند. با فرض توزیع نرمال برای این مولفه‌ها، رابطه زیر قابل ارائه می‌باشد [۹]:

$$u'_i = \eta \left(\frac{2}{3} k \right)^{1/2} = \eta \left(\frac{2}{3} k \right)^{1/2} \quad (12)$$

η متغیر توزیع اتفاقی نرمال و k انرژی سینتیک محلی توربولنسی می‌باشند که چگونگی تعیین آنها در منابع [۲۷، ۹] آورده شده است. این فرض توربولنسی همسانگرد^۲، فقط برای حرکت قطرات استفاده گردیده است [۹].

نرخ تغییرات موقعیت مکانی قطره نسبت به زمان توسط روابط زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{dx_d}{dt} = u_d, \quad \frac{dr_d}{dt} = v_d, \quad \frac{rd\theta_d}{dt} = w_d \quad (13)$$

که در آنها θ_d, r_d, x_d موقعیتهای لحظه‌ای قطره در فضا می‌باشند. این معادلات نیز به وسیله انتگرال‌گیری مرحله‌ای در هر فاصله کوچک زمانی حل می‌شوند. برای تصحیح معادلات ممنتوم فاز گاز بایستی اثرات متقابل ذره مایع را روی فاز گاز در نظر گرفت. لذا بایستی جملات اضافی چشمه به معادلات ممنتوم فاز گاز اضافه شوند به نحوی که بیانگر تغییرات میدان سرعت فاز گاز به ازای

از آنجا که متغیر f بوسیله جریان سیال جابجا می‌شود می‌توان معادله جابجایی زیر را برای آن نوشت [۱۹]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) f = 0 \quad (20)$$

با توجه به در نظر گرفتن کشش سطحی در مرز مشترک مایع-گاز، با فرض صفر بودن تنش برشی و ثابت بودن کشش سطحی، معادله لاپلاس^{۱۰} به عنوان یک شرط در این مرز بصورت زیر نوشته میشود:

$$\Delta P_S = P_l - P_g = \gamma J \quad (21)$$

در این معادله γ کشش سطحی در سطح مشترک و ΔP_S نشان‌دهنده اختلاف فشار بین مایع و گاز بخاطر وجود کشش سطحی می‌باشد. J انحناى سطح آزاد در محل مورد نظر است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$J = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (22)$$

که در آن R_1 و R_2 شعاعهای انحناى سطح در نقطه مورد نظر می‌باشند. بجای جایگذاری مستقیم معادله (۲۱) برای فشار به عنوان یک شرط مرزی در معادلات حاکم، از روش بهتری استفاده می‌شود که در آن تنش سطحی به عنوان یک نیروی حجمی در ترم \vec{F}_b از معادله (۱۷) فرمولبندی می‌گردد. این روش به مدل CSF^{۱۱} معروف بوده و توسط Brackbill [۲۹] ارائه گردیده است.

حل معادلات حاکم نیاز به تعیین شرایط مرزی به کار برده شده در سطح جامد و در مرزهای متقارن و سطح آزاد مایع دارد. برای سطح جامد، سرعت سیال بدون لغزش^{۱۲} و بدون نفوذ^{۱۳} و برای مرز متقارن، سرعت سیال دارای شرایط لغزش و بدون نفوذ می‌باشد. در سطح آزاد مایع نیز تنش برشی صفر فرض می‌شود. یکی از شرایط مرزی مهم دیگر اعمال زاویه تماس در خط تماس (محل تلاقی سطح آزاد و سطح جامد) می‌باشد. این زاویه نمایانگر مقدار رطوبت‌پذیری سطح جامد بوده و در این مقاله مطابق روش ارائه شده در مرجع [۱۹] از دو مقدار ثابت در دو سطح پیشرونده و پسرونده قطره روی سطح جامد استفاده شده است.

شرایط اولیه برای سرعت و فشار، به شکل زیر است:

$$\vec{V} = \vec{V}_o, \quad P_o = 4 \frac{\gamma}{D_o} \quad (23)$$

که P_o فشار اولیه داخل قطره، توسط معادله لاپلاس به دست آمده است [۱۹، ۲۱].

روی برخورد قطره با سطح جامد انجام شده، با استفاده از این فرض بوده است؛ تاثیر فاز گازی اطراف قطره بر روی فاز مایع در طول برخورد ناچیز باشد (به عبارتی تنش‌های لزجی در سطح تماس قطره با هوا یا گاز اطراف آن صفر فرض می‌شود. به علت کوچک بودن قطره و زیاد بودن انحناى سطح آن، انرژی سطحی قطره و انرژی جنبشی اولیه آن در هنگام برخورد با سطح، از عوامل موثر می‌باشند. بنابراین از تنش گاز در مقابل این دو عامل موثر صرف نظر می‌گردد)؛ برخورد به صورت هم دما یا ایزوترمال انجام گردد (مطالعات نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱]، در شرایط فرآیند پاشش به طریق پلاسما، با توجه به سرعت بسیار بالای پخش شدن قطره بر روی سطح که در حدود میکروثانیه می‌باشد، می‌توان مرحله پخش شدن را جدا از مرحله انتقال حرارت و انجماد بررسی کرد. از آنجا که در این مقاله هدف بررسی مراحل پخش شدن قطره در برخورد مایل به سطح (قبل از انجماد) می‌باشد، فرآیند را می‌توان بصورت ایزوترمال در نظر گرفت).

معادلات حاکم بر بقاء جرم و منتم برای جریان سیال درون قطره به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۹، ۲۱]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{g} + \frac{1}{\rho} \vec{F}_b \quad (17)$$

که \vec{V} نمایشگر بردار سرعت، P فشار، ρ دانسیته مایع، $\vec{\tau}$ تنسور تنش، \vec{g} شتاب ثقل و \vec{F}_b نیروهای جسمی (بر واحد حجم) موثر روی سیال می‌باشند. با توجه به نیوتنی بودن سیال:

$$\vec{\tau} = \mu (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T) \quad (18)$$

که μ نشاندهنده لزجت دینامیکی سیال است. به همراه معادلات فوق، یک معادله دیگر برای ردیابی سطح مشترک مایع-گاز و مدل‌سازی تبادل جرم بین آنها لازم است. در روش سیر حجمی سیال، حرکت مرز مشترک بین دو سیال به وسیله تابع نشانگر f مدل می‌شود:

$$f = \begin{cases} 1 & \text{in liquid} \\ > 0, < 1 & \text{at the liquid-gas interface} \\ 0 & \text{in gas} \end{cases} \quad (19)$$

الف - ۴ - عدد چرخش گاز

عدد چرخش یک پارامتر بدون بعد بوده که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Sw.Nu. = \frac{2G_\phi}{G_x D_b} \quad (24)$$

که در آن G_ϕ شار محوری اندازه حرکت زاویه‌ای، G_x شار محوری اندازه حرکت محوری و D_b قطر مقطع عبوری جریان می‌باشد. شارهای ذکر شده را میتوان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$G_\phi = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \rho u r (w r) dr \quad (25)$$

$$G_x = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r (P + \rho u^2) dr \quad (26)$$

که در آنها u سرعت محوری، v سرعت مماسی، p فشار استاتیکی و r_1 و r_2 شعاعهای مقطع عبوری جریان می‌باشند.

