

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

سید امید میرمحمدصادقی<sup>۱\*</sup>، جمال زمانی اشنی<sup>۲</sup>، سید علی فاطمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۳ خرداد ۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۵ تیر ۹۲

### 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.

واژگان کلیدی: نمونه‌سازی سریع، پودر فلز، تفجوشی لیزری، DMLS.

### ۱. مقدمه

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 (مثلی یا چند ضلعی) تقریب زده شده است. به این فرمت به صورت مختصر STL می‌گویند. وقتی که فایل STL ساخته شد. 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 قطعه سه بعدی 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: SLS، LENS و EBM

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 (RP) روشی برای تولید نمونه‌های مهندسی بدون نیاز به شکل دهی سنتی می‌باشد. نمونه‌های اولیه مهندسی به منظور ارزیابی جنبه‌های مختلفی قطعه از قبیل روابط انطباق، زیبایی شناسی، تست‌های 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].

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. sadeghi.omid@gmail.com

<sup>۲</sup> دکتری مکانیک و دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

ترشدگی به واسطه اثر کشش سطحی باعث به وجود آمدن عیوبی از قبیل خلال و فرج، گوی شدگی و لایه لایه شدن می شود [۹]. فن آوری SLS می تواند به سه صورت مختلف تقسیم شود. در فرآیند تف جوشی غیرمستقیم فلزی<sup>۶</sup> از یک لیزر توان پایین به منظور ذوب و اتصال جزء اتصال دهنده پلیمر استفاده می شود. تا مانند یک ماتریس عمل کند. مرحله بعدی پلیمر از ساختار خارج می شود و به جای آن یک آلیاژ فلزی با دمای پایین نفوذ داده می شود. در DMLS<sup>۷</sup> مخلوطی از دو جزء فلزی با دمای بالا و پایین تف جوشی می شود. در این حالت جزء با دمای پایین ذوب شده و جزء با دمای ذوب بالا را در خود می گیرد. در DMLR<sup>۸</sup> از یک جزء فلزی (بدون نیاز به اتصال دهنده و نفوذ) استفاده می شود. این امر نیاز به ذوب مستقیم، هم جوشی و جامد شدن مواد دارد تا قطعاتی با چگالی بالا تولید کند [۱۰ و ۱۱]

در خلال فرآیند تفجوشی لیزری، واکنش های فیزیکی و شیمیایی پیچیده ای رخ می دهد. 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 شبیه سازی و فرموله نموده اند. محققان دیگری مانند لویی 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 آورده اند [۱۲].

پارامترهای موثر بر تفجوشی لیزری را می توان به سه گروه عمده پارامترهای فرآیند، پارامترهای مواد و پارامترهای محیطی تقسیم نمود [۱۳]. پارامترهای فرآیند اغلب بر روی فرآیندهای لیزری موثراند و چگالی انرژی لیزر را کنترل می کنند. 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 می باشد. در پاره ای از موارد می توان این پارامترها را در یک تابع، به صورت چگالی شار بررسی نمود. پارامترهای مواد شامل ترکیب شیمیایی، درصد اکسیژن، روش آلیاژسازی، مشخصات

برای تولید قطعات فلزی به صورت سریع مورد استفاده قرار می گیرند. از بین این روش ها، فن آوری های پایه پودری (SLS<sup>۴</sup>) متداول تر است. فرآیند SLS تولیدی لایه به لایه است که اجازه تولید قطعات پیچیده سه بعدی را از طریق جامد سازی لایه های پودری بر روی یکدیگر می دهند. ضخامت لایه در این آزمایشات بین 20µm تا 150µm و توسط سیستم لایه نشانی ایجاد می شود [۴]. در این فرآیند، یک لیزر (حدوداً ۲۰۰ W) به صورت مستقیم روی مخلوط پودر فلز عمل می کند. پودر شامل مخلوطی از برنز، نیکل و بعضی دیگر افزودنی ها است. مزیت این مواد اینست که در خلال فرآیند تفجوشی انقباض خیلی کمی را نشان می دهند و در نتیجه قطعات با دقت بالایی تولید می شود. 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 شده اند [۵]. با کمک SLS تولید قطعات با چگالی بالاتر از ۶۳٪ تا ۱۰۰٪ قابل دسترسی است و دیگر نیازی به استفاده از کوره های 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 پدیده گوی شدگی<sup>۵</sup> است. انقباض عامل اصلی پدیده گوی شدگی است. فرآیند گوی شدگی با افزایش در طول اسکن، افزایش و با کاهش در ضخامت لایه پودر، کاهش می یابد [۷].

