

# ارتباط بین ریزساختار و سرعت چگالش با شرایط تولید در تف جوشی لیزری پودرهای آهنی

عبدالرضا سیم چی

استادیار

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

## چکیده

در این پژوهش اثر شرایط تولید بر سرعت چگالش و ریزساختار حاصل از تف جوشی پودرهای آهنی توسط انرژی لیزر مطالعه شده است. به منظور بررسی اثر عوامل مهم، پارامتری تحت عنوان 'انرژی مخصوص (E)' تعریف شده است که نشان‌دهنده انرژی ورودی لیزر در واحد حجم لایه تف جوشی شده می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که نمودار چگالی - انرژی مخصوص روند نمایی کاهنده دارد. بدین معنی که با افزایش این انرژی تا  $0.2 \text{ kJ/mm}^3$  مقدار ازدیاد چگالی یا نرخ چگالش بسیار زیاد بوده و ریزساختار حاوی حفره‌های بسیار بزرگ با ابعاد 1-0.5 میلی‌متر است. همچنین دانه بندی فلز و شکل حفره‌ها همراستا با جهت ساخت کشیده شده‌اند. با افزایش بیشتر انرژی مخصوص نرخ چگالش کاهش می‌یابد ولی ابعاد حفره‌ها کوچکتر و ناپیوسته‌تر می‌شوند. اگر انرژی ورودی از  $0.8 \text{ kJ/mm}^3$  فراتر رود افزایش چگالی ناچیز بوده و حفره‌ها در راستای حرکت اشعه لیزر کشیده خواهند شد.

## کلمات کلیدی

تف جوشی لیزری، پودر آهن، ریزساختار، مکانیزم و سرعت چگالش

## Microstructure and Densification Relationship to the Manufacturing Parameters in Laser Sintering of Iron Powders

A. Simchi

Assistant Professor

Department of Materials Science and Engineering,  
Shrif University of Technology

### Abstract

*In this work, the effects of manufacturing parameters on the microstructure and densification of iron powders processed by direct laser sintering were investigated. A specific energy parameter "E", which expresses the energy input per volume of the sintered layer, was defined and used to evaluate the impact of the parameters on the densification and the attendant microstructural features. The results show that the sintered density is an exponential function of the defined specific energy. With increasing the energy input up to  $0.2 \text{ kJ/mm}^3$ , the densification rate is relatively high. Here, the microstructure consists of big pores (5-1mm) and elongated ferrite grains. The densification rate will be decreased if the energy input exceeds  $0.2 \text{ kJ/mm}^3$ . With intensifying the energy over  $0.8 \text{ kJ/mm}^3$ , the formation of horizontally oriented cracks is likely to occur while the density remains almost constant.*

### Keywords

*Direct Metal Laser Sintering, Densification Mechanism, Microstructure, Iron.*

## مقدمه

در سالهای اخیر نیاز به طراحی و ساخت قطعات صنعتی در زمان کوتاهتر و با هزینه کمتر توسعه فرآیندهای متعدد نمونه‌سازی سریع (Rapid Prototyping) را موجب شده است [۱]. فناوری تف جوشی لیزری پودر مواد از جمله معدود روشهایی است که امکان تولید سریع قطعات مختلف حتی با اشکال هندسی بسیار پیچیده را فراهم می‌کند [۲]. این روش برای مواد مختلفی همچون پلیمرها، سرامیک‌ها و فلزات قابل استفاده است و از انعطاف‌پذیری زیادی برخوردار می‌باشد. در این فرآیند نور لیزر بر بستری از پودر مواد تابیده شده تا توسط مکانیزم‌های ذوب یا تف جوشی در فاز مایع ذرات بهم متصل شوند. از آنجا که هدایت اشعه لیزر توسط یک سیستم CAD/CAM انجام می‌شود قابلیت ساخت قطعاتی با شکلهای بسیار پیچیده بدون نیاز به مراحل مختلف تولید وجود دارد [۳].

با این وجود، عوامل متعددی بر سرعت تف جوشی، مکانیزم اتصال ذرات و ریزساختار حاصل از فرآوری پودر مواد با انرژی لیزر اثر دارند. توان لیزر (P)، سرعت حرکت نور بر سطح (V)، قطر مؤثر اشعه (D)، فاصله بین خطوط جاروب لیزر (H) و ضخامت لایه پودر (W) از جمله مهمترین این عوامل محسوب می‌شوند. از طرف دیگر، مشخصات پودر ماده مورد استفاده مانند شکل، اندازه، ابعاد و توزیع ذرات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در نتیجه بدلیل تعدد عوامل مؤثر، پیچیدگی فرآیند، سرعت بسیار زیاد تف جوشی (کمتر از ۴ هزارم ثانیه) و طبیعت اشعه لیزر هنوز مکانیزم چگالش در این فرآیند بخوبی شناخته نشده است [۴-۶]. در این مقاله، مکانیزم تف جوشی و اثر شرایط تولید بر سرعت چگالش پودر آهن به عنوان ماده مدل تجزیه و تحلیل می‌شود. با این وجود، نتایج حاصل کلیت داشته و می‌توانند برای سایر مواد فلزی نیز بسط داده شوند.

