

تأثیر دامنه‌ی ارتعاش و دما بر شکل و اندازه‌ی پودر آلومینیوم تولید شده با فرایند اتمیزه‌کننده آلتراسونیک

محمد مهدی مجتهدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حمید سلیمانی‌مهر* (استادیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده‌ی مکانیک برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

محمد معظمی‌گودرزی (استادیار)

گروه مهندسی مواد، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۲)
دوری ۳-۲، شماره ۱، ص. ۳۵-۲۵، (پژوهشی)

در این مقاله تأثیر دامنه‌ی ارتعاش بر شکل و اندازه پودر آلومینیوم تولید شده با فرایند اتمیزه کردن فراصوتی با فرکانس ارتعاشی ۲۰ کیلو هرتز بررسی شده است. تأثیر عواملی چون دمای مذاب و دامنه‌ی امواج فراصوتی بر اندازه ذرات و شکل ذرات بررسی شد. همچنین بررسی شد هرکدام از عوامل در چه سطحی بر مشخصات مورد انتظار تحقیق تأثیر گذارند. با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده شد با افزایش دمای مذاب گرانروی مذاب کمتر شده و در نتیجه اتمیزه شدن مذاب راحت‌تر می‌شود و همچنین نیروی کشش سطحی کاهش یافته و جدا شدن قطره‌ی مذاب از فیلم مذاب ایجاد شده بر اتمیزه‌کننده آسان‌تر شد. و نیز مشاهده شد با افزایش اندازه‌ی دامنه‌ی ارتعاش پودر فلز تولید شده از لحاظ اندازه دارای میانگین اندازه‌ی کوچک‌تری است. میانگین قطر ذرات پودر تولید شده در این آزمایش ۸۲/۴۳ میکرون، بیشینه‌ی قطر ذرات ۹۲/۱۶ میکرون و کمینه‌ی قطر ذرات ۷۱/۳۳ میکرون بوده است.

واژگان کلیدی: فراصوتی، اتمیزه کردن، پودر آلومینیوم، دامنه‌ی ارتعاش، فرکانس.

mehdi.mojtahedi92@gmail.com
soleimanimehr@srbiau.ac.ir
moazami@srbiau.ac.ir

۱. مقدمه

ایجاد قطرات کوچک یا مه که دارای توزیع نسبتاً یکنواخت اندازه قطره هستند به کار گرفته می‌شود.

برای تولید پودر مواد در اندازه‌های میکرو و نانو نیز از این روش می‌توان بهره برد.^[۱] در اتمیزه کردن فراصوتی مایعات با گرانروی بالا، با تغییر مؤلفه‌های تولیدکننده‌ی امواج فراصوتی می‌توان اندازه‌ی قطرات و گستره‌ی توزیع اندازه‌ی قطرات را تغییر داد.^[۲] سال‌هاست که از اتمیزه کردن فراصوتی تماسی برای تولید پودرهای دارویی و لحیم‌کاری استفاده می‌شود؛ زیرا در این فرایند ساخت، تولید پودرهای فلزی با شکل کروی، ناخالصی کم‌تر و گستره‌ی توزیع اندازه باریک‌تر امکان‌پذیر است. روش اتمیزه کردن فلز مذاب با استفاده از امواج فراصوتی منجر به اختراع یک دستگاه اتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی با سرازیر چتری شد.^[۳] شیوه‌ی تولید پودرهای فلزی توسط اتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی مدت‌هاست که شناخته شده است؛ به ویژه اتمیزه کردن فلزات دارای نقطه‌ی ذوب پایین. مزایای این روش تولید پودر فلز عبارت است از: ۱. اکثر

پودر آلومینیوم در شکل‌های مختلفی از جمله ورقه‌بی، کروی و نامنظم تولید می‌شود که هرکدام کاربردهای مختلفی دارد. پودر آلومینیوم در اندازه‌ی میکرو، کاربردهای گوناگونی دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده در ساخت فیلترها، ساخت باتاقان‌های کشویی، استفاده در ترکیب سوخت پیشران‌های سوخت جامد اشاره کرد. چالش‌های موجود در تولید پودر فلزات باعث بهبود روش‌های معمول اتمیزه کردن و توسعه‌ی فرایندهای جدید اتمیزه کردن با بهره‌وری بالا و صرفه‌ی اقتصادی بیشتر شده است. شیوه‌های مختلفی برای اتمیزه کردن وجود دارد؛ مانند اتمیزه کردن با استفاده از دیسک چرخان، گازی، اتمیزه کردن آبی و اتمیزه کردن با استفاده از امواج فراصوتی. از طرفی اتمیزه کردن مایعات به وسیله‌ی امواج فراصوتی اغلب به عنوان روشی برای

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۲/۳۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۵/۱۲، پذیرش ۱۴۰۱/۵/۲۴

DOI:10.24200/J40.2022.60374.1640

استناد به این مقاله:

مجتهدی، محمد مهدی، سلیمانی‌مهر، حمید و معظمی‌گودرزی، محمد (۱۴۰۲). «تأثیر دامنه‌ی ارتعاش و دما بر شکل و اندازه‌ی پودر آلومینیوم تولید شده با فرایند اتمیزه‌کننده آلتراسونیک»، مهندسی مکانیک شریف، (۱) ۳-۳۹، ص. ۳۵-۴۵

ذرات تولید شده به شکل کروی هستند. ۲. گستره توزیع اندازه‌ی ذرات باریک است. ۳. این قابلیت در این نوع سیستم‌ها وجود دارد که با تغییر فرکانس امواج فراصوتی اندازه‌ی قطر ذرات را تغییر دهیم. ۴. با انتخاب یک گاز محافظ مناسب (آرگون یا هلیوم) میزان اکسیداسیون کمینه و شکل ذرات کروی می‌شود. البته در این تحقیق به دلیل هزینه بالای استفاده از گاز محافظ و تجهیزات پیچیده‌ی آن، آزمایش بدون محافظت گاز و در حضور اکسیژن انجام شد و نیز تأثیر این مطلب بر شکل ذرات پودر تولید شده بررسی شد. این مزایا در مقایسه با روش‌های تولید معمولی، استفاده از این روش را توجیه می‌کند. در این مقاله پیرامون روش تولید پودر آلومینیوم با استفاده از امپدانس کردن فراصوتی تحقیق شد. چالش‌هایی که در این تحقیق با آن روبه‌رو بودیم عبارت‌اند از: ۱. شکل محصول نهایی. ۲. قرار داشتن اندازه ذرات پودر تولید شده در گستره‌ی اندازه‌ی مناسب. ۳. یافتن تأثیر مؤلفه‌های مد نظر تحقیق بر مشخصات پودر تولید شده. ۴. تعیین میزان تأثیر هریک از مؤلفه‌های مد نظر تحقیق در مشخصات پودر تولید شده. یعنی این که باید با انجام آزمایش‌های متعدد و به صورت تجربی دریافت که چگونه می‌توان از این روش امپدانس کردن به این نتایج دست پیدا کرد. در این تحقیق تلاش شد تا با استفاده از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی تأثیر هر کدام از مؤلفه‌ها مانند دامنه‌ی ارتعاش و دمای مذاب آلومینیوم بر مشخصات نهایی محصول مشخص شود؛ مشاهده شد که این تأثیر در چه سطحی است. پولمن و همکارانش طی یک تحقیق، اقدام به ساخت پودر آلومینیوم و انواع آلیاژهای آن از جمله آلیاژ آلومینیوم و سرب، آلیاژ آلومینیوم و قلع و نیز اکسید آلومینیوم با استفاده از امواج فراصوتی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز کردند. آنها می‌دانستند که: ۱. تقریباً تمام فلزات در آلومینیوم مذاب حل می‌شوند و این حلالیت زمانی که با عمل امپدانس کردن همراه می‌شود افزایش می‌یابد. ۲. دانسیته‌ی آلومینیوم تا اندازه‌ی کمی است؛ از این رو برای تحریک آن امواج فراصوتی با دامنه‌های بزرگ‌تر لازم است. ۳. آلومینیوم مذاب در هوا با یک لایه اکسید سخت پوشیده می‌شود و این مطلب نیز باعث می‌شود برای تحریک مذاب آلومینیوم برای امپدانس شدن از امواج با دامنه‌های بزرگ‌تری استفاده کنند. ۴. به دلیل کشش سطحی زیاد و دانسیته‌ی کم ایجاد باریکه‌ی مذاب از آلومینیوم بسیار مشکل است. ۵. به بررسی پودرهای تولید شده پی بردند که پودرهایی که در حضور اکسیژن امپدانس شده‌اند به صورت اشکی درآمده‌اند ولی پودرهایی که تحت محافظت گاز بی‌اثر امپدانس شده‌اند کاملاً کروی هستند. به منظور یافتن جنس مناسب برای ساخت هورن، چند میله از مواد مختلف تهیه کردند و آنها را به یک ویراتور ۲۰ کیلوهرتری متصل کردند و همگی را تا چند میلی‌متر در مذاب آلومینیوم فرو بردند. طبق یافته‌های آنها تنگستن خالص کم‌ترین انحلال را در مذاب آلومینیوم داشته و مناسب‌ترین ماده برای تهیه قسمت هورن و نازل مذاب بوده است.^[۴] تولید پودر آلومینیوم از روش‌های مختلفی مانند امپدانس کردن گازی، برخورد مواد مذاب با دیسک چرخان، الکتروپراکنده و امپدانس کردن فراصوتی میسر است که هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارند.^[۵] در سال ۱۹۲۷، پدیده‌ی امپدانس کردن فراصوتی مایعات برای اولین بار و به طور مقدماتی توسط لومیس و وودز کشف و تحلیل شده است. شیلین لی و همکارانش روی مدل ریاضی کار کردند تا بتوانند قطر میانگین ذرات تولید شده به وسیله‌ی امپدانس کردن فراصوتی مایعات را پیش‌بینی کنند. خطای نسبی این مدل در حدود ۵٪ بوده است.^[۶] این مسئله توجه دو کشر دانشگاهیان و صنعتگران را به خود جلب کرد. کاربرد مهم دیگر این سیستم در تولید پودر فلزات تقریباً یکسان و به شکل کروی است که اخیراً برگستره‌ی استفاده از آنها در صنعت افزوده شده است. لیرک و همکارانش روی امپدانس کردن فلزات با نقطه‌ی ذوب پایین (حداکثر تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) با امواج فراصوتی با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و ۰/۸ مگاهرتز مطالعه داشته‌اند. آنها متوجه شدند که امپدانس کردن مورد استفاده برای این کار باید

