

## بررسی عملی پارامترهای فرآیند در تفجوشی لیزر مخلوط پودر آهن و مس

سیدامید میرمحمدصادقی<sup>۱</sup>، جمال زمانی اشنی<sup>۲</sup>، سید علی فاطمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۸

### چکیده

همواره یکی از اهداف اصلی محققان در تفجوشی لیزری پودرهای فلزی، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند به منظور نزدیک کردن خواص قطعه تولیدی به مواد خام اصلی بوده است. پارامترهایی از قبیل: چگالی، سختی سنجی در ابعاد ماکرو، سختی سنجی در ابعاد میکرو، استحکام، صافی سطح، ظاهر، تنش پسماند و ... در موارد مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، تأثیر پارامترهای ورودی مانند توان لیزر، سرعت اسکن، جنس پودر و ... بر روی پارامترهای خروجی از قبیل عمق نفوذ، استحکام، اثر گوی‌شدگی و ... بررسی شده است. این مطالعه بر روی مخلوط پودر آهن و مس صورت گرفته است. به منظور تولید قطعات چند لایه کاملاً چگال توسط فرآیندهای لیزری پالسی، در ابتدا لازم است تا عملکرد لیزر و مواد و همچنین بهینه‌سازی پارامترها، برای تک‌لایه بررسی شود. آزمایشات بر روی بستر پودر آزاد به عمق ۵ میلی‌متر انجام شده است. هر قطعه به صورت تک‌لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. برای کاهش پارامترها تابعی با نام همپوشانی تعریف شد. نتایج آزمایشات تاثیر معکوس تابع همپوشانی را در توان‌های بالا و پایین لیزر از خود نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** نمونه‌سازی سریع، پودر فلز، تفجوشی لیزری، DMLS.

### ۱- مقدمه

مکانیکی و تحقیق برای فروش و ... استفاده می‌شود. نمونه‌های اولیه می‌توانند به جای هفته‌ها در چند ساعت یا روز تولید شوند و به این ترتیب زمان رسیدن به بازار کاهش یابد [۲]. فن آوری RP برای تولید قطعه به مدل طراحی شده قطعه به کمک کامپیوتر (CAD) نیاز دارد. سپس، مدل CAD به شکل متفاوتی تبدیل می‌شود که در آن سطوح قطعه جامد با صفحاتی (مثلثی یا چندضلعی) تقریب زده شده است. به این فرمت به صورت مختصر STL می‌گویند. وقتی که فایل STL ساخته شد.

کوتاه شدن زمان تولید یکی از تمایلات بزرگ کمپانی‌ها به منظور کوتاه شدن زمان رسیدن محصولاتشان به بازار است. روش‌های نمونه‌سازی سریع در دهه هشتاد برای فائق آمدن بر این مسئله ایجاد شدند [۱]. نمونه‌سازی سریع<sup>۱</sup> (RP) روشی برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل‌دهی سنتی می‌باشد. نمونه‌های اولیه مهندسی به منظور ارزیابی جنبه‌های مختلفی قطعه از قبیل روابط انطباق، زیبایی‌شناسی، تست‌های

۱- کارشناس ارشد- مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. Sadeghi.omid@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مکانیک- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- کارشناس ارشد - مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

واسطهٔ گردادیان حرارتی بالا شایع می‌باشد. اما مشکل مهم‌تر اکسیدشدگی و کاهش ترشدگی مواد است. کاهش ترشدگی به واسطهٔ اثر کشش سطحی باعث به وجود آمدن عیوبی از قبیل خلال و فرج، گوی‌شدگی و لایه لایه شدن می‌شود [۹]. فن آوری SLS می‌تواند به سه صورت مختلف تقسیم شود. در فرآیند تف جوشی غیرمستقیم فلزی<sup>۱</sup> از یک لیزر توان پایین به منظور ذوب و اتصال جزء اتصال دهندهٔ پلیمر استفاده می‌شود تا مانند یک ماتریس عمل کند. مرحلهٔ بعدی پلیمر از ساختار خارج می‌شود و به جای آن یک آلیاژ فلزی با دمای پایین نفوذ داده می‌شود. در DMLS<sup>۲</sup> مخلوطی از دو جزء فلزی با دمای بالا و پایین تف جوشی می‌شود. در این حالت جزء با دمای پایین ذوب شده و جزء با دمای ذوب بالا را در خود می‌گیرد. در DMLR<sup>۳</sup> از یک جزء فلزی (بدون نیاز به اتصال دهنده و نفوذ) استفاده می‌شود. این امر نیاز به ذوب مستقیم، هم‌جوشی و جامد شدن مواد دارد تا قطعاتی با چگالی بالا تولید کند [۱۰ و ۱۱].

در خلال فرآیند تفجوشی لیزری، واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده‌ای رخ می‌دهد. بنابراین مطالعه و فرموله کردن این فرآیند بسیار پیچیده و مشکل است. البته محققانی مانند نلسون و همکارانش در سال ۱۹۹۳ و ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۰ این فرآیند را شبیه‌سازی و فرموله نموده‌اند. محققان دیگری مانند لوئی و همکارانش در سال ۱۹۹۸ و نیو و چنگ در سال ۱۹۹۹ با آزمایش بر روی تفجوشی پودرهای فلزی میزان تأثیر پارامترهای فرآیند را بدست آورده‌اند [۱۲].