## روش تحقیق

نمودار تصویری دستگاه تف جوشی مستقیم مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. این دستگاه شامل دو عدد لیزر CO<sub>2</sub> با نور پیوسته و قدرتی کل اسمی ۲۵۰ وات، عدسی‌های متمرکز کننده، سیستم بارگیری پودر و رایانه کنترل کننده است. به منظور ساخت یک قطعه در ابتدا فایل 3D-CAD آن تهیه می‌شود. سپس اطلاعات توسط نرم افزار دستگاه به صورت فایل استریولیتوگرافی<sup>۱</sup> (STL) تبدیل و در نهایت سطوح قطعه به لایه‌های نازکی در می‌آیند. فرآیند ساخت با پخش یک لایه نازک از پودر ماده بر سطح سکوی دستگاه توسط یک جاروبک شروع می‌شود. سپس نور لیزر مطابق فایل STL بر بستر پودر تابیده می‌شود تا عملیات تف جوشی و اتصال ذرات صورت گیرد. پس از تکمیل یک لایه، سکوی دستگاه یک گام (معادل ضخامت یک لایه فایل STL) به پایین رفته و محفظه بارگیر پودر یک گام به بالا حرکت می‌کند. عملیات پخش و لایه گذاری ماده توسط جاروبک تکرار شده و تابش نور لیزر علاوه بر تف جوشی ذرات پودر در لایه جدید، اتصال لایه‌ها بهم را نیز موجب می‌شود. با تکرار این عملیات محصول بصورت لایه به لایه ساخته خواهد شد. در این تحقیق به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی توسط نرم افزار Pro/Engineer قطعه مکعب مستطیل شکلی به ابعاد ۱۰×۱۰×۷ mm طراحی و نقشه کشی شد. سپس توسط رایانه کنترل کننده دستگاه، اطلاعات سطوح به صورت فایل STL تبدیل و داده‌های حاصل به لایه‌های نازکی به ضخامت ۰/۲-۰/۵ mm در آمدند. شکل (۲) روش ساخت قطعه و تعریف عوامل تولید را بصورت تصویری نشان می‌دهد.

پودر آهن مورد تحقیق از نوع افشان شده آبی بود که از شرکت هوگنس<sup>۲</sup> سوئد تهیه شد. محتوای اکسیژن این پودر ۰/۰۶۱ درصد وزنی می‌باشد. مشخصات عمومی ذرات ماده مورد استفاده بر اساس استاندارد MPFI آمریکا [۷] اندازه‌گیری و در جدول (۱) خلاصه شده است. این پودر در جایگاه مخصوص دستگاه بارگیری شد و نمونه‌های آزمایشگاهی بر طبق فایل STL ساخته شدند. سپس قطعات از سطح پایه دستگاه جدا و وزن مخصوص آنها اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است که هر آزمایش حداقل دو بار تکرار و نتایج بر اساس محاسبه آماری مقدار میانگین گزارش شده است. مقدار انحراف معیار ۰/۰۵ g/cm<sup>۳</sup> می‌باشد. سطح قطعات تف جوشی شده توسط میکروسکوپ SEM از نوع LEO 438VP مطالعه شد. نمونه‌های متالوگرافی

1- Stereolithography

2- Hoeganaes

به روش استاندارد آماده و خوراندن انتخابی سطح توسط محلول نایتال ۲ درصد (۲ میلی لیتر اسید نیتریک در ۱۰۰ میلی لیتر الکل) انجام شد.

## نتایج

شکل (۳) اثر پارامترهای تولید بر وزن مخصوص پودر آهن تف جوشی شده توسط لیزر را نشان می‌دهد. در یک توان ثابت ( $P = 125 \text{ W}$ ) افزایش سرعت حرکت نور بر سطح ( $V$ ) و یا زیاد نمودن فاصله بین خطوط جاروب لیزر ( $H$ ) کاهش چگالی را موجب می‌شود (شکل ۳-الف). از طرف دیگر، هنگامیکه فاصله بین خطوط جاروب لیزر ثابت نگه داشته می‌شود ( $H = 0.3 \text{ mm}$ ) ازدیاد توان لیزر و یا کاهش سرعت حرکت نور چگالی را زیاد می‌کند (شکل ۳-ب). چنانچه از شکل (۳-ج) نیز دریافت می‌شود افزایش ضخامت لایه پودر ( $W$ ) اثر کاهنده بر چگالی دارد. از مجموع این نتایج می‌توان استنباط نمود که با ازدیاد مقدار انرژی ورودی چگالی آهن تف جوشی شده فزونی می‌یابد. بعلاوه، از آنجا که زمان توقف اشعه لیزر بر ذرات پودر با سرعت حرکت آن نسبت عکس دارد بنابراین، با کاهش  $V$  زمان تف جوشی زیاد شده و در نتیجه چگالش بیشتری حاصل می‌شود. ضمناً، اگرچه افزایش ضخامت لایه پودر سرعت تولید را فزونی می‌دهد ولی تقلیل وزن مخصوص نهایی را نیز موجب می‌شود.