از مواد مقاوم در برابر خوردگی - مانند تیتانیوم ۳۱۸ با روکش اکسید آلومینیوم - ساخته شود تا بتوان آزمایش را برای دفعات زیاد و به طور مداوم انجام داد.^[۷] برای مثال از امپدانس کننده‌های فراصوتی می‌توان برای ساخت وسیله‌ی مایعات را در هوا به صورت ذرات معلق پراکنده کند استفاده کرد؛ این فرایند برای درمان افرادی که دچار بیماری‌های دستگاه تنفسی هستند مفید خواهد بود. جینگون دوئان و همکارانش روی روش‌های مختلف امپدانس کردن مطالعاتی انجام دادند^[۸] و نشان دادند که کاربرد دیگر امپدانس کننده‌ی فراصوتی در سیستم‌های پاشش سوخت انواع موتورهای سوخت فسیلی (بزن یا گازوتیل) برای ایجاد یک جریان یکنواخت حاوی قطره‌های بسیار ریز سوخت است. عامر العجمی و همکارانش نیز در مورد پتانسیل استفاده از این فناوری برای کمک به فرایند احتراق مطالعاتی انجام دادند و دریافتند که استفاده از دستگاه امپدانس کننده‌ی فراصوتی برای کمک به فرایند احتراق در دستیابی به راندمان موتور ۱٪ و کاهش ۲۵٪ در گاز خروجی دی اکسید کربن مفید بوده است.^[۹] شیکلیف و همکارش در تحقیقی، عوامل و پارامترهای مختلف موجود در فرایند تولید پودر فلزاتی با دمای ذوب کم‌تر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را با روش امپدانس کردن فراصوتی بررسی کردند. آنها ابتدا تأثیر ضخامت لایه‌ی مذاب تشکیل شده روی سطح هورن (فیلم مذاب) را بر بازده تولید پودر فلز بررسی کردند (مقصد آنها پودر فلز با اندازه مناسب یعنی کوچک‌تر از ۵۶ میکرون بود) و متوجه شدند که وقتی ضخامت لایه‌ی مذاب از ۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد بازده دستگاه نیز بیشتر می‌شود تا زمانی که این ضخامت به ۲ میلی‌متر می‌رسد. پس از این که ضخامت لایه‌ی مذاب از ۲ میلی‌متر بیشتر می‌شود بازده سیستم کاهش می‌یابد و این روند کاهش تا زمانی که ضخامت لایه مذاب به ۵ میلی‌متر می‌رسد ادامه دارد. در این آزمایش بسامد امواج فراصوتی ۲۲ کیلوهرتز و دامنه‌ی ارتعاشات ۳۰ میکرون بوده است.^[۱۰] کاسیوپولی و همکارانش به بررسی نوعی امپدانس کننده‌ی فراصوتی بهینه شده برای تولید پودر فلزات با دمای ذوب پایین پرداختند. امپدانس کننده‌ی آنها برای تولید نانوساختارهای پودر فلزاتی با اندازه مناسب طراحی و ساخته شده بود. آنها دریافتند که انجماد سریع قطرات مذاب و تبدیل آنها به پودر فلز ناشی از انتقال حرارت به صورت همرفتی است. همچنین آنها توانستند اندازه قطرات مذاب امپدانس شده و به عبارتی اندازه ذرات پودر تولید شده را با استفاده از تغییر در مؤلفه‌های سیستم امپدانس کردن فراصوتی تحت کنترل خود قرار دهند.^[۱۱] رامیستی و همکارانش به بررسی گستره‌ی توزیع اندازه قطرات ایجاد شده توسط یک امپدانس کننده‌ی فراصوتی پرداختند. آنها از روش تجزیه و تحلیل تصویر بهره گرفتند و مشاهده کردند که اندازه‌ی قطره با افزایش فرکانس امپدانس کننده کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد با افزایش شدت ارتعاشات فراصوتی گستره‌ی اندازه قطرات از یک باریکه‌ی کوچک به یک گستره‌ی وسیع‌تر تبدیل می‌شود و اندازه قطره با افزایش گران‌روی سیال کاهش می‌یابد.^[۱۲] براسینوگوتیز و همکارانش با ساخت ۹ عدد ترانس‌دیوسر فراصوتی با قدرت بالا به بررسی نظریه‌های موجود و نیز نتایج آزمایش در رابطه با فرکانس آستانه‌ی امپدانس کردن پرداختند که نتایج آزمایش‌ها و پیش‌بینی‌های نظری تا محدوده‌ی فرکانس ۲۲ کیلوهرتز با هم مطابقت داشتند ولی برای فرکانس‌های بالاتر نتایج خلاف یکدیگر بود.^[۱۳] دیوو و همکارانش رفتار امپدانس شدن یک قطره را به صورت تجربی تحت تأثیر ارتعاشات فراصوتی بررسی کردند. در تحقیق آنها از تصویربرداری با سرعت بالا برای اندازه‌گیری مدت زمانی که طول می‌کشد امپدانس کردن قطره اتفاق بیفتد استفاده شد. در این تحقیق معلوم شد نرخ امپدانس کردن با افزایش اندازه‌ی قطرات اولیه افزایش می‌یابد و همچنین به تغییرات گران‌روی بسیار حساس است، در حالی که به تغییرات کشش سطحی حساس نیست.^[۱۴] علوی و همکارانش در تحقیقی به بررسی تأثیر ارتعاشات امواج فراصوتی در زمینه‌ی تولید پودر فولاد ضد زنگ به روش تابش



شکل ۱. منبع تغذیه استفاده شده در این آزمایش (مدل ULPS2000).



شکل ۲. ترانسدیوسر استفاده شده در این آزمایش.



شکل ۳. طرح سه بعدی هورن آلومینیومی استفاده شده در این آزمایش (طراحی با نرم افزار Inventor).



شکل ۴. کوره الکتریکی استفاده شده در این آزمایش (Nabertherm D - 2804).

۴.۱.۲. کوره الکتریکی

در این آزمایش باید دمای مذاب به دقت کنترل شود. به همین منظور از یک کوره الکتریکی (مدل Nabertherm D - 2804) (شکل ۴) که قابلیت کنترل و تنظیم

