



انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

بررسی و طراحی دستگاه پاشش سرد برای ایجاد پوشش های نفوذی بر روی سطوح قطعات پیشرفته صنعتی

جواد شهبازی کرمی^۱، مسلم شاهمیوند^۲، کرامت ملک زاده^۳

^۱. دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران (دانشجوی دکتری)

^۲. دانشگاه صنعتی شریف، تهران (دانشجوی کارشناسی ارشد)

^۳. دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران (دانشیار)

چکیده

فرآیند پاشش سرد جزو جدیدترین فرآیندهای پوششی است که در آن اتصال ذرات در حالت جامد صورت می گیرد. از قسمت های مهم دستگاه پاشش سرد، نازل این دستگاه است. این بخش سرعت گاز، دمای گاز و سرعت و دمایی که ذره از جریان گاز کسب می کند، را تعیین می کند. در این فرآیند، پوشش با رسیدن سرعت گاز و پودر به سرعت مافوق صوت به وجود می آید، و در کل زمان پوششدهی، دمای ذرات پایین تر از دمای ذوب و یا نرم شدن ذرات می باشد. بنابراین طراحی نازل این دستگاه و به دست آوردن سرعت پودر داخل آن بسیار مهم است. به منظور طراحی نازل در ابتدا پارامترهای هندسی نازل دستگاه استخراج شده و جریان گاز درون این نازل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در ادامه با بررسی نحوه تغییرات سرعت، فشار، دما و چگالی گاز درون این نازل از صحت طراحی اطمینان حاصل شد. در نهایت سرعت پودر در طول نازل دستگاه پاشش سرد مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. مشاهده شد سرعت پودر کمتر از سرعت گاز درون نازل می باشد و با افزایش قطر و چگالی ذرات، سرعت پودر بیشتر کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: دستگاه پاشش سرد، سرعت پودر، طراحی نازل، انسیس

۱- مقدمه

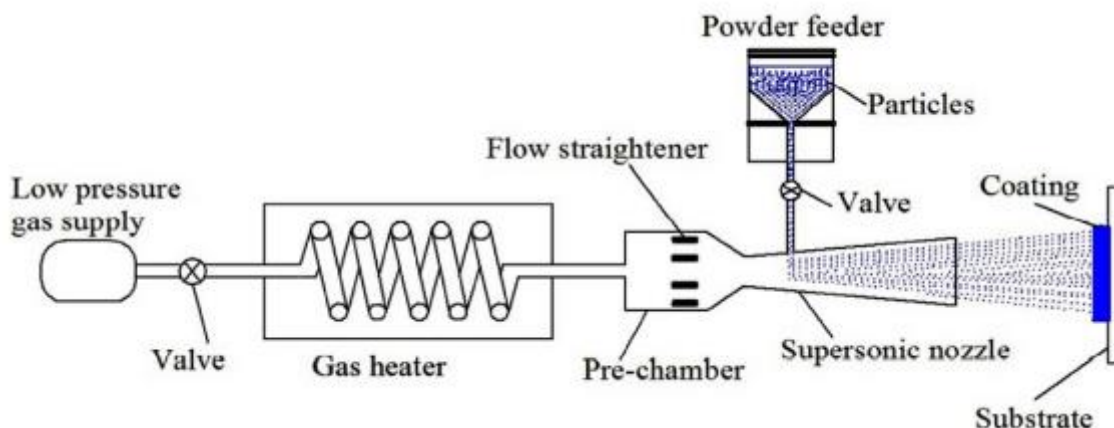
پوشش دهی فلزات برای ایجاد خواص بهتر و یا متفاوت از قدمت زیادی برخوردار است. در دو دهه‌ی اخیر فرآیند پاششی جدیدی به نام پاشش کینتیکی یا اصطلاحاً پاشش سرد ابداع شده و توسعه یافته است که در آن اتصال ذرات بر سطح زیر لایه در حالت جامد، برخلاف فرآیندهای پاشش حرارتی، و با دمای پایین صورت می‌گیرد [۱]. در این فرآیند گاز کاری (هلیوم، نیتروژن یا هوا) با عبور از یک نازل خاص (نازل همگرا - واگرا) ضمن اختلاط با ماده پودری پوشش، تا سرعت‌های مافوق صوت، سرعت گرفته و به شدت به سطح زیر لایه برخورد می‌کند [۲-۵]. این برخورد باعث ایجاد تغییر شکل شدید پلاستیکی در ماده پودری شده و سبب اتصال ذره به زیر لایه در حالت جامد می‌شود. نتیجه چنین اتصالی ایجاد پوشش یکنواخت با تخلخل بسیار کم و استحکام پیوند بالا است [۲, ۵]. در روش پاشش سرد یک جریان سوپرسونیک از گاز مورد نیاز می‌باشد که سرعت ذرات پودر را به بالاتر از سرعت بحرانی آن‌ها برساند [۲]. کار نازل در این روش تبدیل سرعت پایین، دمای بالا و فشار بالای گاز به سرعت بالا، دمای پایین و فشار پایین می‌باشد [۶]. ذرات مورد استفاده در این فرآیند اندازه ایی در حدود ۵ تا ۵۰ میکرومتر دارند. هدف از این جت سوپرسونیک شتاب دادن به ذرات و رساندن سرعت آنها به ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه است [۷]. پژوهشهای بسیاری در مورد چگونگی طراحی نازل انجام شده و به ثبت رسیده است.