پارامترهای موثر بر تفجوشی لیزری را می‌توان به سه گروه عمدهٔ پارامترهای فرآیند، پارامترهای مواد و پارامترهای محیطی تقسیم نمود [۱۳]. پارامترهای فرآیند اغلب بر روی فرآیندهای لیزری موثراند و چگالی انرژی لیزر را کنترل می‌کنند. این پارامترها شامل توان لیزر (P)، اندازه قطر پرتو لیزر (d)، سرعت اسکن (v)، فاصله خطوط اسکن (h)، ضخامت لایه (w) و هندسه و استراتژی اسکن می‌باشد. در پاره‌ای از موارد می‌توان این پارامترها را در یک تابع، به صورت چگالی شار بررسی نمود. پارامترهای مواد شامل ترکیب شیمیایی، درصد اکسیژن، روش آلیاژسازی، مشخصات ذرات (اندازه، شکل، میزان سیلان و ...) و چگالی بستر پودر می‌باشد. پارامترهای محیطی نیز نقش موثری

مدل به سطح مقطع‌های لایه لایه‌ای بریده می‌شود که توسط ماشین RP استفاده می‌گردد. این برش‌ها به صورت قائم روی هم قرار می‌گیرند تا یک قطعهٔ سه‌بعدی شکل بگیرد. این فرآیند، برش نامیده می‌شود و فرمت فایل آن به SLC معروف است [۳].

پیشرفت‌های اخیر در RP منجر به ایجاد روش‌های ساخت و تولید سریع شده است. برای مثال: LENS<sup>۲</sup>، SLS<sup>۳</sup> و EBM<sup>۴</sup> برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بین این روش‌ها، فن‌آوری‌های پایه پودری (SLS) متداول‌تر است. فرآیند SLS تولیدی لایه به لایه است که اجازة تولید قطعات پیچیدهٔ سه بعدی را از طریق جامد سازی لایه‌های پودری بر روی یکدیگر می‌دهند. ضخامت لایه در این آزمایشات بین 20µm تا 150µm و توسط سیستم لایه نشانی ایجاد می‌شود [۴]. در این فرآیند، یک لیزر (حدوداً ۲۰۰ W) به صورت مستقیم روی مخلوط پودر فلز عمل می‌کند. پودر شامل مخلوطی از برنز، نیکل و بعضی دیگر افزودنی‌ها است. مزیت این مواد اینست که در خلال فرآیند تفجوشی انقباض خیلی کمی را نشان می‌دهند و در نتیجه قطعات با دقت بالایی تولید می‌شود. بعضی دیگر از مواد از قبیل مخلوط مس و قلع به منظور تولید کردن برنز و مخلوط پودر پایه آهن نیز در این روش آزمایش شده‌اند [۵]. با کمک SLS تولید قطعات با چگالی بالاتر از ۶۳٪ تا ۱۰۰٪ قابل دسترسی است و دیگر نیازی به استفاده از کوره‌های ثانویه و نفوذ وجود ندارد [۶].

هیچ مشکل جدی در SLS پودرهای فلزی دو جزئی وجود ندارد. یکی از مشکلات عمده در تف جوشی پودرهای فلزی تک جزئی پدیدهٔ گوی‌شدگی<sup>۵</sup> است. انقباض عامل اصلی پدیدهٔ گوی‌شدگی است. فرآیند گوی‌شدگی با افزایش در طول اسکن، افزایش و با کاهش در ضخامت لایهٔ پودر، کاهش می‌یابد [۷].

برای ذوب پودر می‌توان از منبع انرژی لیزر Nd:YAG و یا CO2 استفاده نمود. لیزر Nd:YAG بدلیل طول موج تشعشعی کمتر (1.064µm) با بازدهی بالاتر نسبت به لیزر CO2 با طول موج (10.64 µm) همراه است. بنابراین Nd:YAG همراه با توان کمتر مورد نیاز جهت ذوب ذرات پودر خواهد بود [۸].

با توجه به وجود ذوب مجدد و جامد شدن در فرآیند SLS مشکلاتی از قبیل تنش حرارتی بالای تولیدشده در مواد به

### ۳- طریقه آزمایشات

به منظور تولید قطعات چندلایه کاملاً چگال توسط فرایندهای لیزری پالسی، در ابتدا لازم است تا عملکرد لیزر و مواد و همچنین بهینه‌سازی پارامترها، برای تک لایه بررسی شود. آزمایشات بر روی بستر پودر آزاد به عمق ۵ میلی‌متر انجام شده است. هر قطعه به صورت تک‌لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. حرکت پرتو لیزر بر روی سطح، و اشهرایی به قطر ۲۰ میلی‌متر تولید می‌کنند.

عوامل موثر بر انرژی لیزر در واحد زمان سه عامل مساحت موج لیزر، مساحت متأثر از لیزر و تعداد شلیک‌ها می‌باشد. مساحت موج لیزر مستقیماً وابسته به پالس و ولتاژ و مساحت متأثر از پرتو لیزر ناشی از قطر پرتو خواهد بود. تعداد شلیک‌ها نیز در واقع همان فرکانس لیزر است. به منظور کاهش دادن پارامترهای ورودی، سرعت اسکن و فرکانس لیزر، به صورت تابعی با نام هم‌پوشانی تعریف شده است. در این صورت هم‌پوشانی به صورت زیر تعریف خواهد شد.

$$\text{(mm/s) (سرعت) / (Pulse/sec) (فرکانس) = (Pulse/mm) (همپوشانی)}$$

به این ترتیب با ثابت نگه‌داشتن قطر پرتو لیزر، تعداد پارامترهای تعیین‌کننده انرژی لیزر به سه پارامتر، ولتاژ، پالس و هم‌پوشانی محدود خواهد شد. با توجه به اینکه تولید نمونه‌ها به صورت حرکت تک‌مسیر و صفحه‌ای می‌باشد برای نایل شدن به قطعاتی که بتواند گویای شواهد بوده و از ابعاد نسبتاً مناسبی برخوردار باشد قطر پرتو لیزر برای تمام آزمایشات ثابت و برابر مقدار ۲.۵ میلی‌متر (بیشترین قطر لیزر) در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه این قطر کمک می‌کند تا فشار پلاسما ایجاد شده در حین تفجوشی لیزری میزان قابل چشم‌پوشی باشد [۱۱و۱۰].