برای ذوب پودر می توان 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 تولید شده در مواد به واسطه گرادیان حرارتی بالا شایع می باشد. اما مشکل مهم تر اکسید شدگی و کاهش ترشدگی مواد است. کاهش

<sup>6</sup> - Indirect Metal Sintering (IMS)

<sup>7</sup> - Direct Metal Laser Sintering

<sup>8</sup> - Direct Metal Laser Re-Melting

<sup>4</sup> - Selective Laser Sintering

<sup>5</sup> - Balling

### ۳. طریقه آزمایشات

به منظور تولید قطعات چند لایه کاملاً چگال توسط فرایندهای لیزری پالس، 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 تک لایه و تنها با یک بار اسکن لیزر بر روی بستر پودر تولید شده است. حرکت پرتو لیزر بر روی سطح، واشرهایی به قطر ۲۰ میلیمتر تولید می‌کند.

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.

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

به این ترتیب با ثابت نگه داشتن قطر پرتو لیزر، تعداد پارامترهای تعیین کننده انرژی لیزر به سه پارامتر، ولتاژ، پالس و هم‌پوشانی محدود خواهد شد. با توجه به اینکه تولید نمونه‌ها به صورت حرکت تک مسیر 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 تفووشی لیزری میزان قابل چشم پوشی باشد [۱۰، ۱۱].

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

ذرات (اندازه، شکل، میزان سیلان و ...) و چگالی بستر پودر می‌باشد. پارامترهای محیطی نیز نقش موثری 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 1.064nm، دارای Q-Switch و ساخت شرکت پایا پرتو می‌باشد. پارامترهای قابل تغییر در این لیزر شامل ولتاژ V (250-400V)، قطر پرتو لیزر D (0.1-2.5mm)، زمان روشن بودن پالس (پهنای پالس) P (0-10ms) و فرکانس موج خروجی f (0-15Hz) 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 2.5mm و فاصله تمرکز لیزر 120mm 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 50μm و مس 45μm 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.

همپوشانی در بازه (20-60) و درصد مس بین ۱۰ تا ۳۰ درصد وزنی بررسی و سایر پارامترها ثابت فرض می‌شود.

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 (250-300)

جدول ۱. پارامترهای ساخت نمونه های مختلف

پارامتر	نی همپوشا	ولتاژ	پالس	فرکانس	قطر لیزر	نمونه قطر	اسکن سرعت	میزان مس
پارامتر	Pulse/mm	Volt	m s	H z	m m	m m	m m/s	W t%
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	0.53	9.3
14	37.8	243.6	5.97	15	2.5	20	0.40	5.1

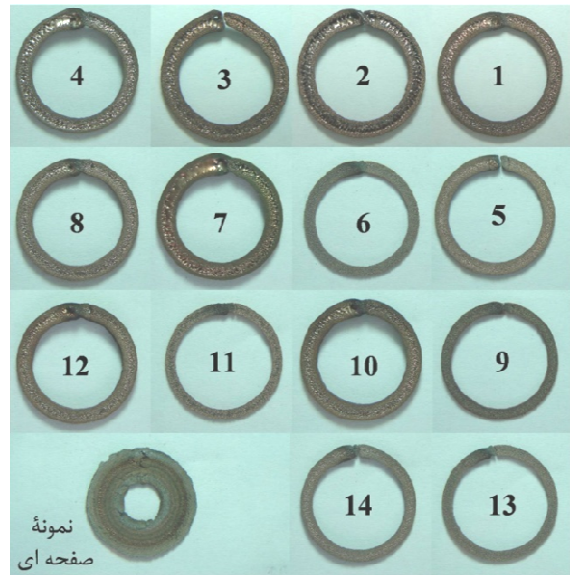
شکل ۱ نمای فوقانی نمونه‌های تولیدی را نشان می‌دهد.

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.