ب - حل عددی معادلات حاکم

ب - ۱ - میدان گاز و مسیر یابی قطرات

معادلات حاکم فاز گاز، به وسیله روش حجم کنترلی حل گردیده است [۹، ۳۰]. معادلات بقاء برای تمامی متغیرهای وابسته مانند جرم، ممنتوم و انرژی سینتیک توربولنسی و نوسانات آن، به وسیله انتگرال گیری معادلات بر روی شبکه محاسباتی، به شکل مفصل در می‌آیند. تکنیک قانون توانی^{۱۴} برای محاسبه نفوذ و جابجایی شاره‌ها در وجوه حجم کنترلی به کار برده شده است [۳۰]. معادلات جبری حاصله به شکل زیر قابل نمایش است.

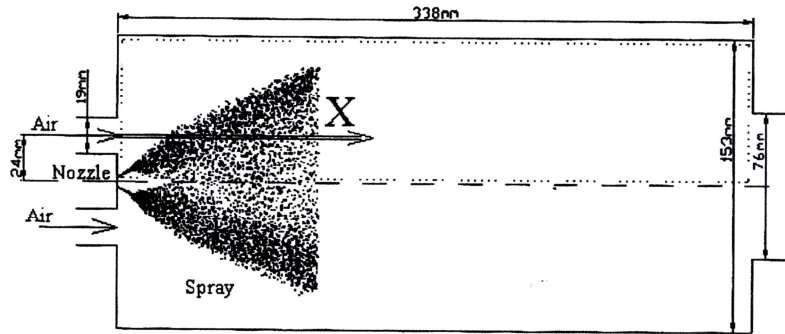
$$\sum_{i=N,S,E,W} (A_i - S_p) \phi_p = \sum_{i=N,S,E,W} A_i \phi_i + S_u \quad (27)$$

که ϕ نشان‌دهنده متغیرها، A شامل شارهای جابجایی و نفوذ، S_u و $S_p \phi$ جملات چشمه خطی شده می‌باشند. به خاطر طبیعت بیضوی بودن معادلات بقاء، شرایط مرزی بایستی در تمامی مرزهای حوزه محاسباتی، مشخص گردند. هندسه و شرایط مرزی مخزن استوانه‌ای، در طول محور افقی آن، متقارن می‌باشد. بنابراین حوزه محاسباتی به نصف استوانه کاهش می‌یابد. شرایط میدان جریان ورودی به وسیله قراردادن توزیع یکنواخت برای سرعت‌های محوری و مماسی و با تعیین انرژی

سینتیک (k) و نرخ اتلاف (ϵ)، مشخص می‌گردند [۹]. در مرز خروجی و محور تقارن، شرایط گرادینان صفر به کار برده می‌شود. دسته معادلات جبری به وسیله طرح نیمه ضمنی^{۱۵} با شروع از شرایط ابتدایی داده شده حل می‌گردند که بعد از ۱۵۰۰ دفعه تکرار، همگرا می‌شوند. محدوده همگرایی به وسیله مقدار حداکثر باقی‌مانده‌های نرمال شده هر معادله مشخص می‌شود که باید کمتر از 5×10^{-4} باشند. همچنین استفاده از ضرایب زیر تخفیف برای همگرایی مطمئن ضروری است. دامنه ضرایب زیر تخفیف بین 0.2 الی 0.5 برای سرعت، فشار، انرژی سینتیک توربولنسی و نرخ اتلاف می‌باشد.

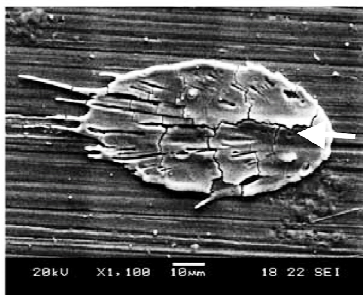
بعد از تعیین میدان جریان گاز، معادلات حرکت قطرات حل شده و جملات جدید تاثیر متقابل قطره و گاز، به دست می‌آید. پاشش قطرات از نازل، حاوی گروه‌های معین شده از قطرات با قطر متوسط و سرعت ابتدایی مشخص می‌باشند. تاثیر سرعت گاز بر روی قطره در هر حجم کنترل، ثابت فرض می‌شود و مقدار آن وقتی مرزهای حجم کنترل را قطع کرده و به حجم کنترل دیگری می‌رود، دوباره محاسبه می‌شود. بعد از تکمیل محاسبات حرکت قطره، میدان گاز دوباره محاسبه می‌شود. بعد از ۲۰ دفعه تکرار حل عددی فاز گاز، مقادیر جدید جملات تاثیر متقابل قطره - گاز به دست می‌آید. جملات چشمه مربوط به قطره، در معادلات فاز گاز گذاشته شده و این روند تکراری آنقدر انجام میشود که فاز گاز همگرا گردد. به عبارتی تاثیر جملات چشمه ناشی از قطرات در فاز گاز به مقدار ثابتی برسد.

برای مخزن استوانه‌ای (شکل ۲)، حوزه محاسباتی به صورت شبکه 16×32 (شعاعی \times محوری) و به صورت غیر یکنواخت در نظر گرفته شده است. غیر یکنواخت بودن شبکه به خاطر این است که تعداد سلول‌های زیادتری در منطقه‌ای که سرعت زیاد است، وجود داشته باشد. این منطقه در مجاورت ورودی هوا و نازل، و نزدیک دیواره می‌باشد. همچنین وابستگی حل عددی به شبکه بررسی گردیده است تا اندازه مناسب شبکه برای حل دقیق و قابل قبول به دست آید. تعداد سلول‌های شبکه 450 ، 512 ، 648 و 882 در نظر گرفته شده و مشاهده گردید که مقادیر متغیرهای میدان گاز و حرکت قطرات با افزایش سلول‌ها به بیش از 512 ، کمتر از 1% تغییر می‌کند.