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند یک سری آزمایشات بر روی مخلوط پودر آهن و مس انجام شد. متغیرهای این آزمایشات ولتاژ، همپوشانی، پهنای پالس و درصد مس می‌باشد. جدول ۱ آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به آزمایشات اولیه انجام شده بر روی پودر آهن، برای انجام آزمایشات، ولتاژ در محدوده (۲۵۰-۳۰۰) همپوشانی در بازه (۲۰-۶۰) و درصد مس بین ۱۰ تا ۳۰ درصد وزنی بررسی و سایر پارامترها ثابت فرض می‌شود.

بر کیفیت قطعات تولیدی دارند. این پارامترها شامل اتمسفر تفجوشی، میزان پیش‌گرم و فشار کوبشی است. شناخت و بررسی هر یک از این پارامترها امری حیاتی در تفجوشی لیزریست. آزمایشات صورت گرفته در این مطالعه به بررسی تاثیرات پارامترهای فرآیند در تفجوشی لیزری پرداخته است.

### ۲- چیدمان آزمایشات

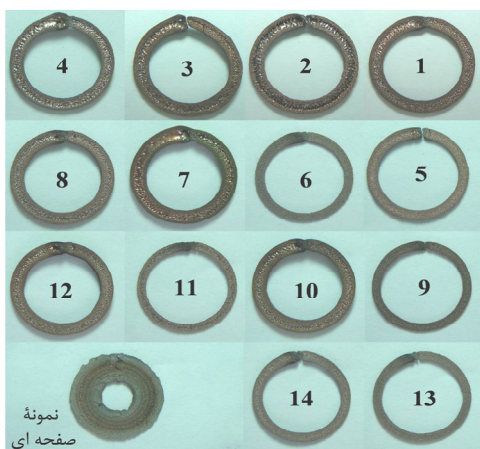
تجهیزات تست شامل یک لیزر میکرو جوشکاری JW80، از نوع Nd:YAG، با طول موج ۱.۰۶۴nm، دارای Q-Switch و ساخت شرکت پایا پرتو می‌باشد. پارامترهای قابل تغییر در این لیزر شامل ولتاژ V (۲۵۰-۴۰۰V)، قطر پرتو لیزر D (۰.۱-۲.۵mm)، زمان روشن بودن پالس (پهنای پالس) P (۰-۱۰ms) و فرکانس موج خروجی f (۰-۱۵Hz) است. ولتاژ بیانگر توان، پالس نشان دهنده زمان روشن بودن لیزر در هر شلیک و فرکانس مشخص کننده تعداد شلیک در هر ثانیه است. در این آزمایشات قطر پرتو لیزر ۲.۵mm و فاصله تمرکز لیزر ۱۲۰mm می‌باشد. پرتو لیزر به کمک یک میز دوار که بر روی بستر لیزر قرار گرفته است، به صورت آنالوگ بر روی سطح حرکت می‌کند.

پودر درون محفظه حفاظت شده‌ای قرار گرفته و هوای اطراف آن توسط یک پمپ خلاء ۵ لیتری تا فشار ۰/۸۵- بار تخلیه شده است. پودر مورد استفاده شامل مخلوط پودر آهن ۵۰μm و مس ۴۵μm می‌باشد. شکل ذرات پودر آهن کروی و ذرات مس نامنظم می‌باشد.

آزمایشات بر روی بستر پودر آزاد به عمق ۵ میلی‌متر صورت گرفته است. پودر توسط یک تیغه آلومینیومی که زاویه ۱۰ درجه با سطح دارد، صاف می‌شود. علت استفاده از تیغه با زاویه ۱۰ درجه کم بودن حجم پودر مقابل تیغه جهت هموارسازی است [۱۴]. علاوه بر این از آلومینیوم به دلیل غیر مغناطیسی بودن آن استفاده شده است.

جدول (۱): پارامترهای ساخت نمونه‌های مختلف

پارامترها	همپوشانی	ولتاژ	پالس	فرکانس	قطر لیزر	قطر نمونه	سرعت اسکن	میزان مس
نمونه	Pulse/mm	Volt	ms	Hz	mm	mm	mm/s	Wt%
1	40	275	6	15	2.5	20	0.375	20
2	20	300	4	15	2.5	20	0.75	30
3	60	300	6	15	2.5	20	0.25	30
4	20	300	6	15	2.5	20	0.75	10
5	60	250	4	15	2.5	20	0.25	10
6	20	250	4	15	2.5	20	0.75	10
7	60	300	4	15	2.5	20	0.25	10
8	40	275	4	15	2.5	20	0.375	20
9	60	250	4	15	2.5	20	0.25	30
10	40	275	6	15	2.5	20	0.375	20
11	20	250	6	15	2.5	20	0.75	30
12	40	275	5	15	2.5	20	0.375	20
13	28.3	241.7	6.82	15	2.5	20	۳0.5	۳9.
14	37.8	243.6	5.97	15	2.5	20	۴۰.0	5.1



شکل (۱): نمای فوقانی ۱۴ نمونه تولید شده بر اساس پارامترهای جدول ۱ و نمونه صفحه‌ای تولید شده با شرایط بهینه

عمق نفوذ، میزان مذاب ایجاد شده و اثر آن بر روی نمونه را نشان می‌دهد. میزان عمق نفوذ به کمک کولیس از روی نمونه‌ها استخراج شده است. پهنای حلقه، وابسته به قطر پرتو بوده و میزان انتشار مذاب بر روی سطح را نشان می‌دهد. عمق قسمت

#### ۴- طبقه بندی نتایج

تنوع اثرات مشاهده شده بر روی نمونه‌ها منجر به ایجاد طبقه بندی‌های مختلفی شد. به واسطه مشکل بودن اندازه‌گیری این اثرات، مشاهدات به صورت مقایسه‌ای بین نمونه‌ها رده‌بندی شده است. به این ترتیب به هر یک از نمونه‌ها رتبه‌ای در مقایسه با یک نمونه مرجع داده می‌شود. طبقه‌بندی‌های کیفی بررسی شده در زیر آمده است.