#### ۴. طبقه‌بندی نتایج

تنوع اثرات مشاهده شده بر روی نمونه‌ها منجر به ایجاد طبقه‌بندی‌های 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.

گوی شدگی 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 نشان دهنده استحکام قطعه است. هر چه استحکام بالاتر باشد میزان چسبندگی مهره‌های مذاب نیز بالاتر است. به دلیل تنش حرارتی، انحناءهایی در طول نمونه‌ها، ایجاد می‌شود. نمونه‌ها بر اساس میزان بلند شدن از روی بستر طبقه بندی می‌شوند.



شکل ۱. نمای فوقانی ۱۴ نمونه تولید شده بر اساس پارامترهای جدول ۱ و نمونه صفحه‌ای تولید شده

## 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.

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 مقعر نیز مؤید میزان انقباض بستر پودر خواهد بود. گوی شدگی و صافی سطح وابسته به یکدیگرند. معمولاً سطوحی با گوی شدگی کمتر صافی سطح بالاتری دارند. به دلیل اسکن بر روی بستر پودر سرد معمولاً

جدول ۲. میانگین مقادیر خروجی برای نمونه‌های تولید شده

نمونه	میانگین عمق نفوذ	میانگین پهنای کل حلقه	میانگین پهنای قسمت تف جوشی	میانگین عمق قسمت مقعر	ارتفاع دیواره بغل	میانگین پهنای مذاب	میزان عدم مستطیلی بودن	میزان گوی شدگی (%)	صافی سطح
1	1.39	2.87	0.77	0.23	1.05	1.33	0.3	50	200
2	1.73	3.03	0.77	0.67	1.20	1.50	0.5	100	10
3	1.61	3.03	0.87	0.33	0.50	1.30	1.1	70	100
4	1.36	2.85	0.73	0.23	0.82	1.38	0.5	80	50
5	0.90	2.27	0.70	0.02	0.80	0.87	0.1	15	500
6	0.61	1.90	0.50	0.00	0.60	0.90	0.0	0	1000
7	1.52	3.33	0.90	0.23	0.30	1.53	1.2	70	100
8	1.30	2.76	0.73	0.17	0.90	1.30	0.4	30	300

9	0.55	1.82	0.90	0.00	0.53	0.00	0.0	0	1200
10	1.37	2.84	0.77	0.23	1.05	1.31	0.3	45	250
11	0.63	1.83	0.92	0.00	0.60	0.00	0.0	0	800
12	1.30	2.77	0.75	0.23	1.00	1.27	0.3	40	300
13	0.75	2.12	0.60	0.00	0.73	0.92	0.0	5	1000
14	0.67	1.85	0.50	0.00	0.65	0.85	0.0	2	1200

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 هم پوشانی پهنای حلقه نیز اضافه خواهد شد. این افزایش پهنای در مورد نمونه‌های تولید شده با ۱۰٪ مس کاملاً مشهود است، در صورتیکه در مورد ۳۰٪ مس این امر تقریباً بسیار ناچیز می‌باشد. هرچه درصد مذاب بیشتر باشد میزان گوی‌شدگی بالاتر خواهد بود [۷]. در مورد تاثیر درصد مس بر میزان گوی‌شدگی رفتار دوگانه‌ای، بین قطعات تولید شده در ولتاژهای بالا و پایین دیده می‌شود. در ولتاژهای پایین کاهش درصد مس و در ولتاژهای بالا افزایش درصد مس، گوی‌شدگی 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 حلقه‌ها مشهود است. اما 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 را 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. 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 پایین‌تر است، در واقع پودر آهن بیشتری در

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. بنابراین به دلیل کمی انقباض، گوی‌شدگی محدودی دیده می‌شود.

#### ۵-۲. 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 در مورد نمونه‌های تولید شده با ۱۰٪ مس کاملاً مشهود است، در صورتی‌که در مورد ۳۰٪ مس این امر تقریباً بسیار ناچیز می‌باشد. هرچه درصد مذاب بیشتر باشد میزان گوی‌شدگی بالاتر خواهد بود. در مورد تاثیر درصد مس بر میزان گوی‌شدگی رفتار دوگانه‌ای، بین قطعات تولید شده در ولتاژهای بالا و پایین دیده می‌شود. در ولتاژهای پایین کاهش درصد مس و در ولتاژهای بالا افزایش درصد مس، گوی‌شدگی بیشتر را به دنبال خواهد داشت.