لیزر بر سطح فلز پایه پرداختند. در این روش آنها پرتوی لیزر دی اکسیدکربن با توان ۹۵۰ وات روی سطح قطعه فلز فولاد ضد زنگ در حال ارتعاش با فرکانس ۲۰ کیلو هرتز تاباندند. آنها دریافتند تابش لیزر بر قدرت روی سطح فلز باعث ذوب شدن فلز در نقطه‌ی تمرکز اشعه شده و تشکیل یک حوضچه مذاب می‌دهد. از طرفی ارتعاشات فراصوتی هم کمک می‌کند قطرات مذاب تشکیل شده راحت‌تر به بیرون از حوضچه پرتاب شود. به این صورت یک فرایند تولید پودر فلز از مذاب آن با کمک امواج فراصوتی شکل گرفت. در ادامه آنها دیدند ذرات تولید شده بسیار کروی هستند.^[۱۵] محققان با مطالعه در خصوص تولید پودر SAC305 با استفاده از دستگاه امتیزه‌کننده فراصوتی، اثرات پارامترهای عملیاتی مانند دمای مذاب، سرعت تغذیه مذاب، دامنه‌ی موج صوتی و حضور اکسیژن در ظرف امتیزه‌کننده، بر اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات و مورفولوژی پودر امتیزه شده را بررسی کردند. نتایج تجربی نشان داد که اندازه‌ی ذرات متوسط و توزیع اندازه‌ی ذرات با افزایش دمای مذاب به دلیل کاهش گرانروی و کشش سطحی در دماهای بالاتر، به ترتیب کوچک‌تر و باریک‌ترند. با کاهش نرخ تغذیه‌ی مذاب و کاهش دامنه‌ی ارتعاش، اندازه‌ی ذرات میانه کاهش می‌یابد و توزیع اندازه‌ی ذرات یکنواخت‌تر می‌شود، زیرا ضخامت لایه‌ی مذاب روی پروب با سرعت تغذیه‌ی پایین‌تر نازک‌تر است. بنابراین قطرات می‌توانند به راحتی از رأس‌های کوچک خارج شوند. آنها دریافتند که بدون حضور گاز محافظ، بیشتر ذرات به شکل نامنظم، قطره‌ی اشک و رباط درآمدند. با این حال، پودرهای امتیزه شده با کاهش محتوای اکسیژن در محفظه‌ی امتیزه‌کننده کروی‌تر شدند.^[۱۶] در این مقاله پروبیل هورن به گونه‌ی طراحی شد که قسمت انتهایی آن به صورت کروی باشد و این مطلب به عنوان نوآوری این تحقیق محسوب می‌شود. در نتیجه این نوع طراحی فرکانس و دامنه‌ی ارتعاش در قسمت کروی انتهایی هورن تا حد بسیار زیادی یکنواخت شد و نهایتاً مذاب برخورد کننده با این قسمت با یک طیف فرکانس و دامنه‌ی ارتعاش ثابت امتیزه شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱.۲. مواد و تجهیزات مورد نیاز و روش انجام کار

۲.۱.۲.۱. ژانراتور (منبع تغذیه)

وظیفه‌ی ژانراتور تبدیل جریان برق متناوب شهری با فرکانس ۶۰ هرتز به جریان مناسب برای ایجاد ارتعاش در پیزوالکتریک‌ها، یعنی ۲۰ کیلوهرتز است. می‌توانیم با اتصال این جریان به پیزوالکتریک‌ها آنها را به طور مثال ۲۰ هزار بار در ثانیه مرتعش و تولید امواج فراصوتی کنیم. منبع تغذیه‌ی مورد استفاده در این آزمایش مدل UPLS2000 ساخت شرکت آلفا پاور (شرکت دانش بنیان مستقر در دانشگاه تربیت مدرس) است (شکل ۱).

۲.۱.۲.۲. ترانسدیوسر

در این تحقیق از ترانسدیوسر پیزوالکتریکی بهره برده شد. توان اسمی این ترانسدیوسر ۱۵۰۰ وات (۱/۵ کیلو وات) و فرکانس اسمی آن ۲۰۰۰۰ هرتز (۲۰ کیلوهرتز) است (شکل ۲).

۲.۱.۲.۳. هورن

کاربرد این ابزار، انتقال امواج تولید شده توسط ترانسدیوسر به محل مورد نظر است. در این آزمایش از یک هورن دوپله‌ی با پله‌های شیب‌دار (مخروطی) و به طول ۱۶۳ میلی‌متر استفاده شد. در شکل ۳ نقشه سه بعدی هورن نشان داده شده است.

دما را در گستره دمایی ۲۵-۱۲۵۰ درجه سانتی گراد با دقت ۵ درجه سانتی گراد دارد استفاده شد.

۵.۱.۲. بوتله‌ی آلومینیایی

از این وسیله برای محل نگهداری مذاب و ریختن مذاب روی انتهای هورن آتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی استفاده شد. از مزایای بوتله‌های آلومینیایی دمای کاری بالا و همچنین قابلیت تحمل شوک‌های حرارتی متعدد در طول آزمایش است.

۶.۱.۲. آلومینیوم

فلز استفاده شده در این تحقیق آلومینیوم است؛ به همین منظور خالص‌ترین نوع آن که عاری از هرگونه افزودنی آلیاژی است، تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۵). بنابراین می‌توان گفت که رفتار مذاب آلومینیوم خالص در فرایند آتمیزه کردن فراصوتی کم‌ترین مداخلات ناشی از خواص آلیاژی را داشت.

۲.۲. مؤلفه‌ها و متغیرهای مورد توجه در آزمایش

۱.۲.۲. دما

در این آزمایش منظور از مؤلفه‌ی دما، دمای داخل کوره پیش از باز کردن درب کوره است و این به آن دلیل است که ثبت دمای مذاب به طور دقیق در هنگام ریختن آن روی هورن در حال ارتعاش نیاز به تجهیزات خاصی (ترمو متر لیزری یا اینفرارد) داشت که تهیه‌ی آن مقدور نبود. به همین منظور در این آزمایش دمای داخل کوره پیش از باز شدن درب آن گزارش شد (شکل ۶).

۲.۲.۲. دامنه

بیشترین فاصله‌ی نقطه‌ی ارتعاشی از حالت تعادل خود را «دامنه‌ی ارتعاش» می‌گویند. حال اگر بتوان با اعمال یکسری تغییرات در مؤلفه‌های مؤثر بر این کمیت، مانند ولتاژ اعمال شده بر سیستم، مقدار آن را تغییر داد می‌توان آن را به عنوان یکی از متغیرهای آزمایش که تحت کنترل است در نظر گرفت. در این آزمایش با اعمال سه ولتاژ متفاوت یعنی ۱۲۰۰، ۱۰۰۰ و ۸۰۰ ولت سه مقدار برای مؤلفه‌ی دامنه‌ی ارتعاش وجود دارد. این مقادیر ۱۶، ۲۰ و ۲۴ میکرون بوده است.

۳.۲. فرضیات آزمایش

۱. در تمام مراحل آزمایش، دمای داخل کوره پیش از خارج کردن نمونه به عنوان



شکل ۵. قطعات آلومینیوم مورد استفاده در این آزمایش.



شکل ۶. دمای داخل کوره که توسط نمایشگر دیجیتال نمایش داده می‌شود (از راست ۸۵۰، ۸۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی گراد).

مؤلفه دما در نظر گرفته شد. ۲. از افت دمای مذاب هنگام ریختن مذاب روی آتمیزه‌کننده چشم‌پوشی شد. ۳. در تمام مدت آزمایش فرکانس ثابت فرض شد. ۴. تمام سطح انتهایی هورن با یک دامنه‌ی مشخص و یکسان مرتعش می‌شود.

۴.۲. طراحی آزمایش

به منظور بررسی تأثیر مؤلفه‌های مد نظر یکسری آزمایش طراحی شد. به این صورت که مقدار یک مؤلفه ثابت نگه داشته شد و مقدار مؤلفه‌ی دیگر تغییر یافت. یعنی به طور مثال با ثابت نگه داشتن دما و تغییر دادن دامنه، تأثیر تغییر دامنه روی نتیجه‌ی آزمایش بررسی شد. به همین منظور سه مقدار برای مؤلفه‌ی دما یعنی ۷۵۰، ۸۰۰، ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و نیز برای مؤلفه‌ی دامنه نیز سه مقدار ۱۶، ۲۰ و ۲۴ میکرون در نظر گرفته شد، که با انجام ۹ آزمایش تمام حالت‌های ممکن بررسی می‌شود.

۵.۲. روش انجام آزمایش

ابتدا منبع تغذیه را با اعمال ولتاژ مد نظر راه‌اندازی و تنظیمات آن متناسب با ترانس‌دیوسر و هورن طراحی شده انجام شد. بوتله‌ی آلومینیایی حاوی تکه‌های آلومینیوم خالص جامد را درون کوره گذاشته و دمای داخل کوره را به دمای مد نظر (۸۵۰ درجه سانتی گراد) رساندیم. پس از رسیدن به دمای مد نظر به مدت ۵ دقیقه اجازه دادیم تا کل آلومینیوم ذوب شده و مذاب یکنواخت شود. سپس مذاب آلومینیوم را از داخل بوتله به آرامی روی انتهایی‌ترین نقطه‌ی هورن در حال ارتعاش چکاندیم. در این لحظه شاهد بودیم که جریان مذاب آلومینیوم در اثر برخورد با سطح انتهایی هورن که توسط امواج فراصوتی در حال ارتعاش بود به صورت قطرات بسیار ریز در هوا پراکنده شد و سپس این قطرات مذاب در اثر سرد شدن حین سقوط و تبلور سریع به صورت پودر آلومینیوم بسیار ریز بر سطحی که روی زمین از قبل پیش‌بینی شده بود پراکنده شدند.

۶.۲. نکات ایمنی

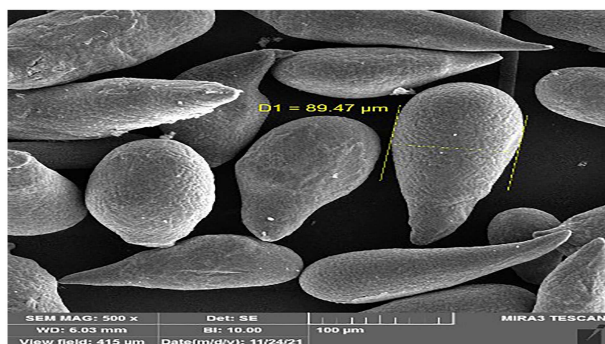
۱. ولتاژ کاری در این ژنراتورها بسیار بالاست و ممکن است برای افراد آموزش ندیده خطرانی به همراه داشته باشد. ۲. از لمس مداوم هورن در حال ارتعاش باید اجتناب کرد زیرا ممکن است این امواج به بافت‌های زنده‌ی بدن انسان آسیب‌های جدی وارد کند. ۳. سعی شود حتی‌الامکان در زیر محل فراگیری ترانس‌دیوسر از مواد عایق الکتریکی و حرارتی استفاده شود.