شکل ۱ نمای فوقانی نمونه‌های تولیدی را نشان می‌دهد. برای هر یک از نمونه مشخصات خروجی در زوایای ۶۰ درجه بررسی شده است. میانگین این مقادیر به عنوان خروجی‌های اصلی در نظر گرفته شده است. جدول ۲ این مقادیر میانگین را برای هر ۱۴ نمونه تولیدی نشان می‌دهد. تأثیر پارامترهای ورودی با مقایسه میانگین داده‌ها بدست آمده است. مقادیر بررسی شده شامل عمق نفوذ، پهنای حلقه، میزان تقعر، میزان گوی‌شدگی، صافی سطح و ... می‌باشد.

جدول (۲): میانگین مقادیر خروجی برای نمونه‌های تولید شده

نمونه	میانگین عمق نفوذ	میانگین پهنای کل حلقه	میانگین پهنای قسمت نف جوشی	میانگین عمق قسمت مقعر	ارتفاع دیواره بغل	میانگین پهنای مذاب	میزان عدم مستطیلی بودن	میزان گوی‌شدگی (%)	صافی سطح
1	1.3 9	2.8 7	0.7 7	0.2 3	1.0 5	1.3 3	0.3	50	20 0
2	1.7 3	3.0 3	0.7 7	0.6 7	1.2 0	1.5 0	0.5	10 0	10
3	1.6 1	3.0 3	0.8 7	0.3 3	0.5 0	1.3 0	1.1	70	10 0
4	1.3 6	2.8 5	0.7 3	0.2 3	0.8 2	1.3 8	0.5	80	50
5	0.9 0	2.2 7	0.7 0	0.0 2	0.8 0	0.8 7	0.1	15	50 0
6	0.6 1	1.9 0	0.5 0	0.0 0	0.6 0	0.9 0	0.0	0	10 00
7	1.5 2	3.3 3	0.9 0	0.2 3	0.3 0	1.5 3	1.2	70	10 0
8	1.3 0	2.7 6	0.7 3	0.1 7	0.9 0	1.3 0	0.4	30	30 0
9	0.5 5	1.8 2	0.9 0	0.0 0	0.5 3	0.0 0	0.0	0	12 00
10	1.3 7	2.8 4	0.7 7	0.2 3	1.0 5	1.3 1	0.3	45	25 0
11	0.6 3	1.8 3	0.9 2	0.0 0	0.6 0	0.0 0	0.0	0	80 0
12	1.3 0	2.7 7	0.7 5	0.2 3	1.0 0	1.2 7	0.3	40	30 0
13	0.7 5	2.1 2	0.6 0	0.0 0	0.7 3	0.9 2	0.0	5	10 00
14	0.6 7	1.8 5	0.5 0	0.0 0	0.6 5	0.8 5	0.0	2	12 00

#### ۲-۵- همپوشانی

بررسی تأثیر درصد مس بر روی عمق نفوذ رفتار دوگانه‌ای را بین ولتاژ ۲۵۰ و ۳۰۰ نشان می‌دهد. در واقع در یک هم‌پوشانی یکسان و ولتاژ ۲۵۰، نمونه‌های تولید شده با ۱۰٪ مس عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با ۳۰٪ مس نشان می‌دهند. در حالیکه این امر در ولتاژ ۳۰۰ کاملاً برعکس است. یعنی بیشترین عمق نفوذ مربوط به مس ۳۰٪ است. با افزایش هم‌پوشانی پهنای حلقه نیز اضافه خواهد شد. این افزایش پهنای مورد نمونه‌های تولید شده با ۱۰٪ مس کاملاً مشهود است، در صورتیکه در مورد ۳۰٪ مس این امر تقریباً بسیار ناچیز می‌باشد.

مقعر نیز مؤید میزان انقباض بستر پودر خواهد بود. گوی‌شدگی و صافی سطح وابسته به یکدیگرند. معمولاً سطوحی با گوی‌شدگی کمتر صافی سطح بالاتری دارند. به دلیل اسکن بر روی بستر پودر سرد معمولاً گوی‌شدگی اولین خط اسکن دیده می‌شود. اغلب نمونه‌هایی با سطح مقطع‌های مستطیلی دارای دقت ابعادی بهتری خواهند بود. سطح مقطع نمونه‌هایی که به مستطیل نزدیک‌تر است از این لحاظ رده بالاتری دارند. به دلیل وجود تنش حرارتی شیارهایی بر روی بستر پودر دیده می‌شود. تعداد و اندازه این شیارها نیز در نمونه‌های مختلف بررسی شده است. میزان چسبندگی مهره‌های مذاب به یکدیگر نشان‌دهنده استحکام قطعه است. هر چه استحکام بالاتر باشد میزان چسبندگی مهره‌های مذاب نیز بالاتر است. به دلیل تنش حرارتی، انحنای در طول نمونه‌ها، ایجاد می‌شود. نمونه‌ها بر اساس میزان بلند شدن از روی بستر طبقه‌بندی می‌شوند.