دیحوزن و اسمیت [۷] با ابداع یک تئوری که در آن با تعیین عدد ماخ در یک بخش مشخص از قسمت واگرا نازل و سپس با استفاده از این عدد ماخ، پارامترهای دیگر مانند فشار، دما، سرعت و چگالی گاز را تعیین می‌کردند، این تئوری به "قانون دینامیک گاز پاشش سرد" شهرت دارد. به هر حال این تئوری روشی برای به دست آوردن شکل داخلی بخش واگرای نازل فراهم نمی‌کرد. آجلونی در سال ۲۰۱۰ یک روش اتوماتیک برای تعیین شکل نازل همگرا - واگرا سوپرسونیک پیشنهاد کرد [۸]. این روش به روش MOC شهرت دارد. اما روش آجلونی به عددهای ماخ پایین تر از ۲/۵ محدود می‌شود. اگرچه در مطالعات قبلی خین و همکارانش [۶] یک روش عددی برای تعیین الگو جریان نازل سوپرسونیک پیشنهاد دادند، کریمی و همکارانش [۹] با استفاده از روش خین، برای تعیین فشار روی دیواره نازل استفاده کردند و مقادیر به دست آمده از روش خین را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند.

در پژوهش حاضر در ابتدا با استفاده از مطالعات گذشته پارامترهای هندسی نازل محاسبه گردید. سپس نازل طراحی شده درون نرم افزار انسیس شبیه سازی شد و با تعریف شرایط مرزی و شرایط ورودی و خروجی، جریان گاز درون این نازل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در نهایت با داشتن سرعت گاز در طول نازل، با استفاده از روابط آمده در این پژوهش سرعت ذرات پودر درون نازل محاسبه گردید.

۲- مواد و روش تحقیق

به طور ساده دستگاه پاشش سرد از یک مخزن و یک نازل تشکیل شده است. کار مخزن نگهداری پودر و گاز، و کار نازل تبدیل گاز با سرعت پایین به سرعت بالا می‌باشد. نمایی از این دستگاه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: نمایی از دستگاه پاشش سرد فشار پایین [۱۰].

دمای سکون داخل مخزن برای دستگاه پاشش قابل حمل از ۲۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد و برای دستگاه ثابت این دما بین ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد تغییر می‌کند [۲]. در برخی دیگر از پژوهشها، مقدار تغییرات دمای سکون گاز داخل مخزن بین ۳۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد گزارش شده است [۱۱]. در این مطالعه مقدار دمای سکون اولیه داخل مخزن برابر با ۵۰۰ درجه کلونین در نظر گرفته شده است، این دما یک مقدار متوسط بین دماهای گزارش شده می‌باشد. در دستگاه‌های ساخته شده در صنعت مقدار فشار سکون اولیه دستگاه ساکن بین ۲۰ تا ۴۵ بار و برای دستگاه قابل حمل بین ۶ تا ۸ بار می‌باشد. در این پژوهش مقدار فشار اولیه داخل مخزن برابر با ۵۶ بار در نظر گرفته شده است. این فشار با توجه به مدت زمان کاری دستگاه لحاظ شده است.

۲-۱- طراحی نازل

نازل انرژی حرارتی داخل مخزن را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند. مقطع یک نازل می‌تواند دایروی، مستطیلی و یا مربعی باشد. این قانون افزایش سرعت در مورد مقاطع دایروی صادق است. در این پژوهش از نازل با مقطع دایروی استفاده می‌شود.

۲-۱-۱- فرضیات مورد استفاده برای معادلات جریان گاز

به منظور توسعه معادلات جریان که در طراحی نازل دستگاه پاشش سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرضیات و ساده‌سازی‌هایی به صورت زیر انجام گرفته است [۱۰، ۱۲، ۱۳].

- ۱- فرض می‌شود که جریان گاز شبه یک‌بعدی است.
- ۲- فرض می‌شود که جریان ایزوتروپیک می‌باشد.
- ۳- گاز را گاز کامل در نظر می‌گیرند.
- ۴- انبساط گاز به صورت کاملاً یکنواخت اتفاق می‌افتد بنابراین جریان پیوسته و بدون شوک است.