۳. نتایج

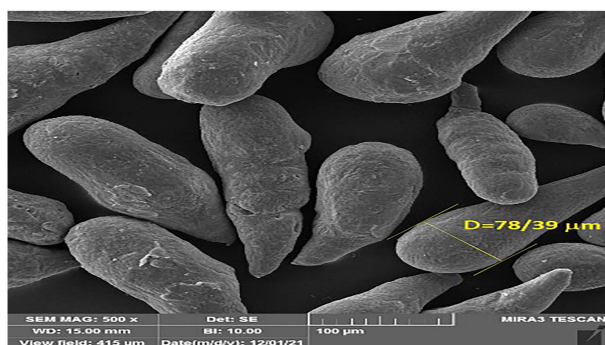
مؤلفه‌های مد نظر دما و دامنه‌ی ارتعاش است که طبق جدول ۱ پارامترهای مختلف

جدول ۱. مؤلفه‌های ثابت و متغیر آزمایش تولید پودر آلومینیوم با استفاده از آتمیزه‌کننده آلتراسونیک.

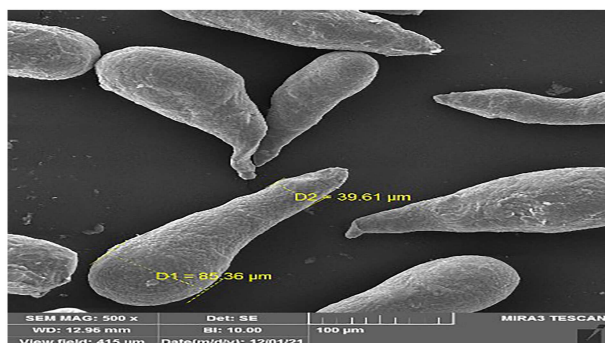
دامنه‌ی ارتعاش (میکرون)			
۲۴ μm	۲۰ μm	۱۶ μm	
دمای مذاب (۸۵۰ سانتی‌گراد)	(نمونه ۱)	(نمونه ۲)	(نمونه ۳)
دمای مذاب (۸۰۰ سانتی‌گراد)	(نمونه ۴)	(نمونه ۵)	(نمونه ۶)
دمای مذاب (۷۵۰ سانتی‌گراد)	(نمونه ۷)	(نمونه ۸)	(نمونه ۹)
توان ورودی (وات)	۵۸۰	۴۵۰	۲۸۰
فرکانس ارتعاش (کیلو هرتز)	۲۰	۲۰	۲۰



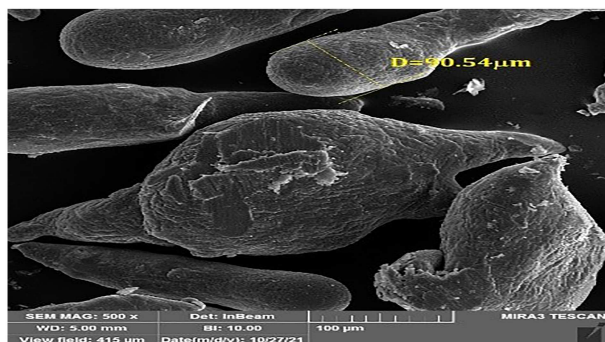
شکل ۱۰. (SEM نمونه ۲) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 800°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $16\mu\text{m}$ و قطر ذرات $89.47\mu\text{m}$.



شکل ۱۱. (SEM نمونه ۴) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 850°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $20\mu\text{m}$ و قطر ذرات $87.39\mu\text{m}$.



شکل ۱۲. (SEM نمونه ۵) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 800°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $20\mu\text{m}$ و قطر ذرات $85.36\mu\text{m}$.

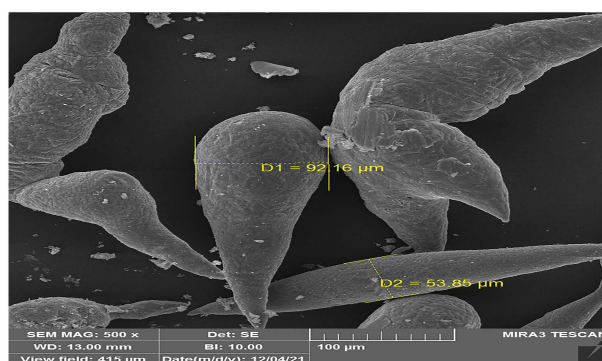


شکل ۱۳. (SEM نمونه ۶) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 750°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $20\mu\text{m}$ و قطر ذرات $90.54\mu\text{m}$.

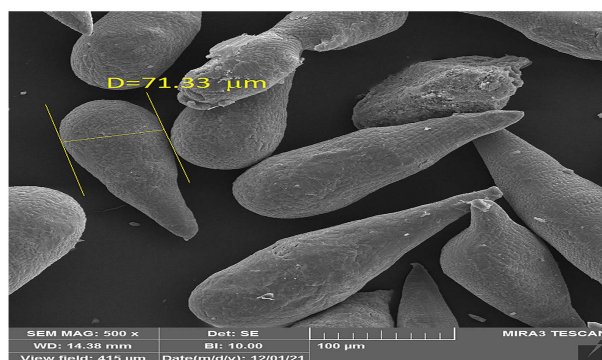
آزمایش بر سیستم اعمال شد و پودر آلومینیوم به دست آمد. پس از بدست آمدن نتایج SEM با توجه به شماره نمونه پارامترهای اعمال شده بر سیستم، مشخص و تصاویر ذرات تولید شده مورد آنالیز قرار گرفت.

۱.۳. نتایج حاصل از SEM

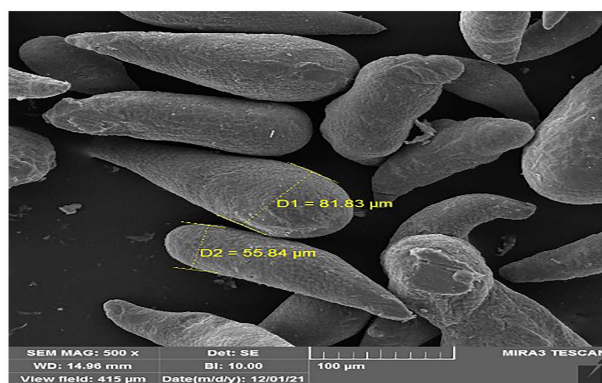
تعدادی از تصاویر به دست آمده از نمونه‌های پودر آلومینیوم تولید شده به روش آمیزه کردن فراصوتی توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) در شکل‌های ۷ الی ۱۵ مشاهده می‌شود.



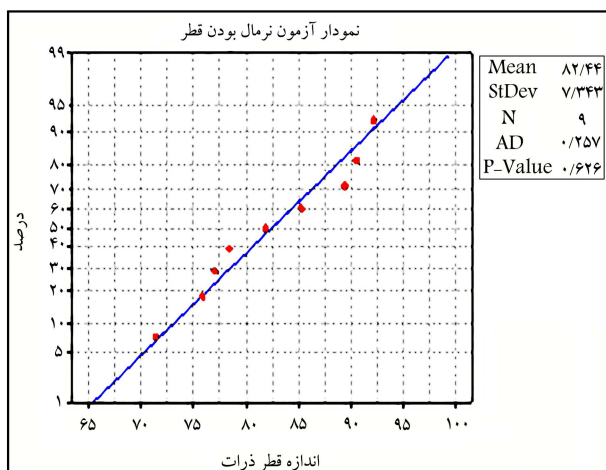
شکل ۷. (SEM نمونه ۳) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 750°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $16\mu\text{m}$ و قطر ذرات $92.16\mu\text{m}$.



شکل ۸. (SEM نمونه ۷) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 850°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $24\mu\text{m}$ و قطر ذرات $71.53\mu\text{m}$.



شکل ۹. (SEM نمونه ۱) پودر آلومینیوم آمیزه شده در دمای 850°C ، دامنه‌ی ارتفاعش $16\mu\text{m}$ و قطر ذرات $81.83\mu\text{m}$.



نمودار ۱. آزمون نرمال بودن نتایج تحقیق (قطر ذرات پودر آلومینیوم).

از روش امتیازسیون آلتراسونیک را بصورت دسته بندی شده می توان در جدول ۲ در یک نگاه مشاهده کرد.

۴. تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق

۱.۴. تحلیل آماری نتایج آزمایش

در این مقاله برای انجام تجزیه و تحلیل آماری نتایج به دست آمده از نرم افزار ۱۶ Minitab استفاده شده است.