#### ۵- تاثیر پارامترها

##### ۵-۱- تاثیر ولتاژ (توان) لیزر

با افزایش ولتاژ توان لیزر بیشتر شده و میزان بیشتری از پودر را ذوب می‌کند. در واقع افزایش ولتاژ بیشترین و بارزترین اثر را بر چگالی انرژی لیزر دارد. با افزایش ولتاژ میزان عمق نفوذ لیزر درون بستر پودر بالا رفته و ضخامت لایه تولیدی بیشتر می‌شود. این روند در مورد پهنای حلقه‌های این آزمایش نیز قابل مشاهده است.

به دلیل افزایش مذاب و در نتیجه انقباض بیشتر، در شرایط یکسان، در ولتاژهای بالاتر گوی‌شدگی بیشتر و در نتیجه صافی سطح کمتر دیده می‌شود. اغلب در نمونه‌های تولید شده در ولتاژ پایین تنها مس ذوب شده و پودر آهن را احاطه می‌کند. بنابر این به دلیل کمی انقباض، گوی‌شدگی محدودی دیده می‌شود.

است. یعنی بیشترین عمق نفوذ مربوط به مس ۳۰٪ است. علت این پدیده شاید به این دلیل باشد که در ولتاژ ۲۵۰ ذوب پودر آهن بسیار اندک و جزئی است و در واقع بدلیل پایین بودن ضریب جذب مس نسبت به آهن، پودر آهن گرم شده و باعث ذوب پودر مس خواهد شد. در حالتی که درصد وزنی مس پایین تر است، در واقع پودر آهن بیشتری در محیط وجود دارد و این امر باعث جذب بیشتر پرتو لیزر و در نتیجه اضافه شدن عمق نفوذ می شود. به همین سبب در ولتاژهای پایین عمق نفوذ در حلقه های با مس بالاتر کمتر است. اما در ولتاژ ۳۰۰ ولت، پرتو لیزر قادر خواهد بود پودر آهن را کاملاً ذوب کند. در این شرایط پودر آهن ذوب شده و ذرات مس درون مذاب آهن ذوب می شوند. در نتیجه هرچه میزان پودر مس بالاتر باشد، حجم حوضچه مذاب بالاتر خواهد رفت. این امر باعث خواهد شد تا در ولتاژهای بالا، حلقه های با درصد مس بیشتر، عمق نفوذ بالاتری داشته باشند.

نکته ای که به وضوح از شکل (الف) ۲ درک می شود وابستگی مستقیم پهنای حلقه به ولتاژ اعمالی است. زیرا در ولتاژهای بالاتر انرژی اعمالی به سطح قطعه بالا رفته و توانایی تولید مذاب بیشتری حاصل می شود. با افزایش هم پوشانی پهنای حلقه نیز اضافه خواهد شد. علت این امر شاید به این سبب باشد که مخلوط پودر ایجاد شده با ۳۰٪ مس انتقال حرارت به مراتب بالاتری دارد. بنابراین انرژی این افزایش پهنای مورد نمونه های تولید شده با ۱۰٪ مس کاملاً مشهود است، در صورتیکه در مورد ۳۰٪ مس این امر تقریباً بسیار ناچیز می باشد. اعمالی لیزر به سرعت به اطراف منتقل شده و از حوضچه مذاب خارج می شود. به همین دلیل افزایش هم پوشانی نمی تواند چندان دمای حوضچه مذاب را ثابت نگه دارد. در نتیجه بین میزان هم پوشانی زیاد و کم تفاوت چندانی دیده نمی شود.

در نمونه های ایجاد شده در ولتاژ پایین، بدلیل عدم ذوب و یا ذوب جزئی پودر آهن و احاطه شدن ذرات آهن توسط مذاب مس تقریباً هیچ تقعر و یا تفرع خیلی اندکی، بر روی سطح ایجاد شده است. اما با افزایش ولتاژ پودر آهن نیز دست خوش ذوب خواهد شد. به این ترتیب ایجاد مذاب باعث بالا رفتن انقباض و در نتیجه افزایش تقعر سطح خواهد شد. نکته قابل

هرچه درصد مذاب بیشتر باشد میزان گوی شدگی بالاتر خواهد بود. در مورد تاثیر درصد مس بر میزان گوی شدگی رفتار دوگانه ای، بین قطعات تولید شده در ولتاژهای بالا و پایین دیده می شود. در ولتاژهای پایین کاهش درصد مس و در ولتاژهای بالا افزایش درصد مس، گوی شدگی بیشتر را به دنبال خواهد داشت.

### ۳-۵- درصد مس

بررسی تاثیر درصد مس بر روی عمق نفوذ نیز رفتار دوگانه ای را بین ولتاژ ۲۵۰ و ۳۰۰ نشان می دهد. در واقع در یک هم پوشانی یکسان و ولتاژ ۲۵۰، نمونه های تولید شده با ۱۰٪ مس عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه های تولید شده با ۳۰٪ مس نشان می دهند. در حالیکه این امر در ولتاژ ۳۰۰ کاملاً برعکس است. یعنی بیشترین عمق نفوذ مربوط به مس ۳۰٪ است. با افزایش هم پوشانی پهنای حلقه نیز اضافه خواهد شد. این افزایش پهنای در مورد نمونه های تولید شده با ۱۰٪ مس کاملاً مشهود است، در صورتیکه در مورد ۳۰٪ مس این امر تقریباً بسیار ناچیز می باشد. هرچه درصد مذاب بیشتر باشد میزان گوی شدگی بالاتر خواهد بود [۷]. در مورد تاثیر درصد مس بر میزان گوی شدگی رفتار دوگانه ای، بین قطعات تولید شده در ولتاژهای بالا و پایین دیده می شود. در ولتاژهای پایین کاهش درصد مس و در ولتاژهای بالا افزایش درصد مس، گوی شدگی بیشتر را به دنبال خواهد داشت.