در حالت کلی، هزینه و امنیت فرآیند پاشش سرد، تحت تأثیر انتخاب نوع گاز مورد استفاده می‌باشد. در حالت ایده‌آل، به منظور انتقال حرکت کافی به پودر، گاز باید سرعت صوت بالایی داشته باشد [۲]. نمونه گازهای عملیاتی مورد استفاده در فرآیند پاشش سرد: هلیوم، نیتروژن، هوا و ترکیبی از گازهای هلیوم-نیتروژن و هوا می‌باشد. دو گاز اصلی مورد استفاده در دستگاه پاشش سرد، هلیوم و نیتروژن می‌باشند. هلیوم دارای سرعت صوت بالا، تقریباً سه برابر نیتروژن، است. اما هر دوی این گازها گران قیمت هستند. به هر حال، این نقص را می‌توان با سیستم بازیاب جبران کرد، اما این سیستم بازیاب، قیمت دستگاه پاشش سرد را بالا می‌برد. سرعت صوت هوا کمی کمتر از نیتروژن خالص می‌باشد، اما این گزینه ارزان‌ترین گزینه در دسترس برای استفاده در دستگاه پاشش سرد است. بنابراین در این پژوهش از این گاز در دستگاه پاشش سرد استفاده شد.

۲-۱-۲ ابعاد نازل مورد استفاده

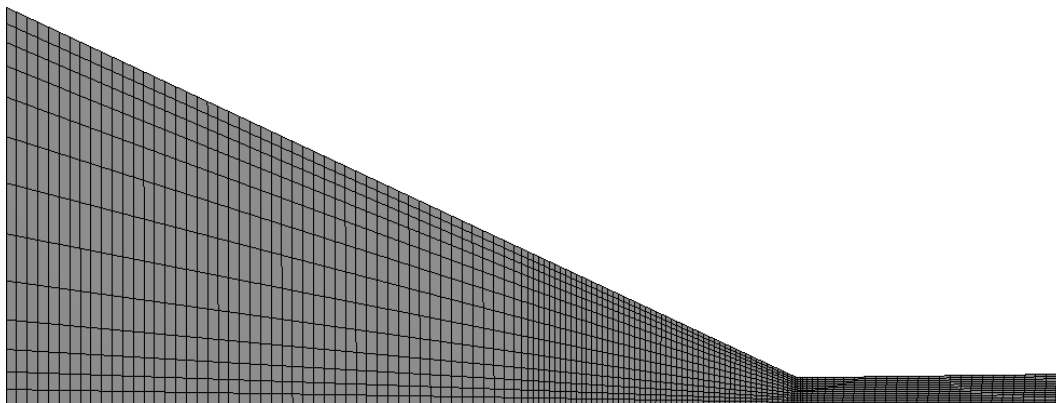
در جدول (۱) مشخصات نازل مورد استفاده در دستگاه پاشش سرد آمده است، لازم به ذکر است که مشخصات نازل مورد استفاده برگرفته از تحقیقات برگزیده‌ی قبلی در این زمینه می‌باشد [۲].

جدول ۱: مشخصات هندسی نازل مورد استفاده.

$L_{div} (mm)$	$L_{div} (mm)$	$L_{div} (mm)$	$\frac{A_e}{A_t}$	$L_{div} (mm)$	$L_{div} (mm)$
۴۰	۲	۴	۴	۵۰	۲۵۰