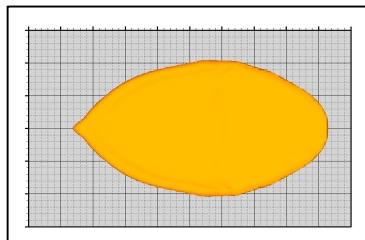


شکل ۲: نمونه‌ای از پاشش داخل استوانه و محفظه‌های استوانه‌ای شکل.

شده برای جریان گاز در داخل استوانه، از نتایج آزمایشگاهی Khalil و Whitelaw [۳۱] استفاده کرده‌اند. آنها نشان دادند که پیش‌یابی عددی توافق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



الف



ب

جهت برخورد قطره با سطح

شکل ۳: مقایسه تصویر اسپلت بدست آمده از شبیه سازی عددی با نتایج آزمایش مرجع [۳۱] برای زاویه برخورد 30° .

برای مقایسه کمی اعتبار مدل عددی برخورد قطره با سطح، از آزمایشهای Kang و همکاران [۳۲] استفاده شده است. آنها در پاشش پلاسمایی از پودر YSZ^{۱۶} استفاده نموده و آنرا با زوایای مختلف بر روی سطح جامد پاشیده‌اند. توزیع اندازه پودر بین ۲۵ الی ۱۲۵ میکرون با قطر

بنابراین شبکه 16×32 برای محاسبات بعدی انتخاب گردیده است. محاسبات عددی با کامپیوتر پنتیوم ۴ انجام گردیده است. زمان تقریبی CPU، ۵ الی ۷ دقیقه می‌باشد.

ب- ۲- برخورد و تغییر شکل قطرات

معادلات حاکم با استفاده از روش عددی حجم محدود گسسته سازی می‌شوند. در هر سلول مقادیر سرعت در وسط وجوه و فشار و مقدار تابع f در مرکز سلول در نظر گرفته می‌شوند. مشروح روش انفصال و حل معادلات در منابع [۲۱، ۲۲] آورده شده است.

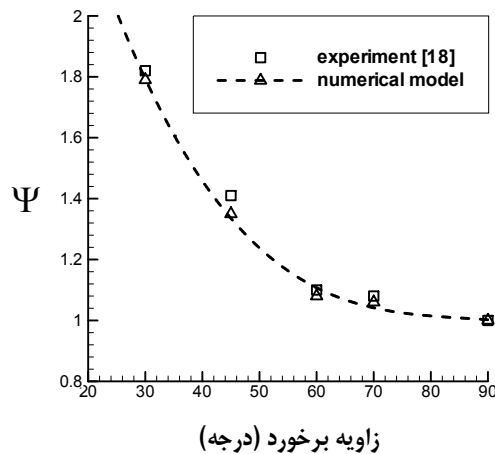
اندازه حوزه محاسباتی، در بردارنده قطره اولیه، و تغییرات به وجود آمده بر روی قطره در فرآیند برخورد بوده است. اندازه شبکه بر اساس مطالعه تصحیح اندازه شبکه تعیین گردیده است به گونه‌ای که اندازه سلول‌ها آنقدر کوچک شده تا کاهش بیشتر آن، تغییر محسوسی در پیش‌یابی شکل تغییرات قطره در طول فرآیند برخورد آن با سطح، نداشته باشد. گسسته سازی در شبکه محاسباتی یکنواخت انجام گردیده که در آن اندازه هر سلول معادل $1/15$ شعاع قطره بوده است. محاسبات عددی با کامپیوتر پنتیوم ۴ انجام گردیده است. زمان تقریبی CPU، در حدود ۴ ساعت بوده است.

نتایج و بحث

الف- اعتبار مدل عددی

اعتبار روش عددی به کار رفته برای حل جریان گاز قبلاً توسط Moghiman و Maneshkarimi [۹] مورد بررسی قرار گرفته است. آنها برای بررسی اعتبار مدل ارائه

نسبت Ψ افزایش یافته یا به عبارتی شکل اسپلت، در جهت برخورد قطره با سطح، به نوعی بیضی تبدیل می‌شود که نسبت قطر بزرگ به کوچک آن افزایش یافته است.



شکل ۵: مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با نتایج آزمایش [۳۲]، برای تغییرات مقدار Ψ نسبت به زاویه برخورد.

ب - شبیه سازی پوشش دادن دیواره داخلی اجسام استوانه‌ای و تاثیر عدد چرخش گاز

نتایج عددی برای هندسه (شکل فیزیکی) یک محفظه استوانه‌ای با قطر داخلی ۱۵/۳cm و طول ۳۳/۸cm به دست آمده است. شکل (۲) نشان‌دهنده این محفظه می‌باشد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، جریان مایع از یک نازل، وارد استوانه می‌گردد. نرخ جریان مایع ۰/۰۶ kg/min، و نسبت هوا به مایع ۲۰/۱۷ بوده و فرآیند در دمای محیط صورت می‌پذیرد. محاسبات برای پاشش قطرات با قطر ۵۰ الی ۱۲۰ میکرون صورت گرفته است. برای انجام محاسبات، این محدوده به ۱۰ گروه از قطرات تقسیم شده است. تقسیم بندی براساس قطر قطرات صورت گرفته است. با توجه به دانسیته مایع و قطر متوسط هر گروه، مقدار دبی هر گروه مشخص می‌گردد. خواص مایع نزدیک به خواص آب در نظر گرفته شده است.

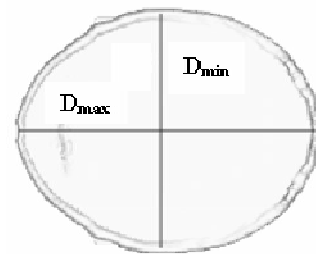
در شکل (۶) مسیر حرکت قطرات در داخل محفظه استوانه‌ای برای چهار عدد چرخش ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۴ (شکل الف تا د) نشان‌داده شده است. مشاهده می‌شود قطرات پس از خروج از نازل، تحت تاثیر جریان چرخشی گاز حامل، به سمت دیواره حرکت می‌نمایند.