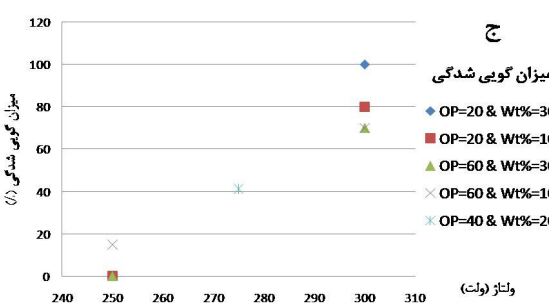
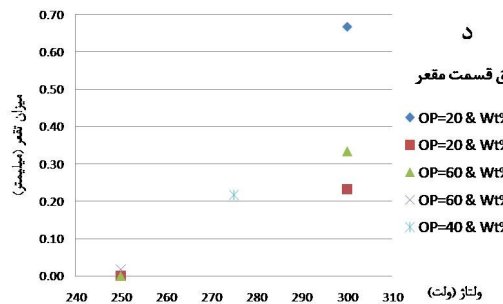
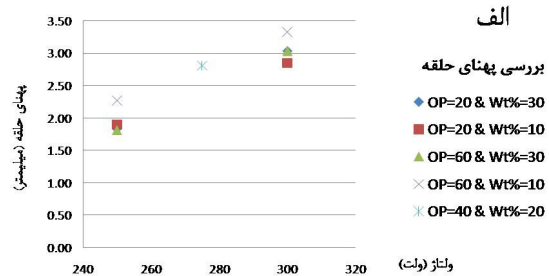
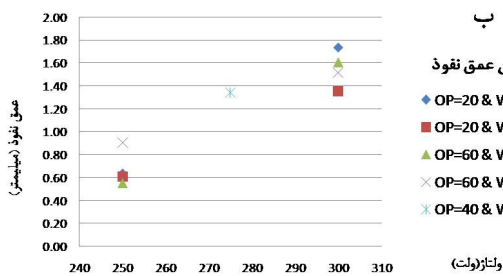
### ۶- بحث

نکته بارز در شکل (ب) ۲ افزایش محسوس عمق نفوذ با افزایش ولتاژ است. در یک درصد ثابتی از مس، افزایش هم پوشانی تأثیری مشابه با افزایش آن در پودر آهن خالص دارد. یعنی با افزایش میزان هم پوشانی به سبب افزایش انرژی اعمالی به بستر پودر، زیاد شدن عمق نفوذ در حلقه ها مشهود است. اما بررسی تاثیر درصد مس بر روی عمق نفوذ رفتار دو گانه ای را بین ولتاژ ۲۵۰ و ۳۰۰ نشان می دهد. در واقع در یک هم پوشانی یکسان و ولتاژ ۲۵۰، نمونه های تولید شده با ۱۰٪ مس عمق نفوذ بیشتری را نسبت به نمونه های تولید شده با ۳۰٪ مس نشان می دهند. در حالیکه این امر در ولتاژ ۳۰۰ کاملاً برعکس

آهن چسبیده و آنها را احاطه می‌کنند. به این ترتیب حجم مذاب تنها درصدی (مقداری بالاتر از درصد پودر مس) از حجم حلقه را تشکیل می‌دهد. این عامل باعث خواهد شد تا هیچ گوی‌شدگی در روی سطح مشاهده نشود. تنها در همپوشانی ۶۰ و مس ۱۰٪ مقداری گوی‌شدگی بر روی سطح دیده می‌شود. علت این امر بالا رفتن میزان مذاب است. زیرا در همپوشانی ۶۰ انرژی اعمالی به ذرات آهن به میزانی است که بتواند تا حدودی آنها را ذوب نماید. بعلاوه بدلیل بالا بودن حجم آهن و ضریب جذب بالای آن، علاوه بر ذوب کامل مس، ذرات ریز آهن نیز مذاب خواهد شد. به این ترتیب این حجم مذاب تا حدودی اثر گوی‌شدگی روی سطح را نشان می‌دهد.

درک از شکل (د) اینست که در ولتاژهای بالا، افزایش درصد مس باعث افزایش تقعر سطح می‌شود. زیرا با اضافه شدن حجم مس، حجم مذاب ایجاد شده بالا خواهد رفت. این امر باعث انقباض بالاتر و در نتیجه گودتر شدن سطح خواهد شد. شکل (ج) رابطه بین ولتاژ و میزان گوی‌شدگی را به خوبی نشان می‌دهد. هرچه ولتاژ بالاتر باشد، انرژی اعمالی به بستر پودر بیشتر خواهد شد. این امر باعث افزایش حجم مذاب و در نتیجه مشهودتر شدن اثر گوی‌شدگی بر روی سطح خواهد شد.

زیرا عامل اصلی بوجود آورنده اثر گوی‌شدگی، انقباض مذاب است. در ولتاژ ۲۵۰ بدلیل عدم ذوب پودر آهن و قرار گرفتن آن در زمینه مذاب مس، حالتی کامل از تفجوشی حالت مایع دیده می‌شود. به همین دلیل مذاب مس کاملاً به سطح ذرات پودر



شکل (۲): رابطه بین ولتاژ و (الف) پهنای حلقه (ب) عمق نفوذ (ج) میزان گوی‌شدگی (د) عمق قسمت مقعر در همپوشانی‌های مختلف و درصد مس متفاوت