برای مطالعه اثر عوامل مختلف بر چگالش و بهینه سازی شرایط تولید می‌توان از اصل بقای انرژی استفاده نمود. مقدار کل انرژی مصرف در واحد حجم یک المان تحت تابش قرار گرفته شده (شکل ۲) توسط معادله زیر قابل محاسبه است:

$$E = \frac{P}{V \cdot H \cdot W} \text{ kJ/mm}^3 \quad (1)$$

$P$ : توان اشعه لیزر ( $W$ )

$H$ : فاصله بین خطوط جاروب لیزر ( $mm$ )

$V$ : سرعت حرکت اشعه ( $mm/s$ )

$W$ : ضخامت لایه پودر ( $mm$ )

شکل (۴) نمونه‌ای از وابستگی چگالی نمونه‌های آهن مورد مطالعه به "E" یا انرژی مخصوص را نشان می‌دهد. وزن مخصوص ضربه‌ای پودر آهن و همچنین پودر تف جوشی شده در دمای  $1300^\circ C$  به مدت ۲ ساعت در محیط هیدروژن نیز برای مقایسه آورده شده است. با توجه به پراکندگی نسبتاً کم داده‌های شکل چنین برداشت می‌شود که اگرچه شرایط تف جوشی بسیار متنوع بوده است ( $70 < P < 215$  وات،  $150 < V < 50$  میلی‌متر بر ثانیه،  $0.20 < W < 0.05$  میلی‌متر،  $0.1 < H < 0.4$  میلی‌متر) ولی با تعریف انرژی مخصوص بر اساس معادله (۱) می‌توان اثر شرایط تولید بر چگالی را توسط یک پارامتر واحد ( $E$ ) مطالعه نمود. به هر جهت این شکل نشان می‌دهد که نرخ چگالش نسبت به انرژی مخصوص وابستگی نمایی دارد. بدین معنی که با افزایش انرژی مخصوص تا  $0.2 \text{ kJ/mm}^3$  مقدار ازدیاد چگالی یا نرخ چگالش بسیار زیاد بوده ولی در انرژی مخصوص بیشتر از نمو نمودار کاسته می‌شود.

چگونگی انرژی این پارامتر بر ریزساختار نمونه‌های آهنی مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است. در ابتدای منحنی چگالش (ناحیه A در شکل ۴) ریزساختار از شبکه بهم پیوسته حفره‌های بزرگ تشکیل شده است که در بین آنها ذرات پودر به صورت پلهایی بهم متصل شده‌اند. با افزایش انرژی ورودی (ناحیه B در شکل ۴) از پیوستگی حفره‌ها کاسته شده و ابعاد آنها نیز ریزتر می‌شود. این روند تا حد صاف شدن منحنی انرژی مخصوص - چگالش (ناحیه C) ادامه می‌یابد. بعلاوه، با توجه به ریزساختار متالوگرافی می‌توان دریافت که تخلخل‌های داخلی به صورت ستونی و همراستا با جهت ساخت کشیده شده‌اند. اما، اگر انرژی مخصوص در ناحیه D یا بیشتر از آن قرار داشته باشد، حفره‌های در راستای حرکت منبع انرژی کشیده خواهند شد. تحت این شرایط تغییر چگالش ناچیز است.

نمونه‌ای از ریزساختار فلزی در شکل (۶) نشان داده شده است. چنانچه از شکل بر می‌آید دانه‌های فریت هم جهت با راستای ساخت و در جهت مخالف انتقال حرارت (شکل ۲) کشیده شده‌اند. البته باید توجه داشت که اندازه این دانه‌های تابعی از سرعت سرد شدن قطعه است. این سرعت به نوبه خود توسط شرایط تولید مشخص می‌شود. معمولاً با افزایش سرعت حرکت نور بر بستر پودر، سرعت سرد شدن فزونی می‌یابد و بنابراین انتظار می‌رود اندازه دانه‌ها کوچکتر شوند [۸].