متوسط ۳۷ میکرون بوده است. سطح جامد آنها از یک قطعه فولاد نرم $15 \times 10 \times 3$ mm تشکیل شده که بسیار خوب پرداخت گردیده است. اندازه متوسط حسابی زبری ۰/۵ میکرون بوده و پودر توسط دستگاه پاشش پلاسمایی SG-100 در فشار اتمسفریک به طرف سطح جامد با زوایای گوناگون پاشیده شده است. آنها برای مشاهده مورفولوژی، برجستگی و ضخامت اسپلت‌ها از دستگاههای SEM^{۱۸} و WYKO NT-2000 (optical surface profiler) استفاده کرده‌اند. دستگاه‌های مورد استفاده، شرایط و جزئیات آزمایش آنها در مرجع [۳۲] ارائه گردیده است.

نمونه‌ای از اسپلت تشکیل شده بوسیله پاشش با زاویه ۳۰° در شکل (۳-الف) آورده شده است. در شکل (۳-ب)، اسپلت شبیه سازی شده توسط مدل عددی ارائه گردیده است. مقایسه دو شکل نشان می‌دهد که مدل عددی نتیجه آزمایش تجربی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

برای مقایسه بهتر مدل عددی با نتایج تجربی از مقدار Ψ استفاده می‌کنیم. Ψ یا نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک

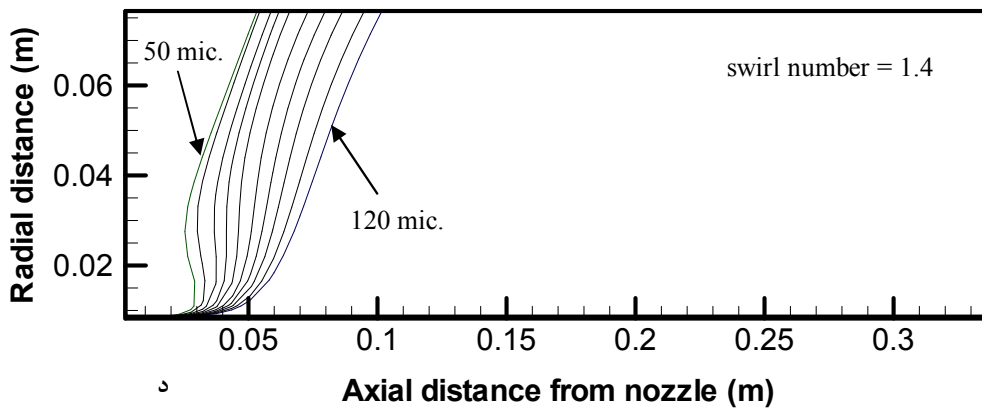
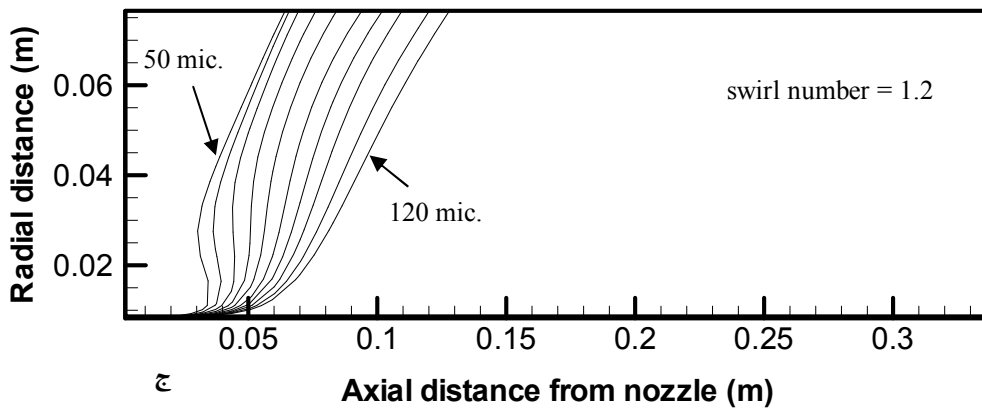
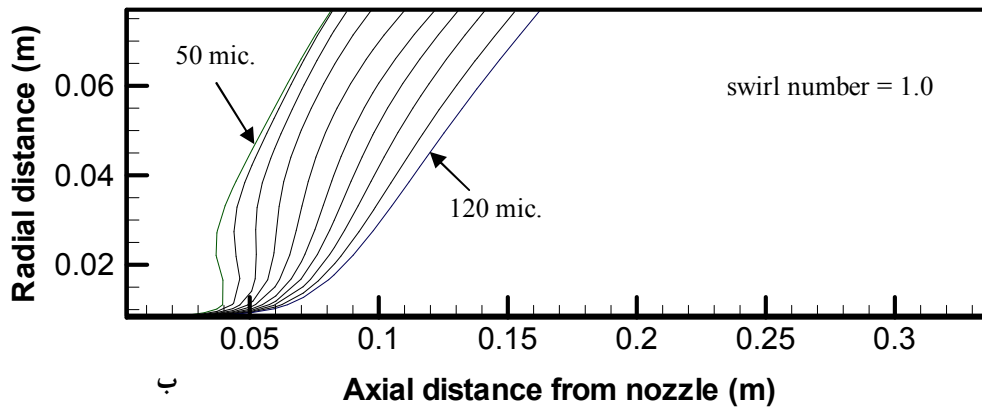
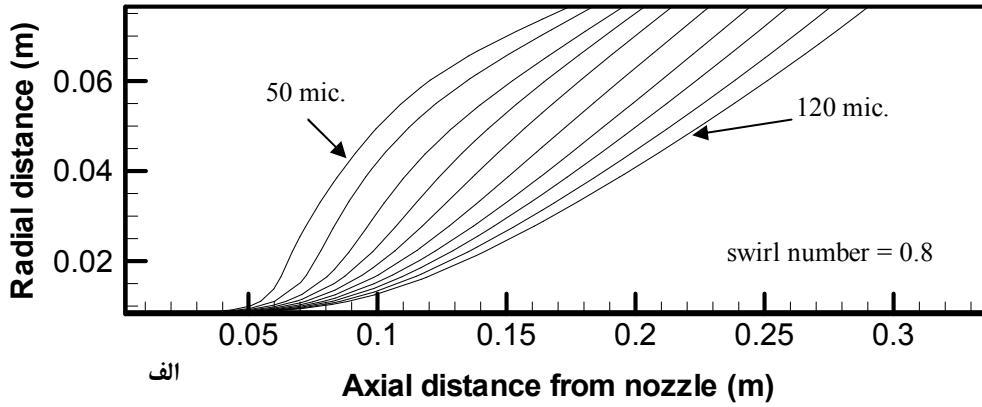
بیضی ایجاد شده ($\Psi = \frac{D_{max}}{D_{min}}$)، یکی از مهمترین پارامترهای اسپلت تشکیل شده در برخورد مایل است. مقادیر D_{min} و D_{max} در شکل (۴) نشان داده شده است.