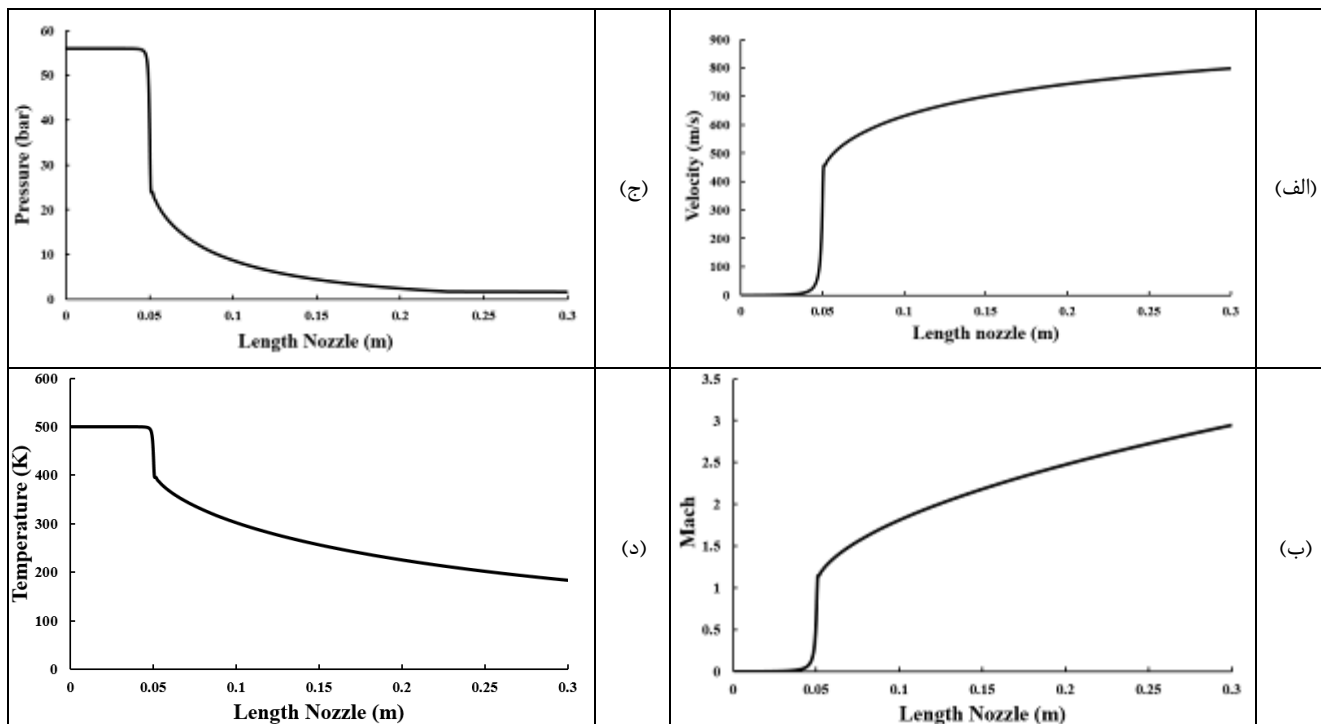
۳-۱-۲ طراحی نازل در انسیس

با استفاده از نرم‌افزار انسیس نازل دستگاه پاشش سرد با استفاده از المان Quad Map که شامل ۳۰۹۴ نود و ۲۸۴۴ المان می‌باشد، مش‌بندی شد. شکل (۲) تصویری از قسمت ابتدایی نازل در حالت مدل مش‌بندی شده در نرم‌افزار انسیس را نشان می‌دهد.

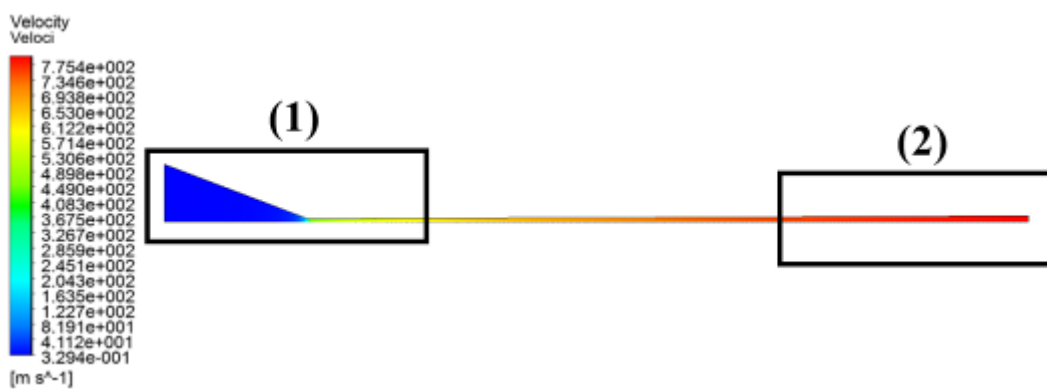


شکل ۲: مدل مش بندی شده نازل درون نرم افزار انسیس.

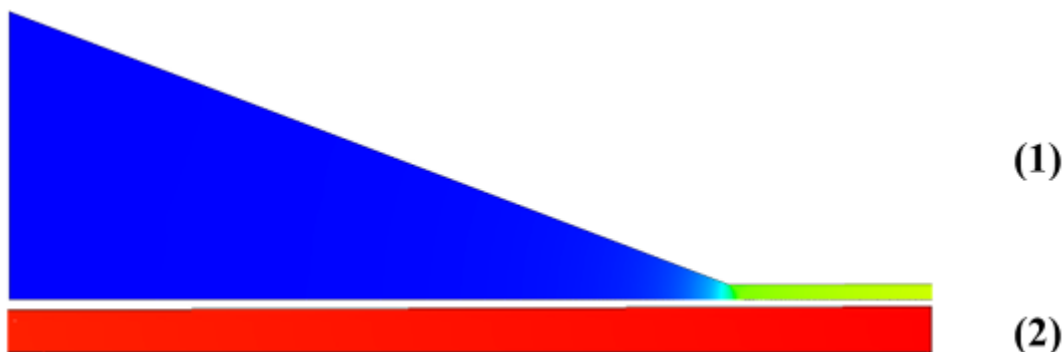
با اعمال فشار ۵۶ بار و دمای ۵۰۰ درجه کلوین در ورودی نازل و اعمال فشار ۱۰۱۳۲۵ پاسکال و دمای ۲۷۳ درجه کلوین به عنوان شرایط محیطی، مدل تحلیل شد. در شکل (۳-الف) نمودار تغییرات سرعت در طول نازل نشان داده شده است همان طور که از این شکل و شکل (۳-ب) مشخص است سرعت در گلوگاه نازل به شدت بالا می رود تا اینکه به ماخ یک می رسد. سپس در قسمت واگرای نازل سرعت مرتب افزایش می یابد تا اینکه سرعت در خروجی نازل به ۷۹۸/۶۱۸ متربرثانیه می رسد. این افزایش سرعت دلیل بر درست کار کردن نازل و طراحی آن می باشد. چنانچه در داخل نازل شوک یا برگشت جریان اتفاق بیفتد سرعت به شدت کاهش می یابد. در شکل (۳-ج) نمودار تغییرات فشار داخل نازل نشان داده شده است، همان طور که از این شکل مشخص است فشار داخل نازل ۵۶ بار می باشد و با افزایش سرعت، فشار استاتیکی مرتب کاهش می یابد. در شکل (۳-د) تغییرات دمای داخل نازل نشان داده شده است همان طور که از این شکل مشخص است دمای داخل نازل ۵۰۰ درجه کلوین می باشد و در طول نازل با افزایش سرعت مرتب کاهش می یابد. این کاهش دما و فشار و افزایش سرعت در داخل نازل دلیل بر درست کار کردن نازل و عدم تشکیل موج و برگشت جریان در داخل نازل است. در شکل (۴) کانتور تغییرات سرعت در داخل نازل نشان داده شده است. به منظور داشتن نمای بهتر از تغییرات سرعت داخل نازل، قسمت هایی با شماره های (۱) و (۲) بر روی نازل مشخص شده است که در شکل (۵) این تغییرات سرعت به طور دقیقتر نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات الف) سرعت، ب) عدد ماخ، ج) فشار استاتیکی و د) دمای استاتیکی در طول نازل.