## بحث

در فرآیند تف جوشی لیزری چرخه حرارتی بسیار سریعی بر ذرات پودر اعمال می‌شود. برای نمونه، اگر سرعت حرکت منبع  $100 \text{ mm/s}$  و قطر مؤثر اشعه  $0.4 \text{ mm}$  باشد مدت زمان اثر لیزر بر هر ذره در حدود ۲ هزارم ثانیه است. تحت این شرایط اتصال ذرات پودر توسط مکانیزم نفوذ در جامدات غیرممکن خواهد بود. از طرف دیگر، مکانیزم های جریان گرانی نیز نمی‌تواند چگالش ماده را موجب شود زیرا گرانی فلزات حتی در حوالی دمای ذوب بسیار زیاد است. بنابراین در این فرآیند ذوب و انجماد (کامل یا جزئی) تنها مسیر قابل قبول برای چگالش پودر مواد خواهد بود [۹]. بر اساس این مکانیزم، تحت اثر انرژی لیزر فاز مایعی بوجود می‌آید که سیلان آن متأثر از کشش سطحی و گرانی مذاب است. با تشکیل فاز مایع و در اثر نیروی موئینگی اتصال ذرات بهم و در نتیجه چگالش حاصل می‌شود. اگر پودر فلز مورد استفاده خالص باشد به دلیل دمای ذوب واحد (عدم وجود منطقه خمیری) چگالش ماده تنها در اثر ذوب کامل ذرات پودر صورت خواهد گرفت. البته امکان دارد ذوب سطحی ذرات درشت نیز اتصال موضعی را موجب شود. ولی اگر پودر مصرفی از نوع پر آلیاژ و دامنه برد انجماد آن وسیع باشد، ممکن است دمای منطقه تحت اثر لیزر در محدوده خمیری قرار گیرد و در نتیجه پودر فلز بر اساس مکانیزم تف جوشی در فاز جامد و مایع<sup>۲</sup> چگال شود. این مکانیزم در تف جوشی لیزری پودرهای فولاد تندبر بخوبی مطالعه شده است [۱۰ و ۱۱]. در اینجا باید توجه داشت که در ذوب منطقه ای ذرات پودر، جریان سیال به شدت تحت تأثیر انرژی سطحی و گرانی و مذاب قرار دارد. نمونه ای از این اثر برای پودر آهن در شکل (۷) نشان داده شده است. در این آزمایش انرژی لیزر با توان  $W$  ۲۱۵ و سرعت  $75 \text{ mm/s}$  بر بستر پودر تابیده شده است. چنانچه از شکل بر می‌آید پس از عملیات، گلوله های آهنی هم اندازه با قطر مؤثر اشعه تشکیل شده اند. بعلاوه، پودرهای اطراف ناحیه مرکزی تحت تأثیر انرژی بهم چسبیده اند. علت این پدیده را می‌توان به توزیع دما در منطقه بسیار کوچک اطراف منبع انرژی ربط داد. در هنگام ذوب منطقه ای مواد توسط لیزر گرادپانهای دمایی بسیار شدیدی ایجاد می‌شود که وابسته به توزیع انرژی در اشعه نور است [۱۲]. شکل (۸) نمونه از این تغییرات را برای پودر آهن که توسط شبیه سازی کامپیوتری [۱۳] محاسبه شده است را نشان می‌دهد. چنانچه از شکل بر می‌آید تفاوت دما در محدوده ای کمتر از  $0.4 \text{ mm}$  بیشتر از  $1000^\circ \text{C}$  می‌باشد. این گرادپانها جریان سیال و انتقال جرم در حوضچه مذاب را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. بعبارت دیگر، بدلیل وابستگی زیاد کشش سطحی مذاب فلزات به دما، تنشهای برشی بزرگی در حوضچه مذاب بوجود می‌آیند که جریان سیال را کنترل خواهند نمود [۱۴]. بنابراین حرکت مذاب و انتقال جرم به مقدار قابل توجهی توسط چگونگی تغییر انرژی سطح با دما تعیین می‌شود. این پدیده که به اثر Marangoni معروف است [۱۵] در فرآوری مواد با لیزر نقش بسیار بزرگی دارد بطوریکه می‌تواند باعث ناپایداری حوضچه فلز شود و با شکستن ستون مذاب به گلوله‌های فلز، تقلیل انرژی سطح را تسریع نماید. چگونگی اثر این پدیده بخوبی از شکل (۷) قابل دریافت است.

شکل (۹) تصویر SEM سطح فوقانی پودر آهن تف جوشی را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان چنین استنباط نمود که پودر فلز در ستونهایی ذوب شده و در جهت حرکت اشعه لیزر به صورت استوانه‌ای کشیده شده‌اند. از طرف دیگر، چنانچه در بالا نیز بحث شد، اثر انرژی سطحی و گرانی مذاب به نحوی است که انرژی سیستم کمینه شود. لذا، حوضچه مذاب ناپایدار شده و در جهت کاهش انرژی سطحی عمل می‌کند. نتیجه حاصل تشکیل حفره‌های ردیفی است که در مقطع متالوگرافی (شکل ۵) نیز مشاهده شد. ضمناً، انجماد جهت دار مذاب تشکیل دانه‌های کشیده شده را موجب می‌شود (شکل ۶). شایان