#### ۵-۳. درصد مس

بررسی تأثیر درصد مس بر روی عمق نفوذ نیز رفتار دو گانه‌ای 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

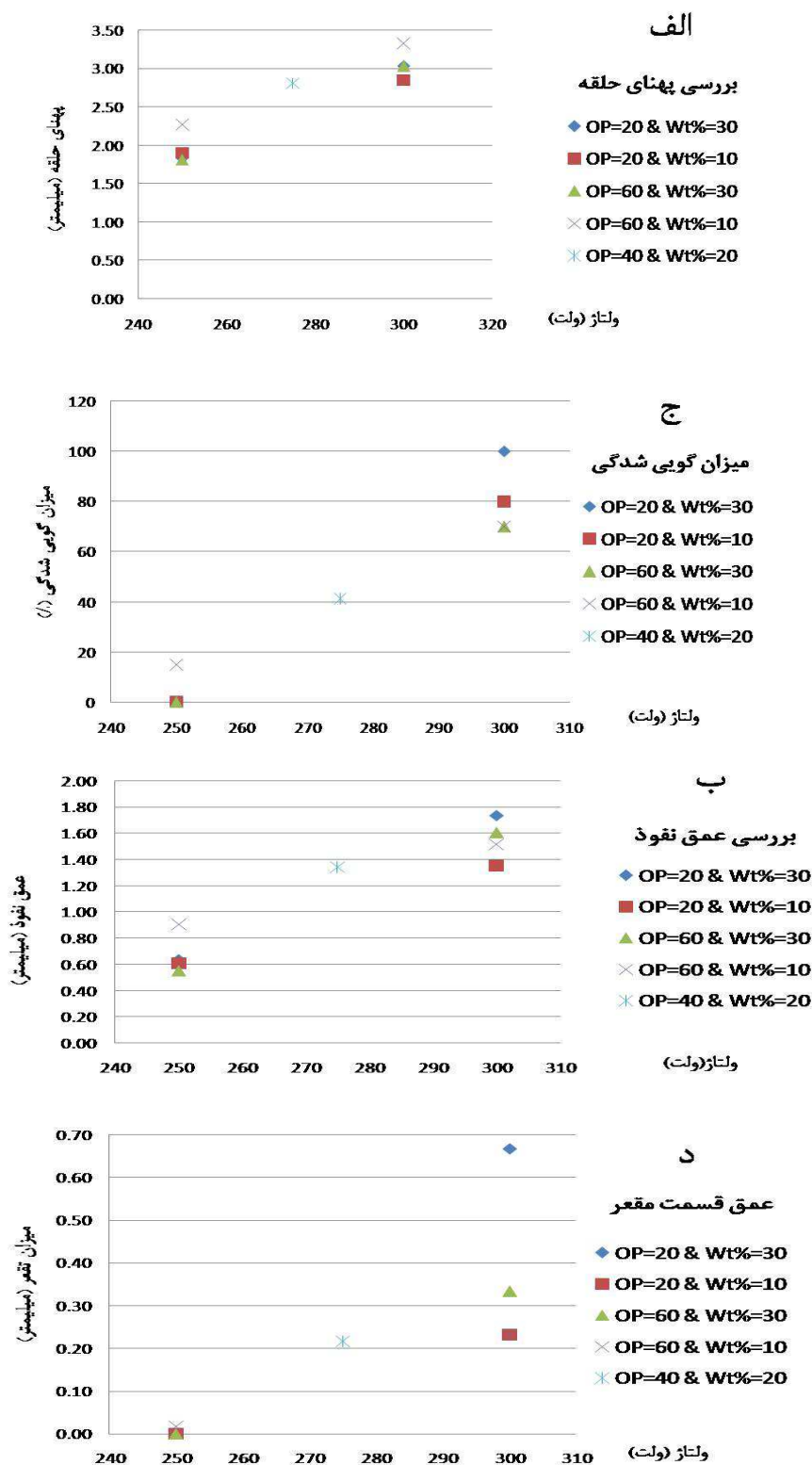
محیط وجود دارد و این امر باعث جذب بیشتر پرتو لیزر و در نتیجه اضافه شدن عمق نفوذ می‌شود. به همین سبب در ولتاژهای پایین عمق نفوذ در حلقه های با مس بالاتر کمتر است. اما در ولتاژ ۳۰۰ ولت، پرتو لیزر قادر خواهد بود پودر آهن را کاملاً ذوب کند. در این شرایط پودر آهن ذوب شده و ذرات مس درون مذاب آهن ذوب می‌شوند. 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.