۱.۱.۴. آزمون نرمال بودن داده های به دست آمده

همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می شود تمامی داده ها حول خط رسم شده توسط نرم افزار قرار دارند؛ همچنین مقدار P-value مساوی ۰/۶۲۶ است از حداقل استاندارد یعنی ۰/۰۵ بیشتر است پس می توان نتیجه گرفت فرض نرمال بودن یافته ها صحیح بوده و تمامی نتایج به دست آمده نرمال هستند و اگر تجزیه و تحلیلی براسال این داده ها انجام شود از صحت لازم برخوردار خواهد بود.

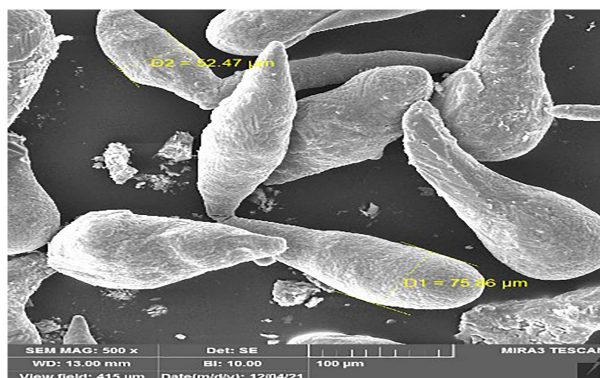
۲.۱.۴. آمار توصیفی یافته های تحقیق

مطابق جدول ۳:

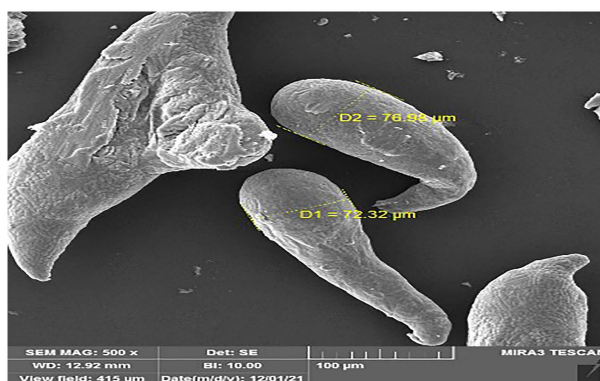
۱. میانگین قطر ذرات پودر تولید شده ۸۲/۴۳ میکرون است. ۲. انحراف معیار یافته ها از میانگین ۷/۳۴ میکرون است. ۳. اندازه ۲۵٪ یافته از ۷۶/۴۲ میکرون کوچک تر است. ۴. مقدار میانه ۸۱/۸۳ میکرون است. ۵. اندازه ۷۵٪ یافته ها از ۹۰ میکرون کوچک تر است. ۶. کوچک ترین اندازه ی پودر تولید شده ۷۱/۳۳ میکرون است. ۷. بزرگ ترین اندازه پودر تولید شده ۹۲/۱۶ میکرون بوده است. ۸. فاصله ی کوچک ترین و بزرگ ترین اندازه ی قطر پودر تولید شده ۲۰/۸۳ میکرون است. ۹. چون مقدار چولگی منفی شده است، چولگی نمودار یافته ها به سمت چپ خواهد شد. ۱۰. تعداد یافته ها نیز ۹ عدد است.

۳.۱.۴. بررسی همبستگی متغیرهای مستقل و وابسته

همبستگی پیرسون قطر و دامنه ۰/۷۷۲- و مقدار احتمال ۰/۱۵ شد که می توان دریافت چون مقدار احتمال ۰/۰۵ کوچک تر است پس فرضیه ی همبستگی متغیر وابسته (اندازه ی ذرات پودر آلومینیوم) و متغیر مستقل (دامنه ی ارتعاش) صحیح است و این دو با هم همبستگی دارند. از طرفی منفی شدن مقدار همبستگی پیرسون^۲



شکل ۱۴. SEM (نمونه ی ۸) پودر آلومینیوم امتیزه شده در دمای ۸۰۰ °C، دامنه ی ارتعاش ۲۴ μm و قطر ذرات ۷۵/۸۶ μm.



شکل ۱۵. SEM (نمونه ی ۹) پودر آلومینیوم امتیزه شده در دمای ۷۵۰ °C، دامنه ی ارتعاش ۲۴ μm و قطر ذرات ۷۶/۹۸ μm.

در شکل شماره ۷ تصویر تهیه شده به وسیله ی میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگ نمایی ۵۰۰ برابر را مشاهده می کنیم که در آن بزرگ ترین سایز قطر ذرات پودر آلومینیوم امتیزه شده دیده می شود که مربوط به آزمایش شماره ۳ است. در این آزمایش دمای مذاب در کم ترین میزان خود یعنی ۷۵۰ درجه سانتی گراد و دامنه ی ارتعاش نیز در کم ترین مقدار خود یعنی ۱۶ میکرون بوده است. همچنین در این تصویر و تصاویر دیگر حاصل از SEM مشاهده می شود که شکل ذرات به صورت اشکی و ربطی شکل درآمده است و با مقایسه ی این مطلب با نتایج پولمن و همکارانش^[۲] و ویسوتمانگون و همکارانش^[۱۶] می توان این مسئله را ناشی از حضور اکسیژن در خلال انجام آزمایش دانست.

در شکل ۸ نیز تصویر تهیه شده به وسیله ی میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگ نمایی ۵۰۰ برابر را مشاهده می کنیم که در آن کوچک ترین سایز قطر ذرات پودر آلومینیوم امتیزه شده دیده می شود که مربوط به آزمایش شماره ۷ است. در این آزمایش دمای مذاب در بیشترین میزان خود یعنی ۸۵۰ درجه سانتی گراد و دامنه ی ارتعاش نیز در بیشترین مقدار خود یعنی ۲۴ میکرون بوده است.

تصاویر ۷ و ۸ به ترتیب مربوط به بیشینه و کمینه ی قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده است. در ادامه ی این بخش، تصاویر SEM سایر نمونه های پودر آلومینیوم به دست آمده را به منظور مقایسه ی بهتر مشاهده می کنید.

۲.۳. دسته بندی نتایج به دست آمده

نتایج به دست آمده از این تحقیق در خصوص اندازه ذرات پودر آلومینیوم تولید شده

جدول ۲. اندازه‌ی ذرات پودر آلومینیوم تولید شده با توجه به دما و دامنه‌ی ارتعاش.

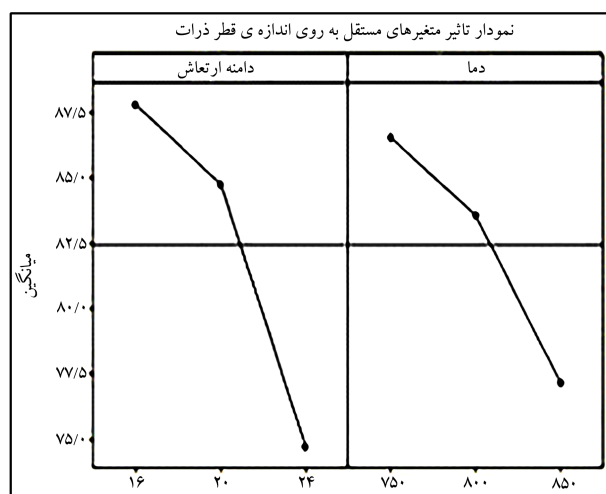
شرایط آزمایش	دامنه ۱۶ میکرون و دما ۸۵° درجه سانتی گراد	دامنه ۲۰ میکرون و دما ۸۵° درجه سانتی گراد	دامنه ۲۴ میکرون و دما ۸۵° درجه سانتی گراد
اندازه ذرات	۸۱٫۸۳ μm	۷۸٫۳۹ μm	۷۱٫۳۳ μm
شرایط آزمایش	دامنه ۱۶ میکرون و دما ۸۰° درجه سانتی گراد	دامنه ۲۰ میکرون و دما ۸۰° درجه سانتی گراد	دامنه ۲۴ میکرون و دما ۸۰° درجه سانتی گراد
اندازه ذرات	۸۹٫۴۷ μm	۸۵٫۳۶ μm	۷۵٫۸۶ μm
شرایط آزمایش	دامنه ۱۶ میکرون و دما ۷۵° درجه سانتی گراد	دامنه ۲۰ میکرون و دما ۷۵° درجه سانتی گراد	دامنه ۲۴ میکرون و دما ۷۵° درجه سانتی گراد
اندازه ذرات	۹۲٫۱۶ μm	۹۰٫۵۴ μm	۷۶٫۹۸ μm

جدول ۳. آمار توصیفی یافته‌های تحقیق (قطر ذرات پودر آلومینیوم).

میانگین	انحراف معیار	چارک اول	میان‌ه	چارک سوم
۸۲٫۴۳	۷٫۳۴	۷۶٫۴۲	۸۱٫۸۳	۹۰
کمینه	بیشینه	گستره تغییرات	چولگی	تعداد
۷۱٫۳۳	۹۲٫۱۶	۲۰٫۸۳	-۰٫۲۳	۹

جدول ۴. بررسی همبستگی قطر ذرات پودر آلومینیوم و دمای مذاب.