شکل ۴: کانتور اندازه سرعت در داخل نازل بر حسب متر بر ثانیه.



شکل ۵: نمایی نزدیک تر از کانتور سرعت در داخل نازل.

۲-۲- محاسبه سرعت پودر در داخل نازل

با استفاده از رابطه جینگوی و همکارانش [۱۴] که به صورت رابطه (۱) بیان می شود، می توان سرعت ذرات پودر داخل نازل را بر حسب سرعت گاز درون نازل به دست آورد.

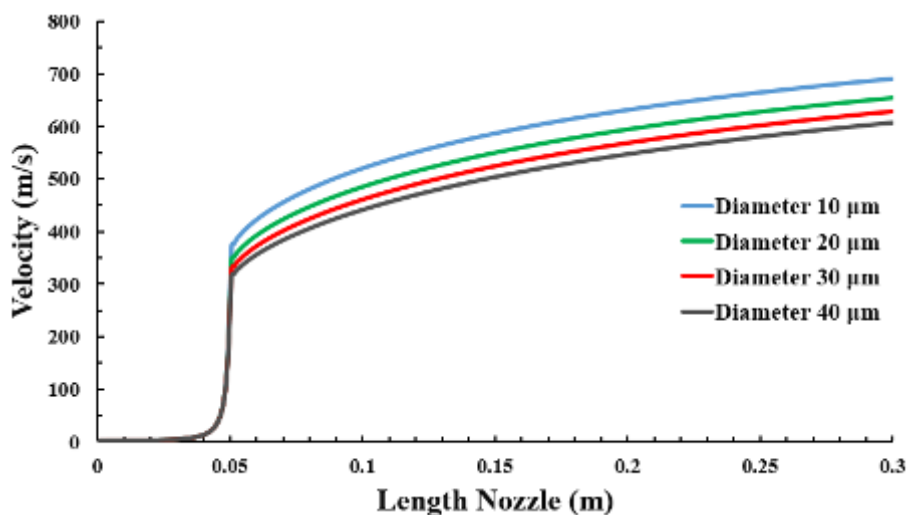
$$v_p = \frac{v_g}{1 + 0.85 \sqrt{\frac{D}{x}} \sqrt{\frac{\rho_p v_g^2}{P_0}}} \quad (1)$$

v_p سرعت ذرات، P_0 فشار اعمال شده به نیتروژن در ورودی نازل، ρ_p چگالی ذرات، D قطر ذرات و x محور ذرات است. در این پژوهش به منظور بررسی سرعت ذره، از ذرات مس و آلومینیوم با مشخصات آمده در جدول (۲) استفاده شده است.

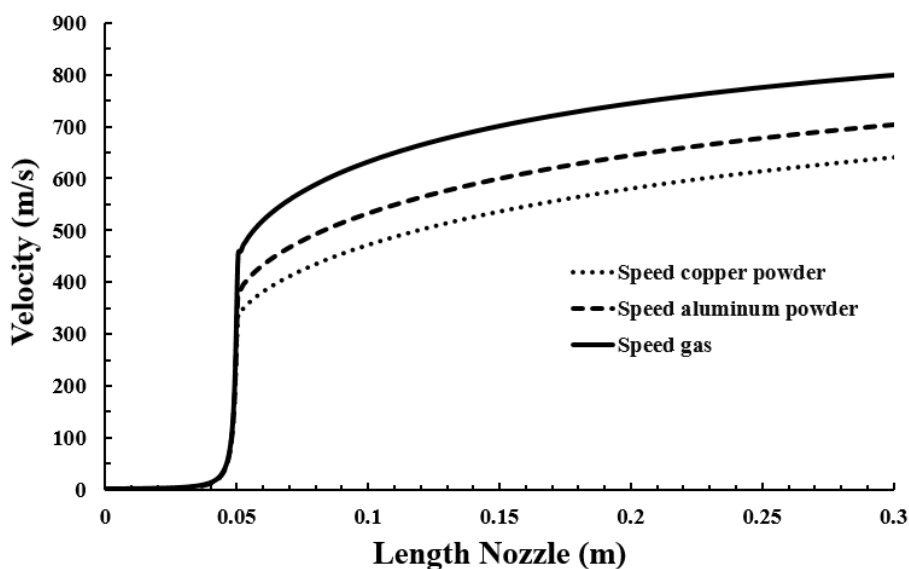
جدول ۲: خواص فیزیکی و مکانیکی ذرات مورد استفاده در این پژوهش.