نکته‌ای که به وضوح از شکل (الف) ۲ درک می‌شود 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 می‌شود. 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 در مورد نمونه های تولید شده با ۱۰٪ مس کاملاً مشهود است، در صورتیکه در مورد ۳۰٪ مس این امر تقریباً بسیار ناچیز می‌باشد. اعمالی لیزر به سرعت به اطراف منتقل شده و از حوضچه مذاب خارج می‌شود. به همین دلیل افزایش هم پوشانی نمی‌تواند چندان دمای حوضچه مذاب را ثابت نگه دارد. در نتیجه بین میزان هم پوشانی زیاد و کم تفاوت چندانی دیده نمی‌شود.

در نمونه‌های 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 تقعر 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 درک از شکل (د) ۲ 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) ۲ 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 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 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.



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

به وضوح مشهود است. نکته جالب توجه پایین آمدن میزان گویی شدگی با افزایش هم پوشانی در ولتاژهای بالاست. این

اما با این حال این مقدار چندان قابل توجه نیست. در ولتاژهای بالاتر بدلیل بیشتر شدن حجم مذاب اثر گویی شدگی



در زاویه ۱۰ درجه پایانی این اختلاف به حدی می رسد که پرتو لیزر نمی تواند شکاف ایجاد شده را با مذاب پر نماید. به همین سبب این کمبود پودر اغلب به صورت ترک بروز می کند. در نمونه های که انرژی لیزر بالاست، مذاب تولیدی می تواند شکاف ایجاد شده را پر کند. در این حالت ترک چندان محسوس نیست. اضافه شدن طول اسکن باعث ایجاد ترک های بیشتر و عمیق تر بر روی سطح خواهد شد. این امر در نمونه های تولید شده با قطر بیشتر به وضوح دیده شد. می توان این ترک ها را با افزایش چگالی بستر پودر خام به حداقل رساند.

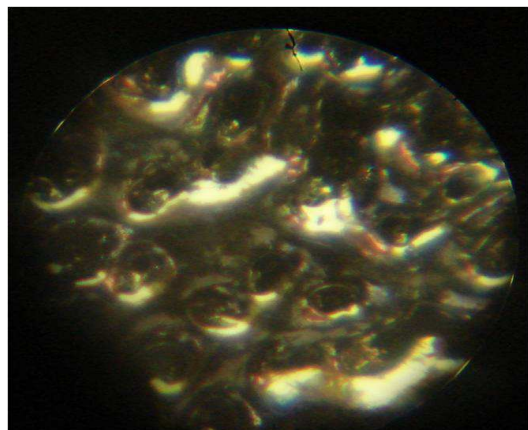
معمولاً لایه های از اکسید تیره رنگ در شروع حلقه دیده می شود. این لایه اکسید به دلیل وجود فشار جزئی اکسیژن در محیط ایجاد می شود. لایه اکسید ایجاد شده باعث می شود تا حلقه در نقطه اتصال ابتدا و انتها اتصال ضعیفی داشته باشد. زیرا اکسیدهای سطحی باعث کاهش ترشدگی سطح خواهند شد. به این ترتیب جبهه مذاب ایجاد شده نمی تواند اتصال مناسبی را با سطح جامد بر قرار نماید. در توان های بالای لیزر، انرژی لیزر می تواند بر اکسیدهای سطحی فائق آید. به این ترتیب اتصال قوی تری بین ابتدا و انتهای حلقه ایجاد خواهد شد. علاوه بر این انرژی شروع پالس لیزر اغلب در لحظه شروع بالاست. به همین سبب حفره ای در نقطه شروع حلقه ایجاد می شود. برای فائق آمدن بر این مشکلات می توان در استراتژی اسکن، لیزر را از محدوده خارج از قطعه فعال نمود. به این ترتیب هم اکسیژن اندک باقی مانده در محیط، مصرف می شود 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 می شود. آزمایشات بر روی پودر آهن و مس نشان می دهد که با افزایش ولتاژ میزان مذاب تولیدی بالا رفته و در نتیجه عمق نفوذ و پهنای حلقه زیاد می شود. افزایش همپوشانی نیز تاثیر مشابهی بر روی میزان مذاب و افزایش عمق نفوذ و پهنای حلقه دارد. اما بررسی تأثیر درصد