همبستگی قطر و دمای مذاب
همبستگی پیرسون قطر و دما -۰٫۵۵۳
مقدار احتمال ۰٫۱۲۳



نمودار ۲. تأثیر متغیرهای مستقل بر روی اندازه قطر ذرات پودر آلومینیوم.

۵.۱.۴. بررسی شایستگی مدل

نمودار باقیمانده نموداری است که برای بررسی خوبی برازش داده‌ها استفاده می‌شود. برآورده شدن یا نشدن فرضیات حداقل مربعات معمولی از طریق نمودارهای باقیمانده تعیین می‌شود. اگر این مفروضات برآورده شود، رگرسیون حداقل مربعات معمولی، تخمین‌های ضرایب مستقل با حداقل واریانس را ایجاد خواهد کرد.

از هیستوگرام باقیمانده‌ی داده‌ها^۳ برای رسیدن به این که آیا در میان داده‌ها دما و پرت وجود دارد یا نه و این که داده‌ها دچار انحراف شده‌اند یا نه استفاده می‌شود. در نمودارهای چهارگانه‌ی ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که در هیستوگرام‌های رسم شده داده‌ها متقارن‌اند و از توزیع نرمال پیروی می‌کنند و هیچ انحرافی در آنها دیده نمی‌شود. این فرض که باقیمانده‌ها به طور معمول توزیع شده‌اند یا خیر توسط نمودار معمولی باقیمانده‌ها^۴ تأیید می‌شود.

همان‌طور که در نمودارهای ۳ و ۴ مشخص است، پراکندگی باقیمانده‌ها در مقادیر مختلف، ثابت می‌کند تصادفی سازی به خوبی صورت گرفته و ارتباط خاصی بین باقیمانده‌ها وجود ندارد. برای تأیید این فرض که باقیمانده‌ها واریانس ثابتی دارند، از نمودار باقیمانده در مقابل برازش^۵ استفاده می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که

نشان می‌دهد که رابطه‌ی این دو متغیر معکوس است؛ یعنی هرچه دامنه‌ی ارتعاش افزایش یابد اندازه‌ی قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده کاهش پیدا خواهد کرد. از جدول ۴ می‌توان دریافت که چون مقدار احتمال از ۰٫۰۵^۶ بزرگ‌تر است پس فرضیه‌ی همبستگی بین متغیر وابسته (اندازه ذرات پودر آلومینیوم) و متغیر مستقل (دمای مذاب) صحیح نیست و این دو باهم همبستگی ندارند. اما منفی شدن مقدار همبستگی پیرسون نشان می‌دهد که بین این دو متغیر رابطه‌ی معکوس وجود دارد و هرچه دمای مذاب افزایش یابد اندازه‌ی قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده کاهش پیدا خواهد کرد.

۴.۱.۴. آنالیز واریانس داده‌های تحقیق

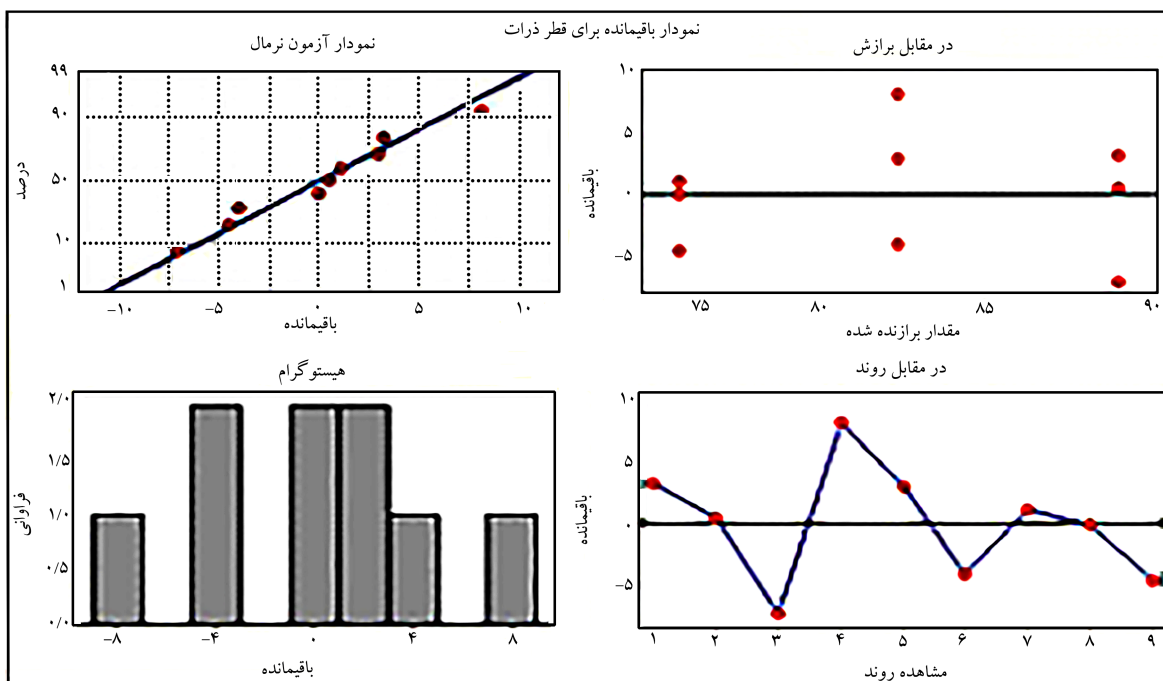
در جدول ۵ خلاصه‌ی نتایج آنالیز واریانس درج شده است. مقادیر S و P-value به ترتیب بیانگر انحراف استاندارد و مقدار احتمال هستند.

اگر مقدار P-value برای یک متغیر مستقل کم‌تر از ۰٫۰۵^۷ باشد به این معنی است که این متغیر روی متغیر وابسته تأثیر دارد. در این جا مشاهده می‌شود که مقدار P-value برای هر دو متغیر مستقل دامنه‌ی ارتعاش و دمای مذاب کم‌تر از ۰٫۰۵^۸ است و نتیجه می‌شود که این دو متغیر مستقل روی متغیر وابسته یعنی اندازه‌ی قطر ذرات پودر آلومینیوم تأثیرگذارند.

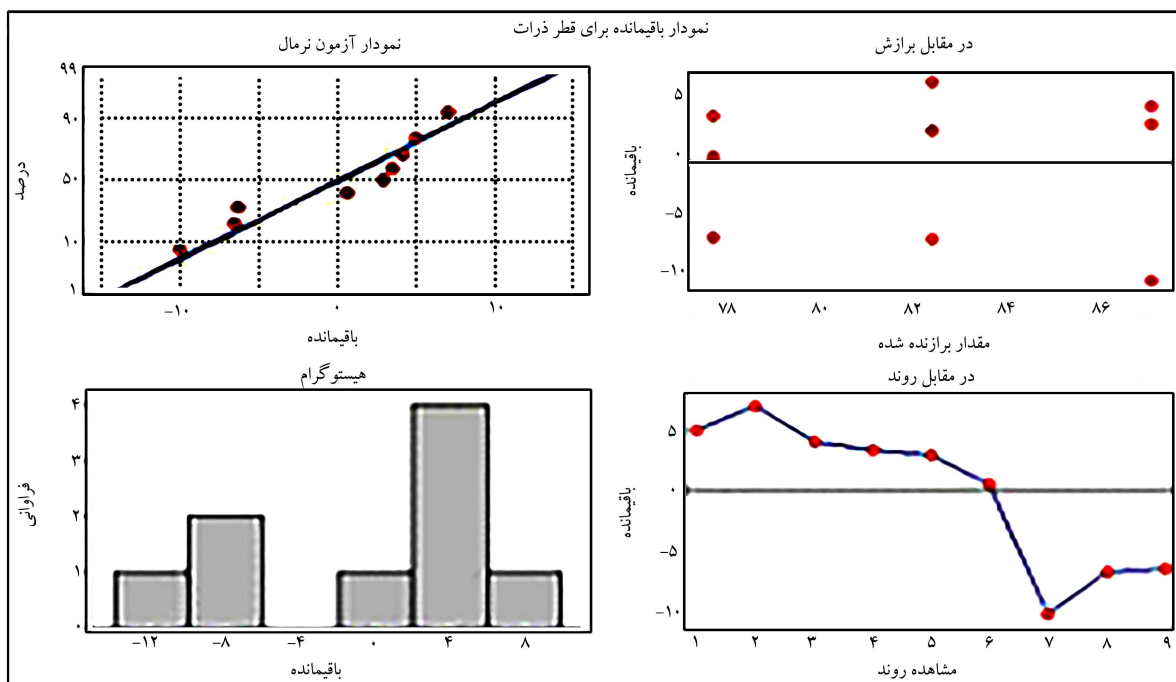
همان‌طور که از نمودار ۲ مشخص است هر دو متغیر مستقل یعنی دامنه‌ی ارتعاش و دمای مذاب در نتیجه‌ی آزمایش یا همان متغیر وابسته مؤثر بوده‌اند اما میزان این تأثیر یکسان نبوده است و افزایش دامنه‌ی ارتعاش تأثیر بیشتری در کاهش قطر ذرات داشته است.