تنش تسلیم (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg-C)	ضریب انبساط خطی ($1/^\circ C$)	ضریب هدایت حرارتی (W/m-K)	چگالی (kg/m^3)	نوع ماده
۳۳/۳	۱۲۵	۳۸۵	$1/65 \times 10^{-5}$	۲۶۰	۸۹۳۰	مس
۸۵	۶۵	۹۰۲	$2/386 \times 10^{-5}$	۲۳۰	۲۷۰۰	آلومینیوم

در شکل (۶) تغییرات سرعت پودر در داخل نازل به ازای تغییر قطر ذرات نشان داده شده است. همانطور که از این شکل قابل مشاهده است با افزایش قطر ذرات، سرعت پودر در داخل نازل کاهش می یابد. در این پژوهش قطر ذرات برابر ۲۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. در شکل (۷) تغییرات سرعت گاز، پودر آلومینیوم و پودر مس در داخل نازل نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، سرعت پودر داخل نازل کمتر از سرعت خود گاز است، این کاهش سرعت برای پودرهایی که چگالی بیشتری دارند، بیشتر است. یعنی با افزایش چگالی پودر سرعت پودر بیشتر کاهش می یابد.

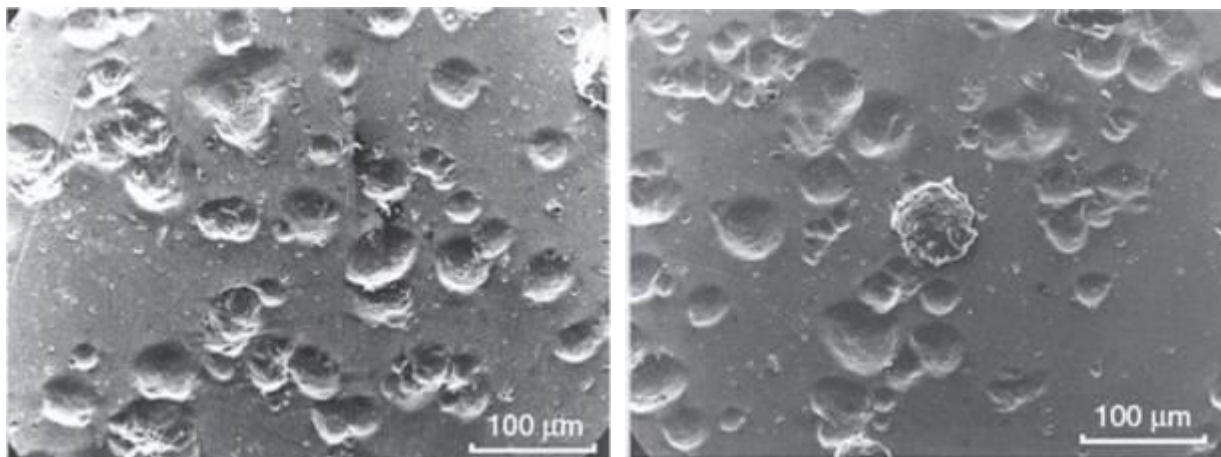


شکل ۶: تغییرات سرعت ذرات مس با تغییر قطر ذرات، درون نازل.



شکل ۷: تغییرات سرعت پودر آلومینیوم و مس در طول نازل برای ذره با اندازه ۲۵ میکرومتر.

برای اینکه ذرات پس از برخورد به سطح بچسبند، باید سرعت این ذرات، بیشتر از سرعت بحرانشان باشد. در روش پاشش سرد، سرعت بحرانی کمترین سرعت برخورد یک ذره به سطح است که بعد از برخورد باعث چسبیدن ذره به سطح می شود. در سرعت های کم و متوسط (در حدی که ذره انرژی کافی برگشت از سطح را داشته باشد) برخورد مداوم ذرات بر روی سطح زیر لایه سبب تغییر شکل و سایش سطح می شود. شکل (۸) اثر برخورد ذرات آلومینیوم با سطح مس و آسیب ایجاد شده در اثر سایش را نشان می دهد [۱۵].