### 1- Viscous Flow

### ۲- Supersolidous Liquid Phase Sintering

ذکر است که شکل و اندازه تخلخل‌های داخلی به شرایط تولید بستگی زیادی دارد اما اثر فاصله بین خطوط جاروب لیزر (H) قابل ملاحظه‌تر است. با کاهش این فاصله، چگالش زیاد شده و حفره‌های لایه‌ای شکسته می‌شوند (شکل ۹). علت این پدیده را به اثر H بر اندازه حوضچه مذاب و ناپایداری آن نسبت می‌دهند [۱۵ و ۱۶]. با کاهش فاصله بین خطوط جاروب لیزر مقدار انرژی ورودی زیاد شده و حجم حوضچه مذاب و دمای آن فزونی خواهد یافت. در نتیجه ستون مذاب شکل گرفته تحت حرکت اشعه لیزر به زمان بیشتری برای شکستن و آلگومره شدن نیاز دارد. بنابراین از یک طرف سیلان مذاب فلز بدلیل دمای بیشتر تسهیل شده و از طرف دیگر ناپایداری آن به تعویق می‌افتد. نتیجه حاصل کاهش حفره‌های داخلی خواهد بود. با این وجود باید توجه داشت که تمرکز بیش از حد انرژی لیزر، تنشهای حرارتی بزرگی در قطعه بوجود می‌آورد. اگر میزان این تنشها از استحکام قطعه فراتر رود ترکیب افقی بوجود می‌آیند (شکل ۱۰) که به نوبه خود تقلیل وزن مخصوص نهایی را بدنبال خواهند داشت.

## نتیجه گیری

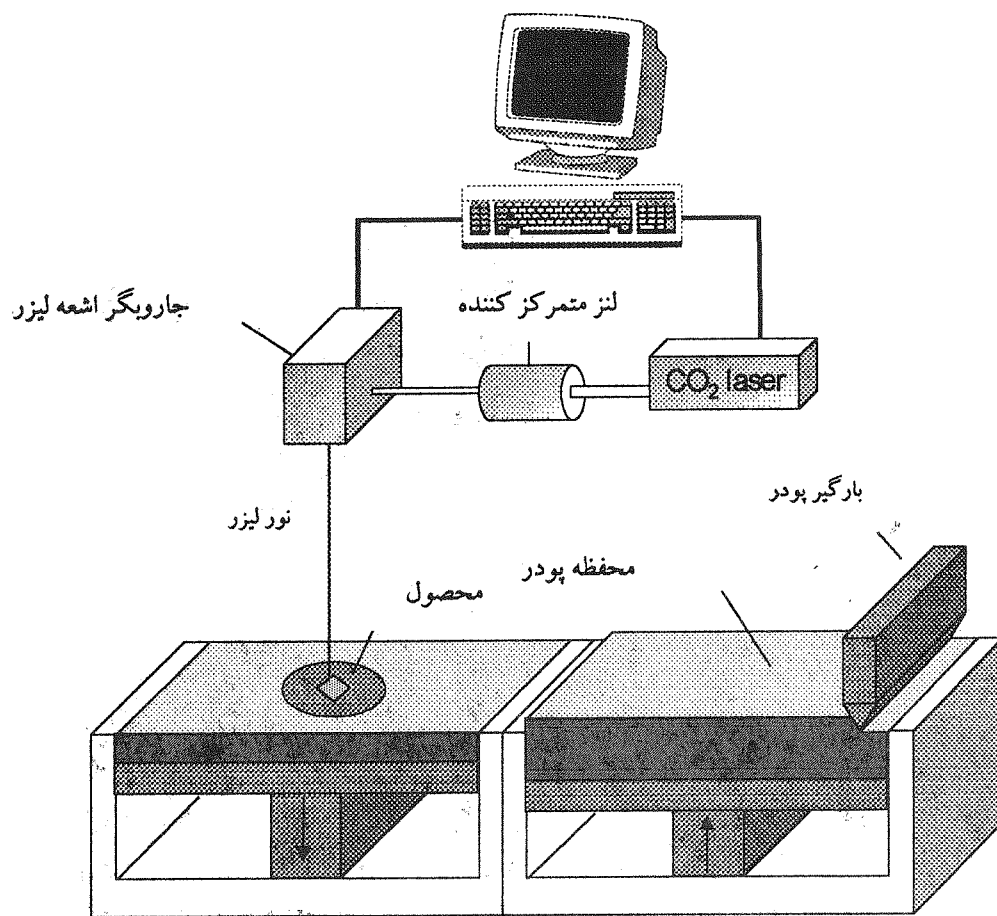
چگالش پودر فلزات تحت اثر انرژی لیزر توسط ذوب کامل یا جزئی ذرات پودر انجام می‌شود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که تف جوشی لیزری فرآیندی وابسته به حرارت باشد که مقدار انرژی ورودی، سرعت چگالش و ریزساختار حاصل را کنترل کند. در این پژوهش به منظور مطالعه اثر عوامل مؤثر پارامتری تحت عنوان "انرژی مخصوص" تعریف شد که توسط آن می‌توان نرخ چگالش را با سهولت بیشتری بررسی نمود. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهند که منحنی چگالی - انرژی مخصوص به صورت نمایی است. با افزایش انرژی ورودی پیوستگی بین ذرات بیشتر شده و محتوای حفره‌ها کاهش می‌یابند. دانه‌های فلز نیز به صورت ریز و کشیده شده در راستای ساخت شکل می‌گیرند. با این وجود، اگر انرژی اعمال شده بیش از حد باشد، در اثر انجماد سریع تنشهای حرارتی بزرگی در قطعه بوجود می‌آیند که شکست بین لایه‌ای را موجب می‌شوند. از طرف دیگر، بدلیل مصرف انرژی بیشتر دمای حوضچه مذاب فزونی یافته و سیلان فلز تسهیل می‌شود. اگر این تمرکز با کاهش فاصله بین خطوط جاروب لیزر همراه باشد ناپایداری حوضچه مذاب فلز کم شده و در نتیجه حفره‌های داخلی از بین می‌روند. توازن این دو عامل متضاد عدم تغییر چگالش با افزایش انرژی مصرفی را موجب می‌شود. انرژی مخصوص در حدود  $3 \text{ kJ/mm}^3$  به عنوان حد بهینه لازم برای تف جوشی پودر آهن مورد مطالعه تعیین شد.