جهت برخورد قطره با سطح

شکل ۴: شکل اسپلت حاصل شده از برخورد مایل قطره در پاشش حرارتی که مقادیر D_{min} و D_{max} را نشان می‌دهد.

شکل (۵) برای مقایسه بهتر Ψ حاصل از نتایج آزمایش با مقادیر حاصل از حل عددی، رسم گردیده است. انطباق خوب نتایج حاصله، نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی توسط حل عددی می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌گردد که با کاهش زاویه برخورد،



شکل ۶: مسیر حرکت و خط سیر قطرات در داخل محفظه و با اعداد چرخش گوناگون. الف: عدد چرخش ۰/۸، ب: عدد چرخش ۱، ج: عدد چرخش ۱/۲، د: عدد چرخش ۱/۴.

افزایش یافته است.

شکل (۱۰)، تغییرات زاویه برخورد قطره با دیواره را نسبت به قطر قطرات و برای اعداد چرخش گوناگون نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش عدد چرخش موجب افزایش قابل توجه زاویه برخورد می‌گردد. همچنین دیده می‌شود که قطر قطرات، اثر مهمی بر زاویه برخورد دارد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده ضخامت قطره در حالت حداکثر مقدار پخش آن بر روی دیواره، نسبت به قطر قطرات، در اعداد چرخش مختلف می‌باشد. مشاهده می‌گردد که در تمامی مقادیر اعداد چرخش، با زیاد شدن قطر قطرات، ضخامت قطره پخش شده، افزایش می‌یابد. شکل (۱۲) فاصله محوری محل برخورد قطرات با دیواره را از نازل، برای قطرهای مختلف قطره و اعداد چرخش ۰/۸ الی ۱/۴، نشان می‌دهد. بررسی شکل مشخص می‌کند که افزایش عدد چرخش باعث کاهش فاصله محوری محل برخورد قطرات می‌گردد. با افزایش عدد چرخش، مقدار نیروی گریز از مرکز افزایش یافته و فاصله محوری برخورد قطرات، به نازل نزدیکتر می‌شود.

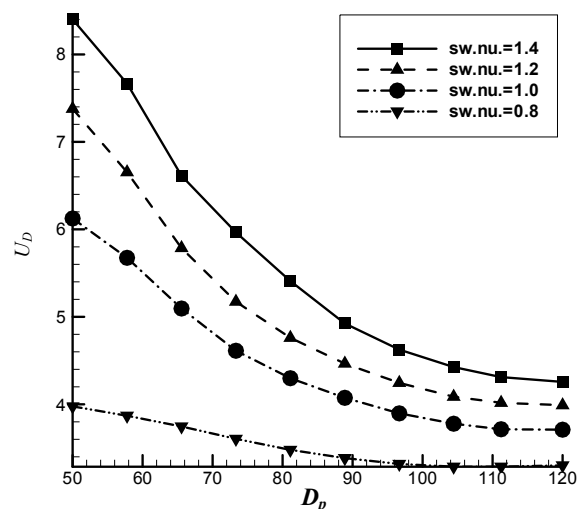
برای مطالعه کاملتر ضخامت لایه به وجود آمده در اثر پاشش قطرات، از ضخامت بدون بعد استفاده می‌کنیم که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\delta_i^* = \frac{\dot{m}(R_i - R_{i+1})t}{\frac{L}{N} \pi D_{cyl} \delta_i \rho} = \frac{\dot{V}(R_i - R_{i+1})t}{\frac{L}{N} \pi D_{cyl} \delta_i} \quad (28)$$

که در آن δ_i^* ضخامت بدون بعد لایه نازک دسته i ام، t زمان پاشش، \dot{m} دبی جرمی سیال مایع، ρ دانسیته سیال مایع، \dot{V} دبی حجمی سیال مایع، $R_i - R_{i+1}$ دبی به دست آمده از توزیع روسین - راملر برای دسته i ام، L دامنه پخش لایه نازک بر روی سطح جامد، N تعداد دسته بندی قطرات، D_{cyl} قطر استوانه و δ_i ضخامت قطره در حالت حداکثر مقدار پخش آن بر روی سطح و با قطر متوسط دسته i ام می‌باشند.

شکل (۱۳) مقدار δ_i^*/t را نسبت به فاصله محوری لایه نازک ایجاد شده، تا نازل، برای اعداد چرخش ۰/۸ الی ۱/۴، نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش، دامنه پوشش قطرات بر روی سطح، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد چرخش، مقدار ضخامت بدون بعد (δ_i^*) در واحد زمان افزایش می‌یابد. به عبارتی

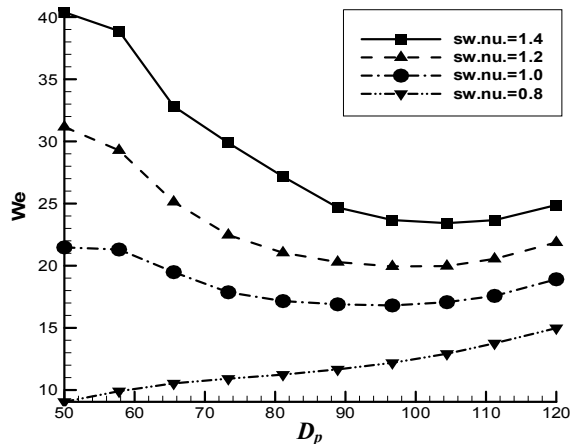
بررسی شکل (۶) مشخص می‌کند که با افزایش عدد چرخش، متوسط طول مسیر طی شده توسط قطرات (از نازل تا محل برخورد به دیواره) کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود چرخش گاز، اثر بیشتری بر قطرات کوچکتر داشته و آنها را سریع‌تر به سمت دیواره پرتاب می‌نماید. قطرات بزرگ‌تر به علت اینرسی بالاتر، در فاصله دورتری از نازل به سطح داخل استوانه برخورد می‌نمایند. شکل (۷) تغییرات سرعت برخورد (U_D) را برای قطرات با قطر ۵۰ الی ۱۲۰ میکرون در اعداد چرخش ۰/۸ الی ۱/۴، نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش قطر قطرات، مقدار U_D کاهش یافته و برای هر کدام از اعداد چرخش، به سمت یک مجانب موازی با محور افقی، میل می‌کند. همچنین دیده می‌شود برای یک قطر مشخص، بخاطر افزایش عدد چرخش، سرعت برخورد افزایش می‌یابد.