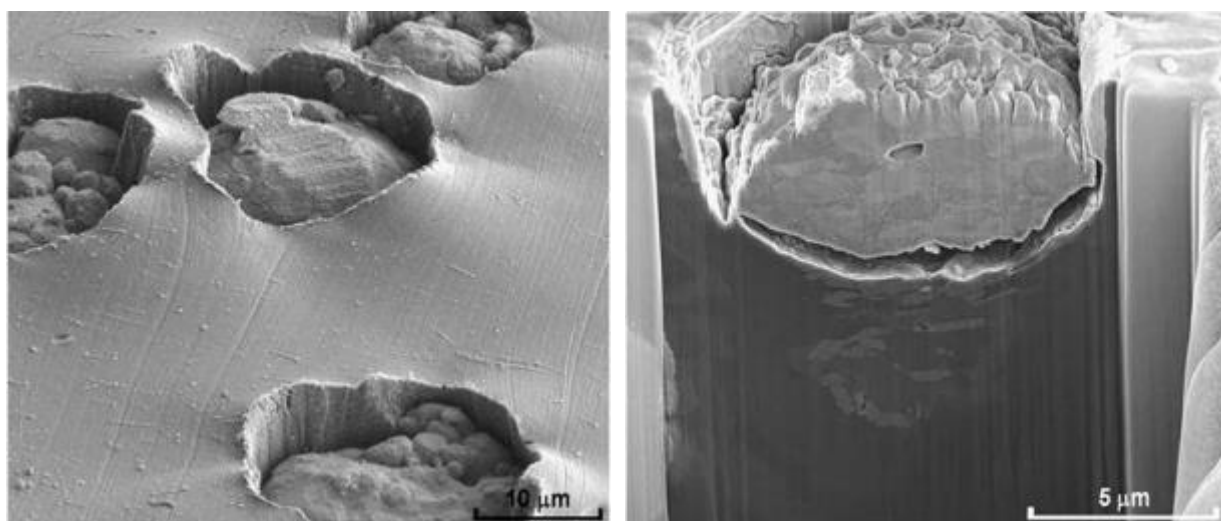


(ب)

(الف)

شکل ۸: نمایی از سطح پولیش شده زیر لایه مسی پس از برخورد ذرات آلومینیم با قطر $30/2$ میکرون و با سرعت (الف) 730 متر بر ثانیه و (ب) 780 متر بر ثانیه به آن [۱۵].

در صورتی که ذرات ریز (چند ده میکرومتر) با میزان انرژی جنبشی (سرعتی) که برای تغییر شکل زیر لایه کافی باشد به آن برخورد نمایند، می‌تواند به مقدار قابل توجهی در داخل سطح نفوذ کنند. وقوع این پدیده بستگی به عوامل مختلفی از جمله سختی زیر لایه و ذره دارد. شکل (۹) نفوذ عمیق ذرات مس در داخل زیر لایه آلومینیمی را نشان می‌دهد. متوسط عمق نفوذ حدوداً $1/1$ برابر قطر ذره بوده است. با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت که نفوذ ذرات در زیر لایه با تغییر شکل موضعی شدید زیر لایه (در محل برخورد) همراه است. همچنین با توجه به شکل، در لبه‌های حفره ایجاد شده در آلومینیم، می‌توان نشانه‌هایی از گسیختگی مشاهده نمود [۱۶].



(ب)

(الف)

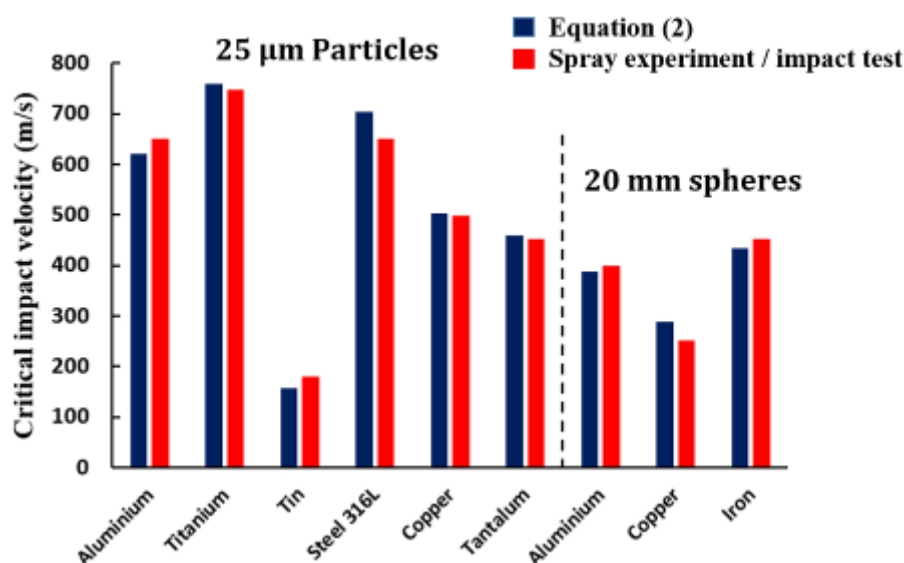
شکل ۹: ذرات مس با اندازه متوسط 15 میکرون در داخل حجم آلومینیم: (الف) نمای بالایی، (ب) مقطع ایجاد شده توسط پرتو متمرکز یونی [۱۶].