جدول ۵. آنالیز واریانس برای متغیر قطر ذرات پودر آلومینیوم.

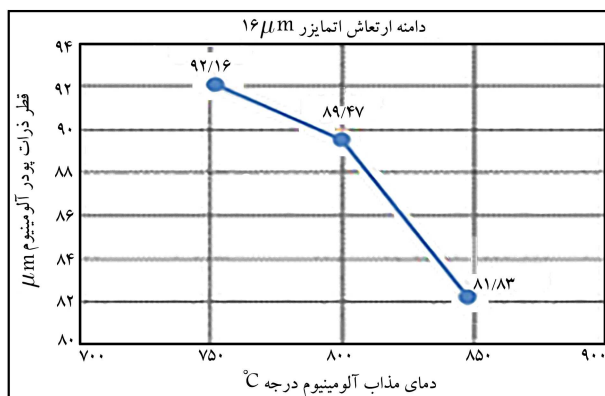
ANOVA for diameter($S = 1,73756R - S_q = 97,20\%R - S_q(adj) = 94,40\%$)						
P – value	F	Adj MS	Adj SS	Seq SS	DF	Source
۰,۰۰۲	۴۶,۶۵	۱۴۰,۸۳	۲۸۱,۶۷	۲۸۱,۶۷	۲	دامنه‌ی ارتفاع
۰,۰۰۷	۲۲,۷۹	۶۸,۸۰	۱۳۷,۶۱	۱۳۷,۶۱	۲	دمای مذاب



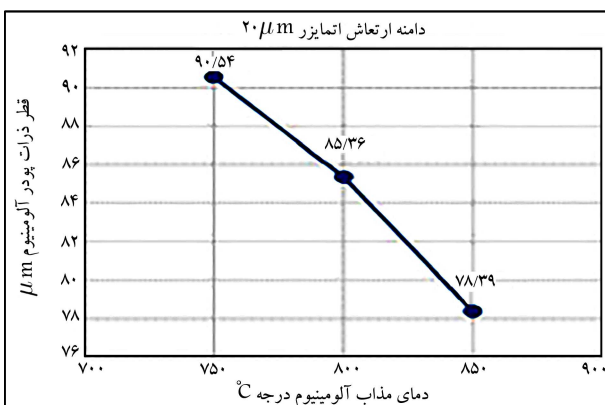
نمودار ۳. باقیمانده‌های قطر ذرات پودر آلومینیوم متأثر از دامنه‌ی ارتفاع.



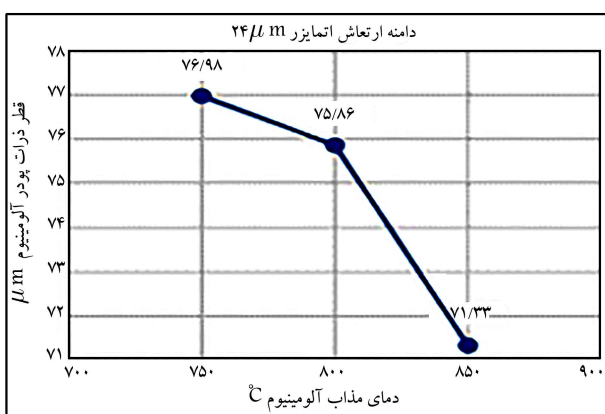
نمودار ۴. باقیمانده‌های قطر ذرات پودر آلومینیوم متأثر از دمای مذاب.



نمودار ۷. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم اتمیزه شده در اثر تغییر دمای مذاب با دامنه‌ی ارتعاش ۱۶ μm اتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی.



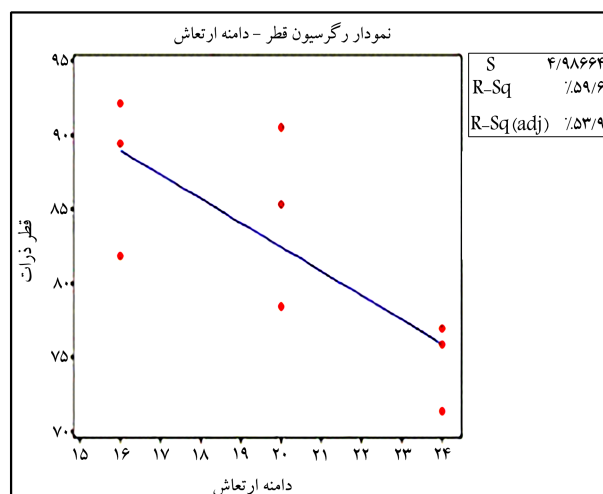
نمودار ۸. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم اتمیزه شده در اثر تغییر دمای مذاب با دامنه‌ی ارتعاش ۲۰ μm اتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی.



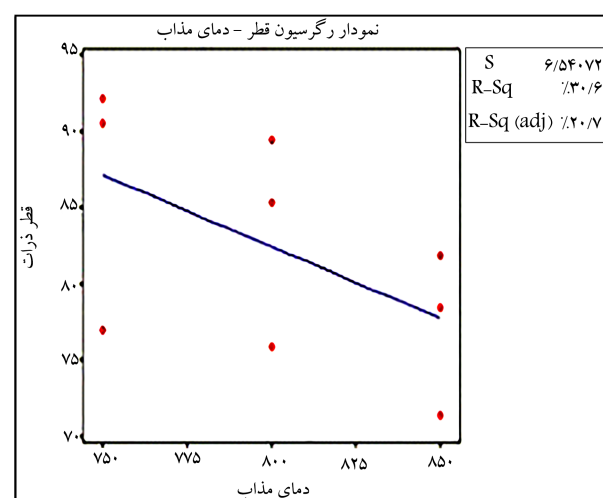
نمودار ۹. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم اتمیزه شده در اثر تغییر دمای مذاب با دامنه‌ی ارتعاش ۲۴ μm اتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی.

۲.۴. مؤلفه‌ی دامنه‌ی ثابت و دمای متغیر

بررسی روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده به وسیله‌ی اتمیزه‌کننده‌ی فراصوتی با یک دامنه‌ی ارتعاش ثابت و دمای متغیر نشان‌گر این مطلب است که با افزایش دمای مذاب بر روی قطر ذرات تولید شده کاهش می‌یابد (نمودارهای ۷، ۸ و ۹).



نمودار ۵. نمودار و معادله‌ی رگرسیون مربوط به قطر ذرات - دامنه‌ی ارتعاش.

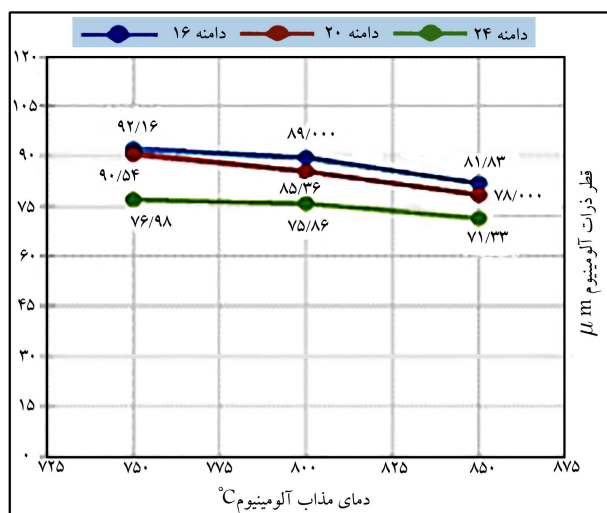


نمودار ۶. نمودار و معادله‌ی رگرسیون مربوط به قطر ذرات - دمای مذاب.

مقادیر باقیمانده به صورت پراکنده دور صفر هستند (نمودارهای ۳ و ۴) و بنابراین باقیمانده‌ها واریانس ثابتی دارند. این فرض که باقیمانده‌ها با یکدیگر همبستگی دارند یا خیر، توسط نمودار باقیمانده در مقابل ترتیب^۶ بررسی می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که باقیمانده‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند و نوسانات بسیاری میان داده‌ها وجود دارد (نمودارهای ۳ و ۴).

۶.۱.۴. نمودار و معادله‌ی رگرسیون^۷

در نمودارهای ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که خط رگرسیون رسم شده از بین تمامی داده‌ها می‌گذرد. همچنین معادلات رگرسیون به دست آمده را می‌توان با تقریبی که در کنار هر یک به عنوان $R - Sq(adj)$ آمده است با وارد کردن مقادیر مختلف به عنوان متغیر مستقل، نتیجه یا همان متغیر وابسته را پیش‌بینی کرد. مقدار $R - Sq(adj)$ برای معادله‌ی رگرسیون قطر - دامنه‌ی ارتعاش ۵۳/۹ درصد است و برای معادله‌ی رگرسیون قطر - دمای مذاب ۲۰/۷ درصد است. همچنین از شیب خط معادلات می‌توان دریافت که تأثیر افزایش دامنه‌ی ارتعاش از تأثیر افزایش دمای مذاب بر روی کاهش قطر ذرات پودر آلومینیوم اتمیزه شده بیشتر است.