شکل می‌گیرد و حوضچه مذاب با یکنواختی بیشتری بر روی سطح پودر حرکت می‌کند. در نتیجه سطح صاف و هموارتری را شاهد خواهیم بود. اما در همپوشانی‌های پایین‌تر عدم پایداری حوضچه باعث عدم حرکت و جا ماندن مذاب بر روی سطح می‌شود. به این ترتیب مذاب بجای ماندن به صورت گوی‌هایی، جامد شده و باعث مشهودتر شدن پدیده گوی‌شدگی می‌شوند. نکته جالب توجه اضافه شدن میزان گوی‌شدگی با افزایش درصد

اما با این حال این مقدار چندان قابل توجه نیست. در ولتاژهای بالاتر بدلیل بیشتر شدن حجم مذاب اثر گوی‌شدگی به وضوح مشهود است. نکته جالب توجه پایین آمدن میزان گوی‌شدگی با افزایش همپوشانی در ولتاژهای بالاست. این حالت مشابه پدیده بوجود آمده در مورد آهن خالص است. علت این امر بالا رفتن میزان مذاب و پایدارتر شدن حوضچه مذاب با افزایش همپوشانی است. با بالا رفتن همپوشانی حوضچه مذاب پایدارتری

معمولاً لایه‌ای از اکسید تیره رنگ در شروع حلقه دیده می‌شود. این لایه اکسید به دلیل وجود فشار جزئی اکسیژن در محیط ایجاد می‌شود. لایه اکسید ایجاد شده باعث می‌شود تا حلقه در نقطه اتصال ابتدا و انتها اتصال ضعیفی داشته باشد. زیرا اکسیدهای سطحی باعث کاهش ترشده‌گی سطح خواهند شد. به این ترتیب جبهه مذاب ایجاد شده نمی‌تواند اتصال مناسبی را با سطح جامد برقرار نماید. در توان‌های بالای لیزر، انرژی لیزر می‌تواند بر اکسیدهای سطحی فائق آید. به این ترتیب اتصال قوی‌تری بین ابتدا و انتهای حلقه ایجاد خواهد شد. علاوه بر این انرژی شروع پالس لیزر اغلب در لحظه شروع بالاست. به همین سبب حفره‌ای در نقطه شروع حلقه ایجاد می‌شود. برای فائق آمدن بر این مشکلات می‌توان در استراتژی اسکن، لیزر را از محدوده خارج از قطعه فعال نمود. به این ترتیب هم اکسیژن اندک باقی مانده در محیط، مصرف می‌شود و هم انرژی لیزر پایدار خواهد شد.

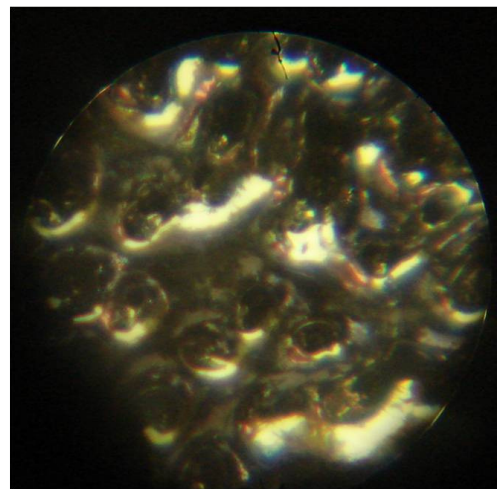
#### ۷- نتیجه گیری

با انجام آزمایشات اولیه، و تعریف تابع همپوشانی محدوده ۲۵۰ تا ۳۰۰ برای ولتاژ و بازه ۱۰ تا ۵۰ برای همپوشانی انتخاب می‌شود. آزمایشات بر روی پودر آهن و مس نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ میزان مذاب تولیدی بالا رفته و در نتیجه عمق نفوذ و پهنای حلقه زیاد می‌شود. افزایش همپوشانی نیز تاثیر مشابهی بر روی میزان مذاب و افزایش عمق نفوذ و پهنای حلقه دارد. اما بررسی تاثیر درصد مس بر روی عمق نفوذ رفتار دوگانه‌ای را بین ولتاژ ۲۵۰ و ۳۰۰ نشان می‌دهد. در واقع در یک همپوشانی یکسان و ولتاژ ۲۵۰، نمونه‌های تولید شده با ۱۰٪ مس عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با ۳۰٪ مس نشان می‌دهند. در حالیکه این امر در ولتاژ ۳۰۰ کاملاً برعکس است. مس ۳۰٪ انتقال حرارت بالاتری دارد و انرژی لیزر را سریع‌تر منتقل می‌کند. در نتیجه افزایش همپوشانی نمی‌تواند چندان دمای حوضچه را بالا ببرد. بنابراین تاثیر همپوشانی بر پهنای حلقه در مس ۳۰٪ کمتر دیده می‌شود.

هرچه ولتاژ بالاتر باشد، انرژی اعمالی به بستر پودر بیشتر خواهد شد. این امر باعث افزایش حجم مذاب و در نتیجه مشهودتر

مس است. علت اصلی این پدیده بالاتر رفتن ضریب انتقال حرارت در مخلوط پودر با مس بیشتر است. انتقال حرارت بالاتر باعث پایداری کمتر حوضچه مذاب شده و احتمال جا ماندن مذاب را در حین حرکت بر روی بستر پودر بیشتر می‌کند. بنابراین گوی‌شده‌گی بیشتر را بدنبال خواهد داشت.

در اکثر نمونه‌ها در ۱۰ درجه پایانی تولید واشر ترکی دیده می‌شود. علت این ترک انقباض بستر پودر در اثر جامد شدن می‌باشد. ایجاد جبهه مذاب باعث کشیده شدن پودر به درون حوضچه مذاب خواهد شد. اختلاف بین چگالی بستر و مذاب ایجاد شده باعث کمبود پودر و در نتیجه ایجاد فاصله بین جبهه مذاب و بستر پودر خواهد شد.