## تشکر و قدردانی

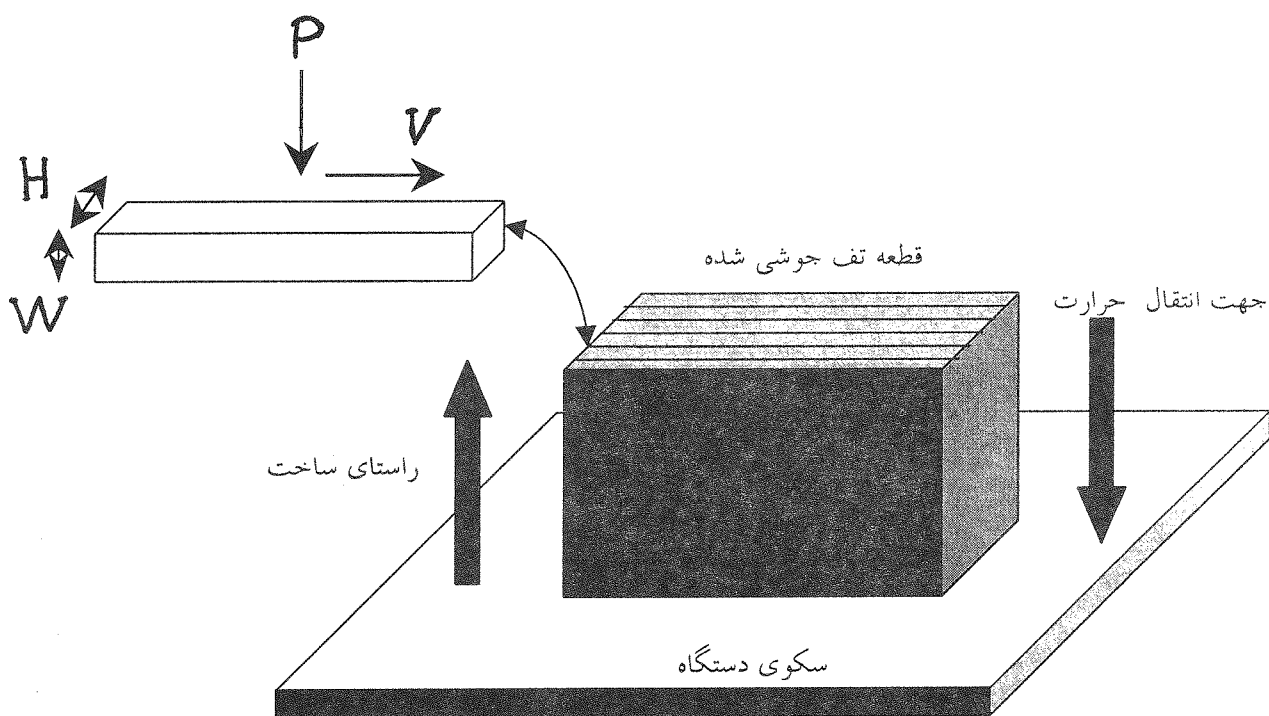
از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف بخاط حمایت مالی از تحقیق تشکر می‌شود. ضمناً از سرکار خانم میترا خوی‌وندی که زحمت تایپ مقاله را متقبل شدند، سپاسگزاری می‌شود.