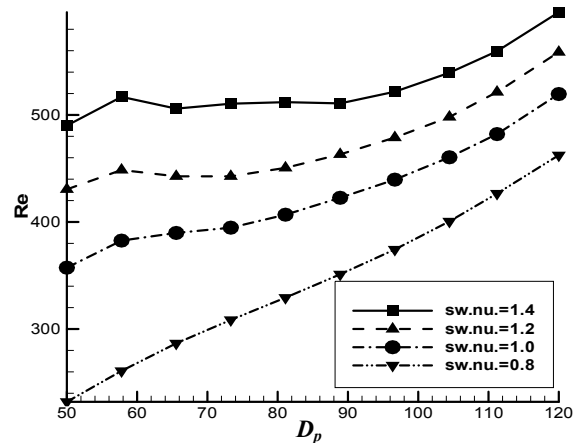
شکل ۷: تغییرات سرعت برخورد (U_D) بر حسب قطر قطره (D_p) برای اعداد چرخش ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۴.

در شکل (۸) تغییرات عدد رینولدز قطره در لحظه برخورد ($Re = D_p U_D / \nu$)، نسبت به اندازه قطره، برای اعداد چرخش ۰/۸ الی ۱/۴، ارائه گردیده است. همانطور که انتظار می‌رود، افزایش عدد چرخش موجب افزایش مقدار Re قطره در لحظه برخورد می‌شود.

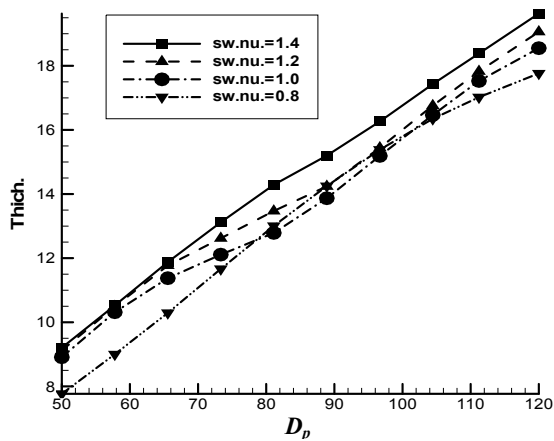
شکل (۹) نشان‌دهنده تغییرات عدد وبر قطره در لحظه برخورد ($We = \rho D_p U_D^2 / \gamma$) که ρ دانسیته قطره و γ کشش سطحی مایع است، نسبت به اندازه قطره در اعداد چرخش ۰/۸ الی ۱/۴، می‌باشد. شکل نشان می‌دهد که با افزایش اعداد چرخش، مقدار وبر برای یک قطر مشخص،



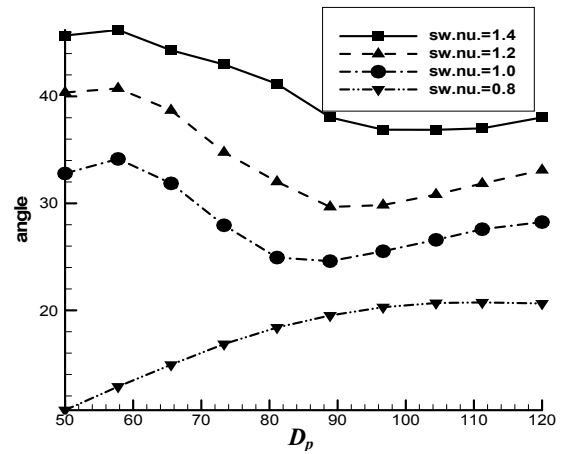
شکل ۹: تغییرات We (عدد وبر قطره در لحظه برخورد) برحسب اندازه قطره در اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .



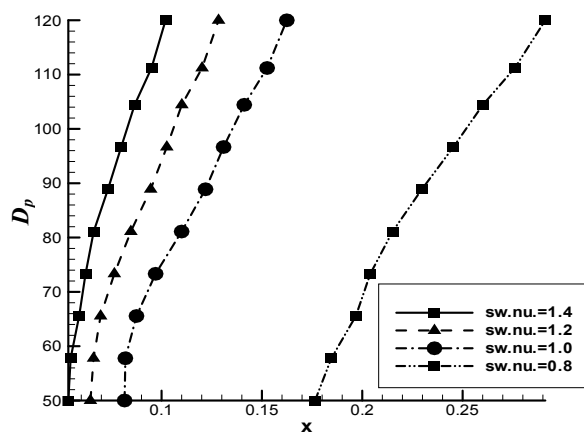
شکل ۸: تغییرات Re (عدد رینولدز قطره در لحظه برخورد) برحسب اندازه قطره برای اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .



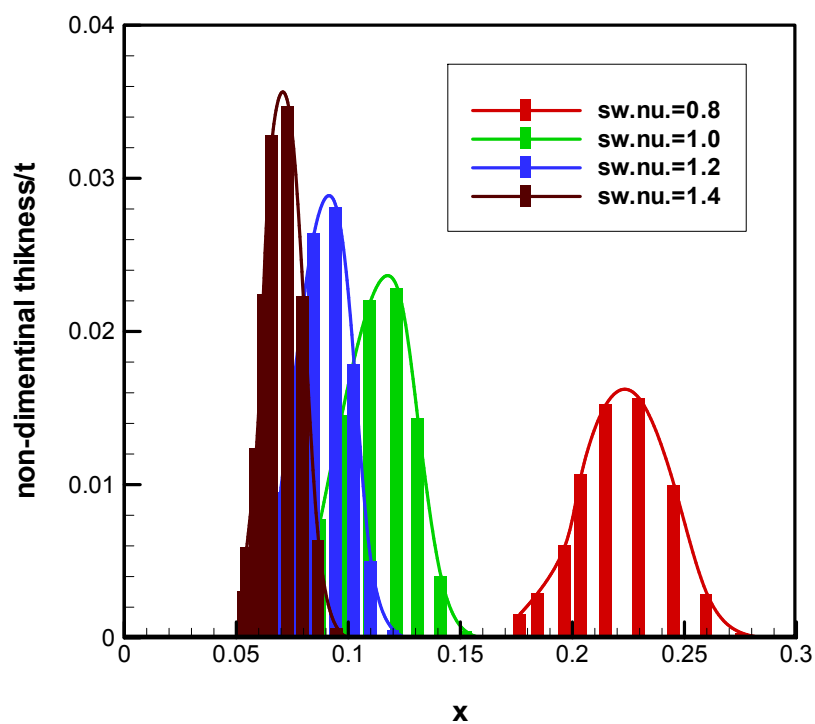
شکل ۱۱: تغییر ضخامت فیلم ایجاد شده بر روی دیواره برحسب اندازه قطرات در اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .



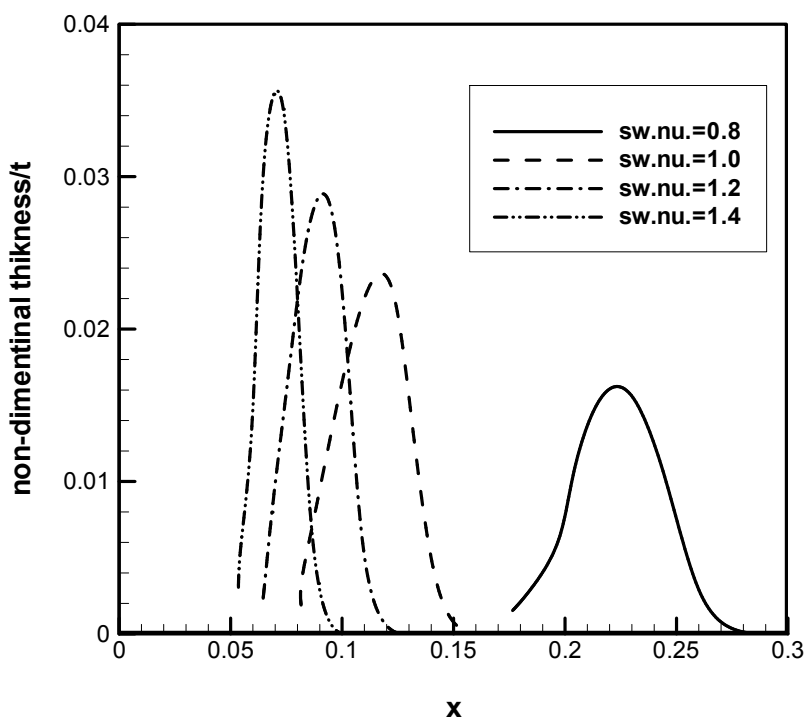
شکل ۱۰: تغییرات زاویه برخورد قطره با دیواره در اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .



شکل ۱۲: فاصله محل برخورد از نازل برای قطرهای گوناگون قطرات و برای اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .



شکل ۱۳: مقدار δ_i^*/t برحسب فاصله محوری لایه نازک ایجاد شده، تا نازل، برای اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .



شکل ۱۴: مقدار δ_i^*/t برحسب فاصله محوری لایه نازک ایجاد شده، تا نازل، بدون خطوط میله‌ای، برای اعداد چرخش $0.8, 1, 1.2$ و 1.4 .

الگوریتم سیمپل حل گردیده‌اند. همچنین توسط شبیه سازی عددی جریان با سطح آزاد، مقدار پخش قطره بر روی سطح و ضخامت ایجاد شده نیز تعیین گردیده است. نتایج و یافته‌های این پژوهش، در فیزیک مورد مطالعه و رنج قطرات شبیه سازی شده نشان می‌دهد که شدت چرخش گاز تاثیر قابل توجهی بر روی محل، زاویه و سرعت برخورد قطره با سطح جامد دارد. با افزایش عدد چرخش فاز گاز، محل برخورد قطرات، به نازل، نزدیک‌تر گردیده و با افزایش قطر قطرات مقدار سرعت برخورد آنها با سطح کاهش یافته و برای یک قطره با قطر مشخص با افزایش عدد چرخش، مقدار سرعت برخورد قطره با سطح، افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد چرخش، مقدار زاویه برخورد قطرات با سطح به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد و مقدار حداکثر ضخامت بدون بعد در واحد زمان، افزایش یافته و دامنه توزیع کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد چرخش، توزیع پوشش ایجاد شده در جهت محوری، به نقطه شروع پوشش نزدیک‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت بدون بعد در واحد زمان، از رتبه $O(0.1)$ می‌باشد.

اگر پاشش در زمان‌های مساوی و برای اعداد چرخش مختلف انجام شود، مقدار حداکثر ضخامت بدون بعد در اعداد چرخش بزرگتر، افزایش یافته، ولی مقدار سطح پوشیده شده توسط ذرات، کاهش می‌یابد.

در شکل (۱۳)، هر خط میله‌ای^{۱۹} نشان‌دهنده یک دسته از ذرات، در دامنه قطرات پاشیده شده می‌باشد. برای مشاهده بهتر منحنی‌های توزیع، مقدار δ_i^*/t ، نسبت به فاصله محوری لایه نازک ایجاد شده تا نازل، بدون خطوط میله‌ای، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با استفاده از شکل به دست آمده و به وسیله تنظیم پارامترهای موثر، پوشش با ضخامت مورد نظر، در هر نقطه از دیواره داخلی استوانه، قابل ایجاد است.

نتیجه گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی ایجاد پوشش بر روی دیواره داخلی استوانه، در فرآیندهای پاششی، مورد مطالعه قرار گرفته است. به وسیله شبیه سازی عددی، معادلات جریان گاز، و حرکت قطره در آن، حل شده و محل، زاویه و سرعت برخورد قطره با دیواره جامد به دست آمده است. این معادلات با استفاده از روابط جریان مغشوش و با کمک