در طراحی نازل دستگاه پاشش سرد، سرعت بحرانی بیشتر فلزات و آلیاژها در محدوده ۵۰۰ تا ۷۰۰ متر بر ثانیه گزارش شده است [۱۷]. با این حال، پیش گرمایش ذرات منجر به افزایش انعطاف پذیری ذرات، و بعلاوه باعث کاهش سرعت بحرانی مورد نیاز برای رسوب ذرات می شود. بر طبق پژوهشهای انجام شده توسط اشمیت [۱۸]، سرعت بحرانی ذرات را می توان با استفاده از فرمول (۲) محاسبه کرد:

$$v_{crit}^{th,mech} = \sqrt{\frac{4F_1\sigma_{TS}(1 - \frac{T_i - T_R}{T_m - T_R})}{\rho} + F_2c_p(T_m - T_i)} \quad (2)$$

سرعت بحرانی، $v_{crit}^{th,mech}$ ضریب کالیبراسیون مکانیکی، F_2 ضریب کالیبراسیون حرارتی، c_p ضریب گرمای ویژه، T_i دمای برخورد، T_m دمای ذوب، T_R دمای مرجع که ۲۹۳ درجه کلوین می باشد و σ_{TS} تنش کششی می باشد. باید به این نکته توجه داشت که انرژی جنبشی و اتلافات حرارتی روی ضربه تاثیر دارد. ضرائب کالیبراسیون حرارتی و مکانیکی از طریق آزمایش محاسبه می شوند و مورد استفاده قرار می گیرند. در شکل (۸) سرعت بحرانی به دست آمده از طریق رابطه (۲) و آزمایشگاه باهم مقایسه شدند.

همان طور که از این شکل مشاهده می شود سرعت بحرانی مس ۳۰۰ متر بر ثانیه و سرعت بحرانی آلومینیوم ۴۰۰ متر بر ثانیه می باشد. برای اینکه ذره به سطح بچسبد، این ذرات باید سرعتی بیشتر از ۳۰۰ متر بر ثانیه برای مس و ۴۰۰ متر بر ثانیه برای آلومینیوم داشته باشند. مقادیر سرعت به دست آمده با استفاده از نازل طراحی شده برای این دو ذره، بیشتر از مقادیر سرعت بحرانی این دو ذره می باشند. پس می توان نتیجه گرفت که ذره به طور کامل به سطح مورد نظر می چسبد و هیچ گونه جدایی صورت نمی گیرد.



شکل ۱۰: مقایسه سرعت بحرانی محاسبه شده از رابطه با مقدار محاسبه شده از آزمایشات و تست ضربه [۱۸].

مراجع

1. Tabbara, H., et al., *Study on process optimization of cold gas spraying*. Journal of thermal spray technology, 2011. **20**(3): p. 608-620.
2. Champagne, V.K., *The cold spray materials deposition process: fundamentals and applications*. 2007: Elsevier.
3. Gärtner, F., et al., *The cold spray process and its potential for industrial applications*. Journal of Thermal Spray Technology, 2006. **15**(2): p. 223-232.
4. Ghelichi, R. and M. Guagliano, *Coating by the Cold Spray Process: a state of the art*. Fracture and Structural Integrity, 2009(8): p. 30-44.
5. Bigvand, A.G., *Coating of metals by cold spray process*, in *School of Engineering*. 2009, TMU. p. 138.
6. Naung, K.T. and N. Soe, *Numerical approach for determination of supersonic nozzle flow pattern*. 2008.
7. Dykhuizen, R. and M. Smith, *Gas dynamic principles of cold spray*. Journal of Thermal Spray Technology, 1998. **7**(2): p. 205-212.
8. Al-Ajlouni, M., *An Automatic Method for Creating the Profile of Supersonic Convergent-Divergent Nozzle*. JJMIE, 2010. **4**(3).
9. Karimi, M., et al., *Numerical simulation of the cold gas dynamic spray process*. Journal of thermal spray technology, 2006. **15**(4): p. 518-523.
10. Maev, R.G. and V. Leshchynsky, *Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray: Physics and Technology*. 2009: John Wiley & Sons.
11. Alkhimov, A.P., et al., *Gas-dynamic spraying method for applying a coating*. 1994, Google Patents.
12. Dorf, R.C., *The engineering handbook*. 2004: CRC Press.
13. Grujicic, M., et al., *Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process*. Materials Science and Engineering: A, 2004. **368**(1): p. 222-230.
14. Wu, J., et al., *Measurement of particle velocity and characterization of deposition in aluminum alloy kinetic spraying process*. Applied surface science, 2005. **252**(5): p. 1368-1377.
15. Papyrin, A., et al., *Cold spray technology*. 2006: Elsevier.
16. King, P.C., S. Zahiri, and M. Jahedi, *Focused ion beam micro-dissection of cold-sprayed particles*. Acta Materialia, 2008. **56**(19): p. 5617-5626.
17. Kim, H.-J., C.-H. Lee, and S.-Y. Hwang, *Superhard nano WC-12% Co coating by cold spray deposition*. Materials Science and Engineering: A, 2005. **391**(1): p. 243-248.
18. Schmidt, T., et al., *Development of a generalized parameter window for cold spray deposition*. Acta materialia, 2006. **54**(3): p. 729-742.