جدول (۱) مشخصات پودر آهن مورد استفاده در این پژوهش که بر اساس استاندارد MPFI اندازه گیری شده است.

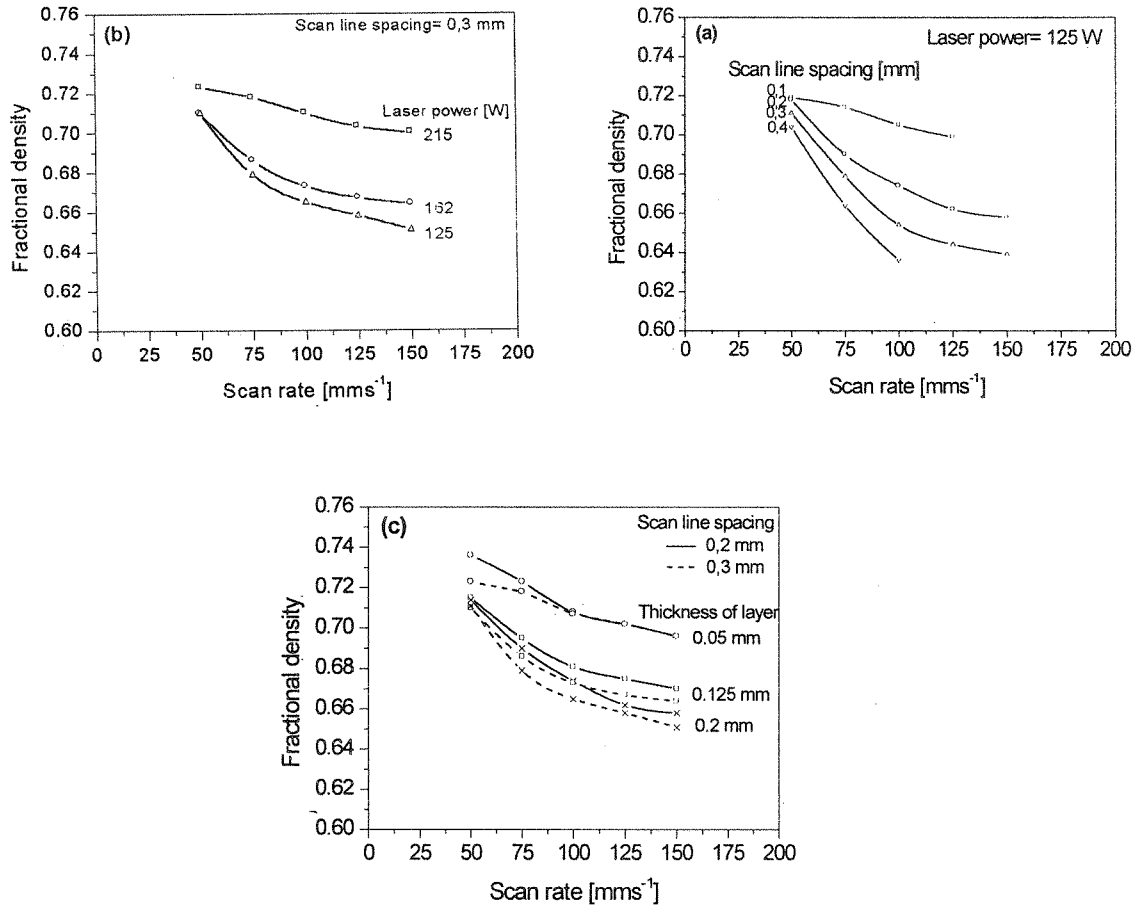
| مساحت سطحی<br>$\text{m}^2/\text{g}$ | $D_{90}$<br>$\mu\text{m}$ | $D_{50}$<br>$\mu\text{m}$ | $D_{10}$<br>$\mu\text{m}$ | وزن مخصوص<br>ضربه ای $\text{g/cm}^3$ | وزن مخصوص<br>ظاهری $\text{g/cm}^3$ |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| ۰/۲۸۸۶                              | ۷۴/۲                      | ۵۰/۶                      | ۳/۰۳                      | ۳/۷                                  | ۳/۱۲                               |