مراجع

- 1 - Ma, J., Yu, S.C.M., and Ng, H. W. (2005). "The Particle In-Flight Characteristics in Plasma Spraying Process Measured by Phase Doppler Anemometry (PDA)." *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 25, No. 1, February PP. 55-86.
- 2 - Miki-Yoshida, M., Antunez-Flores, W., Gomez-Fierro, K., Villa-Pando, L., Silveyra-Morales, R., Sanchez-Santiago, P., Martinez-Sanchez, R., JoseYacama, M. (2006). " Growth and structure of TiO₂ thin films deposited inside borosilicate tubes by spray pyrolysis." *Surface & Coatings Technology*, 200, PP. 4111 – 4116.
- 3 - Takashi, A., Kenichiro, T. Yoshio, H. (2007). "Effects of preheating temperature of NAS battery Al cylinders on the flattening behaviors of high Cr-Fe alloy plasma spray particles and the adhesion strength of internally sprayed coatings." *Nippon Kinzoku Gakkaishi/Journal of the Japan Institute of Metals*, v 71, n 8, August, p PP. 636-640.
- 4 - Uozato, S., Nakata, K., Ushio, M. (2005). "Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores." *Surface & Coatings Technology*, 200, PP. 2580 – 2586.
- 5 - Tu, J.Y. (2000). "Numerical Investigation of Particulate Flow Behavior in Particle-wall Impaction." *Aerosol Science and Technology*, Vol. 32, PP. 509-526.
- 6 - Lee, B.E., Tu, J.Y., Fletcher, C.A.J. (2002). " On numerical modeling of particle-wall impaction in relation to erosion prediction: Eulerian versus Lagrangian method." *Elsevier Science, Wear*, Vol. 252, PP. 179–188.
- 7 - Tian, Z. F., Tu J.Y., and Yeoh, G.H. (2005). "Numerical simulation and validation of dilute gas-particle flow over a backward-facing step" *Aerosol Science and Technology*, Vol. 39, PP.319–332.
- 8 - Sommerfeld, M. (1992). "Modelling of Particle- Wall Collisions in Confined Gas-Particle Flows." *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 18, PP. 905-926.
- 9 - Moghiman, M., Maneshkarimi, M.R. (2000). "Effect of swirl intensity and droplet size on turbulent spray combustion." *J. Ir. Mech. Eng.*, 5-47, PP. 47-59.
- 10 - Tu, J.Y., Yeoh, G.H., Morsi, Y.S., and Yang, W. (2004). " A Study of Particle Rebounding Characteristics of a Gas-Particle Flow over a Curved Wall Surface." *Aerosol Science and Technology*, Vol. 38, PP.739–755.
- 11 - Harlow, F.H, Shannon, J.P. (1967). "The splash of a liquid droplet." *J. Appl. Phys.*, Vol. 38, PP.3855.

- 12 - Trapaga, G., Szekely, J. (1991). "Mathematical modeling of the isothermal impingement of liquid droplets in spraying processes." *Metall. Trans. B*, 22, 901.
- 13 - Liu, H., Lavernia, E.J., Rangel, R. (1993). "Numerical simulation of substrate impact and freezing of droplets in plasma spray processes." *J. Phys., D*, Vol. 26, PP. 1900–1908.
- 14 - Kothe, D.B., Mjolsness, R.C., "RIPPLE : A new model for incompressible flow with surface tension." *AIAAJ.*, Vol. 30, PP. 2694, 1992.
- 15 - Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y.M., Chandra, S. and Mostaghimi, J. (1996). "Capillary effects during droplet impact on a solid surface." *Phys. Fluids.*, 8, 3, PP. 650-659
- 16 - Pasandideh-Fard, M. Bholra, R., Chandra, S., and Mostaghimi, J. (1998). "Deposition of tin droplets on a steel plate: simulations and experiments." *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 41, PP. 2929-2945
- 17 - Fukai, J., Shiiba, Y., Yamamoto, T., Miyatake, O., Poulidakos, D., Megaridis, C.M., Zhao, Z. (1995). "Wetting effects on the spreading of a liquid droplet colliding with a flat surface: experiment and modeling." *Phys. Fluids*, Vol. 7, PP. 236–247.
- 18 - Bertagnolli, M., Marchese, M., Jacucci, G., St Doltsinis, I., Noelting, S. (1997). "Thermo-mechanical simulation of the splashing of ceramic droplets on a rigid substrate." *J. Comput. Phys.*, 133, 205.
- 19 - Bussmann, M., Mostaghimi, J., Chandra, S. (1999). "On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact." *Phys. Fluids*, Vol. 11, PP.1406.
- 20 - Pasandideh-Fard, M., Pershin, V., Chandra, S., Mostaghimi, J. (2002). "Splat shapes in a thermal spray coating process: simulations and experiments." *J. Thermal Spray Technol.*, Vol. 11, No. 12, PP. 206-217.
- 21 - Pasandideh-Fard, M., Chandra, S., Mostaghimi, J. (2002). "A three-dimensional model of droplet impact and solidification." *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 45, PP. 2229–2242.
- 22 - Asadi S., Passandideh-Fard M., Moghiman M., (2008). "Numerical and analytical model of the inclined impact of a droplet on a solid surface in a thermal spray coating process." *Iranian Journal of Surface and Engineering*, Vol. 4, PP. 1-14.
- 23 - Asadi S., Passandideh-Fard M., Moghiman M., (2008). "The effect of contact angle on droplet impact onto a solid surface." *Iranian Journal of Surface and Engineering*, Vol. 6, PP. 27-42.
- 24 - Asadi S., Passandideh-Fard M. (2009). "A Computational Study On Droplet Impingement Onto A Thin Liquid Film." *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34(2B), PP. 505-517.
- 25 - Asadi. S. (2012). " Simulation of nanodroplet impact on a solid surface." *International Journal of Nano Dimension*, in press.
- 26 - Wang, B., Xu, D.L., Chu, K.W., Yu, A.B. (2006). "Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator." *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 30, PP. 1326–1342.
- 27 - Boysan, F., Ayers, W.H., and Swithenbank, J. (1982). "A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design." *Trans. I. Chem. Eng.*, Vol. 60, PP. 222.
- 28 - Saario, A., Rebolab, A., Coelhob, P.J., Costab, M., Oksanen, A. (2005). "Heavy fuel oil combustion in a cylindrical laboratory furnace: measurements and modeling." *Fuel*, Vol. 84, PP. 359–369.
- 29 - Brackbill, J.U., Kothe, D.B., and Zemach, C. (1992). "A continuum method for modeling surface tension." *J. Comput. Phys.*, 100(335).
- 30 - Chung, T. J. (2002). " Computational Fluid Dynamics." *Cambridge university press*.
- 31 - Khalil, E. E., and Whitelaw, J. H. (1976). "Aerodynamic and thermodynamic characteristics of kerosene-pray flame." *Sixteenth Symposium, int. on combustion*, PP.453.
- 32 - C.W. Kang, H.W. Ng. (2006). "Splat morphology and spreading behavior due to oblique impact of droplets onto substrates in plasma spray coating process." *Surface and Coatings Technology*, 200, 18-19, PP. 5462-5477.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|------------------------------|--|
| 1 - Sodium-Sulfur Battery | 2 - Bores |
| 3 - Backward-Facing Step | 4 - Splats |
| 5 - Anisotropic | 6 - Viscous sub layer |
| 7 - Drag | 8 - Stochastic |
| 9 - Isotropic | 10 - Laplace |
| 11 - Continuum Surface Force | 12 - No-Slip |
| 13 - No-penetration | 14 - Power Law |
| 15 - Semi-implicit Scheme | 16 - Yttria-Partially-Stabilized (8%) Zirconia |
| 17 - Mild Steel | 18 - Scanning Electron Microscopy |
| 19 - Bar Line | |