نمودار ۱۳. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم امتیزه شده در اثر تغییر دمای مذاب و دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده فراصوتی.

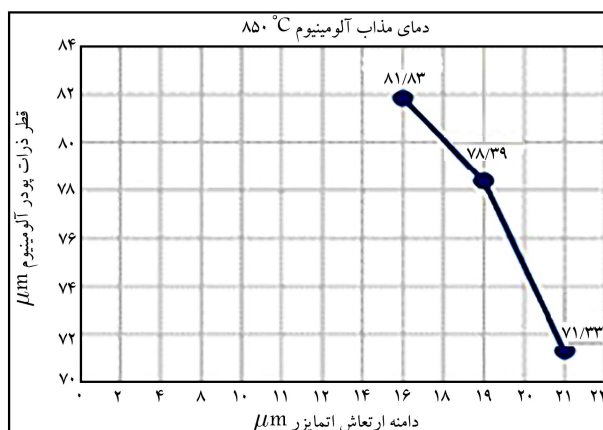
۴.۴. بررسی همزمان تأثیر تغییر دما و تغییر دانه‌ای ارتعاش بر اندازه ذرات

نمودار ۱۳ نمای کلی روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده در اثر تغییر دمای مذاب آلومینیوم توأم با تغییر دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده فراصوتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است کوچک‌ترین اندازه‌ی قطر ذرات پودر آلومینیوم (۷۱/۳۳ میکرون) زمانی تولید شده است که اولاً دمای مذاب ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده فراصوتی در محدوده‌ی ۲۴ میکرون بوده است. به نظر می‌رسد که در این روش تولید پودر فلز آلومینیوم از مذاب آن، تأثیر افزایش دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده روی کاهش اندازه قطر ذرات پودر آلومینیوم به طور نسبی بیشتر از تأثیر افزایش دمای مذاب آلومینیوم بوده است.

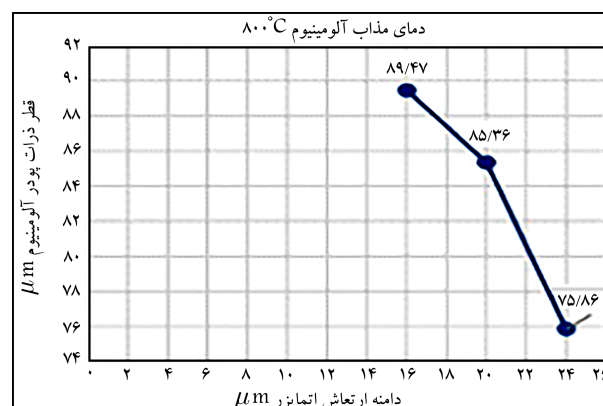
۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از انجام ۹ سری آزمایش در ۳ دما (۷۵۰، ۸۰۰ و ۸۵۰) و حذف گاز سانتی‌گراد، سه مقدار برای دانه‌ای ارتعاش (۱۶، ۲۰ و ۲۴ میکرون) و حذف گاز محافظ و جمع‌آوری یافته‌ها و تجزیه و تحلیل آنها، نتایج زیر حاصل شد:

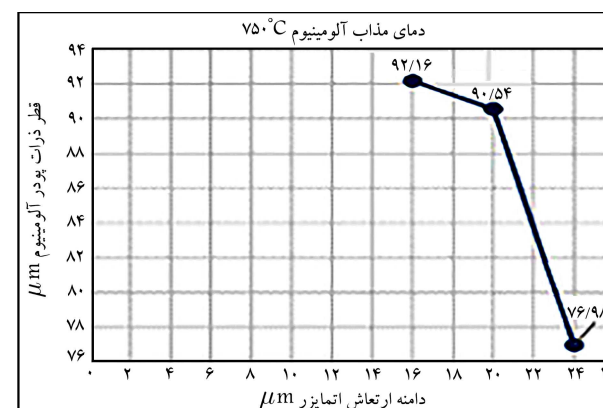
۱. طبق یافته‌های تحقیق، دمای مذاب با اندازه‌ی قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده رابطه‌ی عکس دارد؛
۲. در فرایند تولید پودر آلومینیوم از مذاب آن به وسیله‌ی امتیزه‌کننده فراصوتی با افزایش دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده، قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده کاهش خواهد یافت؛
۳. تأثیر افزایش اندازه‌ی دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده روی کاهش قطر ذرات پودر آلومینیوم تولید شده بیشتر از تأثیر افزایش دمای مذاب آلومینیوم بوده است؛
۴. مشاهده شد که با حذف گاز محافظ و انجام آزمایش در حضور اکسیژن شکل ذرات به صورت قطره اشک درآمده است.



نمودار ۱۰. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم امتیزه شده در دمای ثابت ۸۵۰°C در اثر تغییر دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده فراصوتی.



نمودار ۱۱. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم امتیزه شده در دمای ۸۰۰°C ثابت در اثر تغییر دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده فراصوتی.



نمودار ۱۲. روند تغییر قطر ذرات پودر آلومینیوم امتیزه شده در دمای ثابت ۷۵۰°C در اثر تغییر دانه‌ای ارتعاش امتیزه‌کننده فراصوتی.

۳.۴. مؤلفه‌ی دمای ثابت و دانه‌ای متغیر

در نمودارهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که در دمای ثابت با افزایش دانه‌ای ارتعاش قطر ذرات کاهش می‌یابد.

1. Scanning Electron Microscope
2. P-Value
3. Pearson Correlation
4. Histogram
5. Normal Probability Plot
6. Residuals Versus Fits
7. Residuals Versus Order Of Data

منابع (References)

1. Wang, X., Mori, Y. and Tsuchiya, K. "Periodicity in ultrasonic atomization involving beads-fountain oscillation and mist generation: Effects of driving frequency", *Ultrasonics Sonochemistry*, **86**, pp.1-13 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105997>.
2. Lefebure, A. and Shim, D. "Ultrasonic atomization of highly viscous biodegradable oils for MQL applications", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **35**(12), pp. 5503-5516 (2021).
3. Gao, S., Guo, S., Dong, G. and et al. "Numerical simulation and experiment for the ultrasonic field characteristics of ultrasonic standing wave atomization", *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*, **43**(318), pp.1-13 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03041-1>.
4. Pohlman, R., Heisler, K. and Cichos, M. "Powdering aluminium and aluminium alloys by ultrasound", *Ultrasonics*, **12**(1), pp. 11-15 (1974).
5. Lagutkin, S., Achelis, L., Sheikhaliev, S. and et al. "Atomization process for metal powder", *Materials Science and Engineering*, **383**(1), pp. 1-6 (2004).
6. Shilin, L., Gaogao, W., Pengfei, W. and et al. "A Mathematical model for predicting the sauter mean diameter of liquid-medium ultrasonic atomizing nozzle based on orthogonal design", *Applied Sciences*, **11**(24), pp.1-13 (2021).
7. Lierke, E.G. and Griebhammer, G. "The formation of metal powders by ultrasonic atomization of molten metals", *Ultrasonics*, **5**(4), pp. 224-228 (1967).
8. Duan, J., Zhang, L., Shi, H. and et al. "Study on the model analysis of medical drug fog driven by bezier beam simulated by COMSOL software and the development of precise drug atomization device", 2021 6th International Symposium on Computer and Information Processing Technology (ISCIPIT), pp. 83-87, (2021). <https://doi.org/10.1109/ISCIPIT53667.2021.00023>.
9. Alajmi, A., Alajmi, F., Alrashidi, A. and et al. "Application of ultrasonic atomization on a micro jet engine Using biofuel for improving performance", *Processes*, **9**, pp.1-12 (2021). <https://doi.org/10.3390/pr9111963>.
10. Sheikhaliev, Sh.M. and popel, S.I. "Production of metal powders by ultrasonic atomization of melts", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **22**(10), pp. 793-798 (1983).
11. Caccioppoli, G., Clausen, B., Bonjour, C. and et al. "Fabrication of metal powders by ultrasonic atomization, description of an atomiser based on a new ultrasonic device", *Matériaux*, **90**, pp. 1-4 (2002).
12. Ramisetty, K.A., Pandit, A.B. and Gogate, P.R. "Investigations into ultrasound induced atomization", *Ultrasonics Sonochemistry*, **20**(1), pp. 254-364 (2013).
13. Briceño - Gutierrez, D., Salinas-Barrera, V., Vargas-Hernández, Y. and et al. "On the ultrasonic atomization of liquids", *Physics Procedia*, **63**(Supplement C), pp. 37-41 (2015).
14. Deepu, P., Peng, C. and Moghaddam, S. "Dynamics of ultrasonic atomization of droplets", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **92**, pp. 243-247 (2018).
15. Alavi, S.H. and Harimkar, S.P. "Ultrasonic vibration-assisted laser atomization of stainless steel", *Powder Technology*, **321**, pp. 89-93 (2017).
16. Wisutmethangoon, S., Thawatchai, P. and Phairote, S. "Production of SAC305 powder by ultrasonic atomization", *Powder Technology*, **209**(1-3), pp. 105-111 (2011).