حالت مشابه پدیده بوجود آمده در مورد آهن خالص است. علت این امر بالا رفتن میزان مذاب و پایدارتر شدن حوضچه مذاب با افزایش هم پوشانی است. با بالا رفتن هم پوشانی حوضچه مذاب پایدارتری شکل می گیرد و حوضچه مذاب با یکنواختی بیشتری بر روی سطح پودر حرکت می کند. در نتیجه سطح صاف و هموارتری را شاهد خواهیم بود. اما در همپوشانی های پایین تر عدم پایداری حوضچه باعث عدم حرکت و جا ماندن مذاب بر روی سطح می شود. به این ترتیب مذاب بجا مانده به صورت گوی هایی، جامد شده و باعث مشهودتر شدن پدیده گوی شدگی می شوند. نکته جالب توجه اضافه شدن میزان گوی شدگی با افزایش درصد 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 می کند. بنابراین گوی شدگی بیشتر را بدنبال خواهد داشت.

در اکثر نمونه ها در ۱۰ درجه پایانی تولید و اثر ترکی دیده می شود. علت این ترک انقباض بستر پودر در اثر جامد شدن می باشد. 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 بزرگ نمایی 100X (میزان گوی شدگی)

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 حالی که 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 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 پایدار تولید کند. در نتیجه سطح صاف و هموارتری بدست می‌آید. انتقال حرارت بالاتر 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.

۸ مراجع

- [1] Shellabear, M., Nyrhilä, O., Erlangen, K., "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, W.. "Rapid Prototyping-Laser-based and Other Technologies." Norwell : Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-7577-4, 2004.
- [4] Kruth, J-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. and Rombouts, M., "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting" 1, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 26–36, 2005.
- [5] Kruth, J.P., Kumar, S. and Van Vaerenbergh, J., "Study of laser-sinterability of ferro-based powders". Leuven : Emerald Group Publishing Limited, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 287-292. ISSN 1355-2546, 2005.
- [6] Zhu, H.H., Fuh, J.Y.H., Huazhong, L. Lu., "The influence of powder apparent density on the" : Elsevier Ltd, Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 294-298, 2007.
- [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, 2003.
- [8] Edson C., Masanari S, Kozo O, Tahar L., "Rapid manufacturing of metal components by laser forming" Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 1459–1468, 2006.
- [9] Nikolay K., Tolochko, S., Mozzharov, I. 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, Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, pp. 78-87. ISSN 1355-2546, 2004.
- [10] Morgan, R., Sutcliffe, C.J. and Neill, W.O, "Experimental investigation of nanosecond pulsed Nd-YAG laser re-melted pre-placed powder beds" Liverpool: Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, pp. 159-172, 2001.
- [11] Morgan, R., SUTCLIFFE, C. J., Neill, W.O, "Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives" Liverpool: Kluwer Academic Publishers, Vol. 39, pp. 1195-1205. 0022-2461, 2004.
- [12] Zhu, H.H., Fuh, J.Y.H. and Lu, L., Huazhong, "Microstructural evolution in direct laser sintering of Cu-based metal powder": Emerald Group Publishing Limited, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11, pp. 74-81. ISSN 1355-2546, 2005.
- [13] Simchi, A, "Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features" Tehran: Elsevier, Materials Science and Engineering, Vol. A 428, pp. 148-158, 2006.
- [14] Van der Schueren, B., and Kruth, J.P., "Powder deposition in selective metal powder sintering" Heverlee: MCB University Press, Rapid Prototyping Journal, Vol. 1, pp. 23-31. ISSN 1355-2546, 1995.