شکل (۳): تصویر اپتیکی از نمای فوقانی نمونه ۷ با بزرگ‌نمایی ۱۰۰X (میزان گوی‌شده‌گی)

در زاویه ۱۰ درجه پایانی این اختلاف به حدی می‌رسد که پرتو لیزر نمی‌تواند شکاف ایجاد شده را با مذاب پر نماید. به همین سبب این کمبود پودر اغلب به صورت ترک بروز می‌کند. در نمونه‌های که انرژی لیزر بالاست، مذاب تولیدی می‌تواند شکاف ایجاد شده را پر کند. در این حالت ترک چندان محسوس نیست. اضافه شدن طول اسکن باعث ایجاد ترک‌های بیشتر و عمیق‌تر بر روی سطح خواهد شد. این امر در نمونه‌های تولید شده با قطر بیشتر به وضوح دیده شد. می‌توان این ترک‌ها را با افزایش چگالی بستر پودر خام به حداقل رساند.



باعث پایداری کمتر حوضچه مذاب شده و احتمال جا ماندن مذاب را در حین حرکت بر روی بستر پودر بیشتر می‌کند. در نتیجه افزایش درصد مس، گوی‌شدگی بیشتر را بدنبال خواهد داشت.

#### پی‌نوشت

- 1- Rapid Prototyping
- 2- Laser Engineered Net Shaping
- 3- Selective Laser Sintering
- 4- Electron Beam Melting
- 5- Balling
- 6- Indirect Metal Sintering (IMS)
- 7- Direct Metal Laser Sintering
- 8- Direct Metal Laser Re-Melting

شدن اثر گوی‌شدگی بر روی سطح خواهد شد. علاوه بر این هرچه حجم مذاب بالاتر باشد، میزان انقباض و در نتیجه تقعر سطح نیز بیشتر خواهد شد. در ولتاژ ۲۵۰ بدلیل عدم ذوب پودر آهن و قرارگرفتن آن در زمینه مذاب مس، حالتی کامل از تفجوشی حالت مایع دیده می‌شود. به این ترتیب حجم مذاب تنها درصدی (مقداری بالاتر از درصد پودر مس) از حجم حلقه را تشکیل می‌دهد. این عامل باعث خواهد شد تا هیچ گوی‌شدگی در روی سطح مشاهده نشود. در ولتاژهای بالاتر بدلیل بیشتر شدن حجم مذاب اثر گوی‌شدگی به وضوح مشهود است. اما با افزایش هم‌پوشانی میزان مذاب به اندازه ای افزوده می‌شود که می‌تواند حوضچه مذاب پایداری تولید کند. در نتیجه سطح صاف و هموارتری بدست می‌آید. انتقال حرارت بالاتر

#### مراجع

- 1- M. Shellabear, O. Nyrhilä. Erlangen “DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART.”: LANE 2004 conference, 2004.
- 2- Villalon, ADA Venus. “Electron Beam Fabrication of Injection Mold Tooling with Conformal Cooling Channels.” North Carolina University : A thesis submitted to the Graduate Faculty of, 2005.
- 3- Patri K. Venuvinod, Weiyin Ma. “Rapid Prototyping-Laser-based and Other Technologies.” Norwell : Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 1-4020-7577-4.
- 4- J-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen and M. Rombouts, “Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting” 1, 2005, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 26–36.
- 5- J.P. Kruth, S. Kumar and J. Van Vaerenbergh, “Study of laser-sinterability of ferro-based powders”. Leuven : Emerald Group Publishing Limited, 2005, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 287-292. ISSN 1355-2546.
- 6- H.H. Zhu, J.Y.H. Fuh, L. Lu. Huazhong, “The influence of powder apparent density on the”: Elsevier Ltd, 2007, Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 294-298.
- 7- Nikolay K. Tolochko, Maxim K. Arshinov, Andrey V. Gusarov, Victor I. Titov, Tahar Laoui and Ludo Froyen, “Mechanisms of selective laser sintering and heat transfer in Ti powder” 5, s.l.: Rapid Prototyping Journal, 2003, Vol. 9, pp. 314-326.
- 8- Edson Costa Santos, Masanari Shiomi, Kozo Osakada, Tahar Laoui, “Rapid manufacturing of metal components by laser forming” 2006, Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 1459–1468.
- 9- Nikolay K. Tolochko, Sergei E. Mozzharov, Igor A. Yadroitsev, Tahar Laoui, Ludo Froyen, Victor I. Titov and Michail B. Ignatiev, “Balling processes during selective laser treatment of powders”. Emerald Group Publishing Limited, 2004, Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, pp. 78-87. ISSN 1355-2546.
- 10- R. Morgan, C.J. Sutcliffe and W.O'Neill, “Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd-YAG laser re-melted pre-placed powder beds” Liverpool : Rapid Prototyping Journal, 2001, Vol. 7, pp. 159-172.
- 11- R. MORGAN, C. J. SUTCLIFFE, W. O'NEILL, “Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives” Liverpool: Kluwer Academic Publishers, 2004, Vol. 39, pp. 1195-1205. 0022-2461.
- 12- H.H. Zhu, J.Y.H. Fuh and L. Lu. 2, Huazhong, “Microstructural evolution in direct laser sintering of Cu-based metal powder” : Emerald Group Publishing Limited, 2005, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 74-81. ISSN 1355-2546.
- 13- Simchi, A, “Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features” Tehran : Elsevier, 2006, Materials Science and Engineering, Vol. A 428, pp. 148-158.
- 14- B. Van der Schueren, and J.P. Kruth, “Powder deposition in selective metal powder sintering” Heverlee : MCB University Press, 1995, Rapid Prototyping Journal, Vol. 1, pp. 23-31. ISSN 1355-2546.