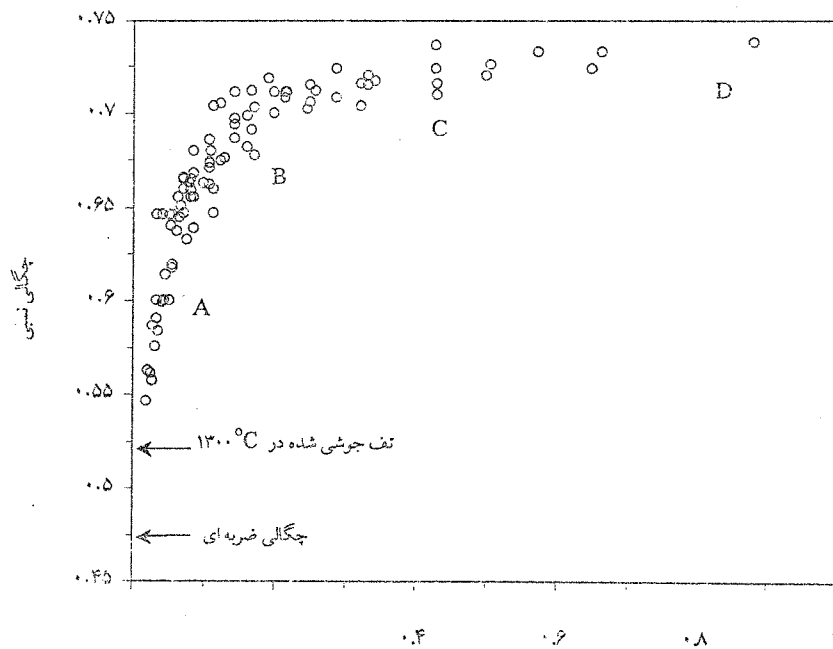
شکل (۱) نمودار تصویری دستگاه تف جوشی مستقیم استفاده شده در پژوهش.



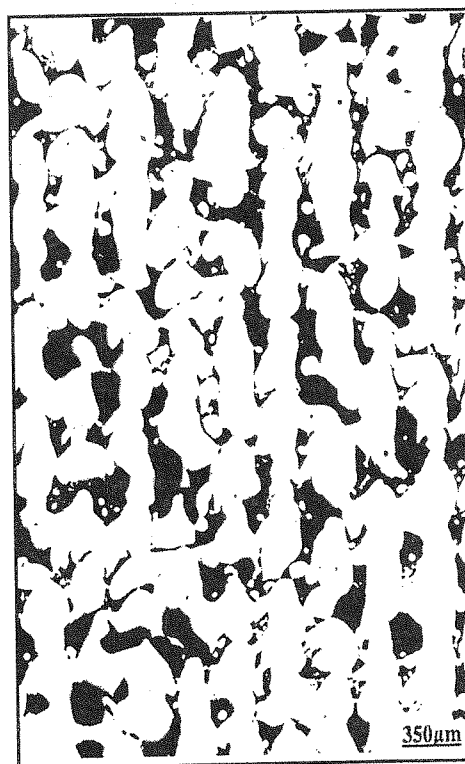
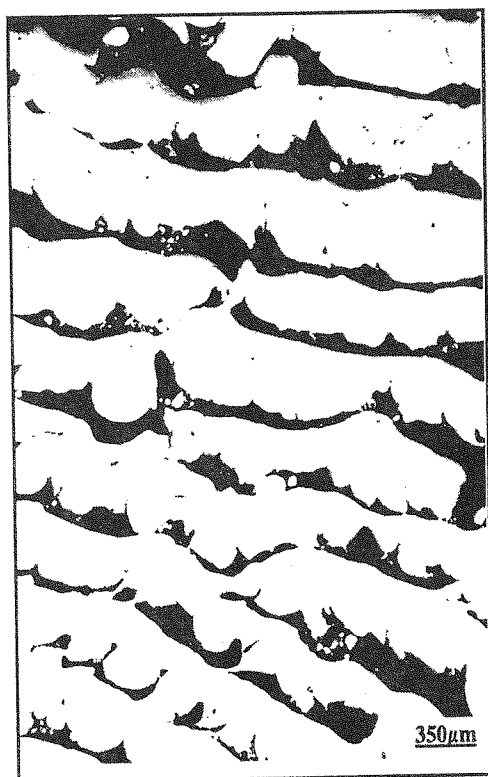
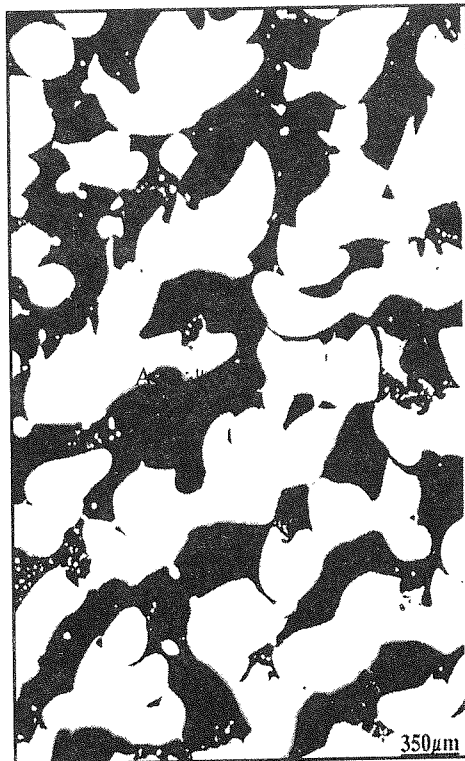
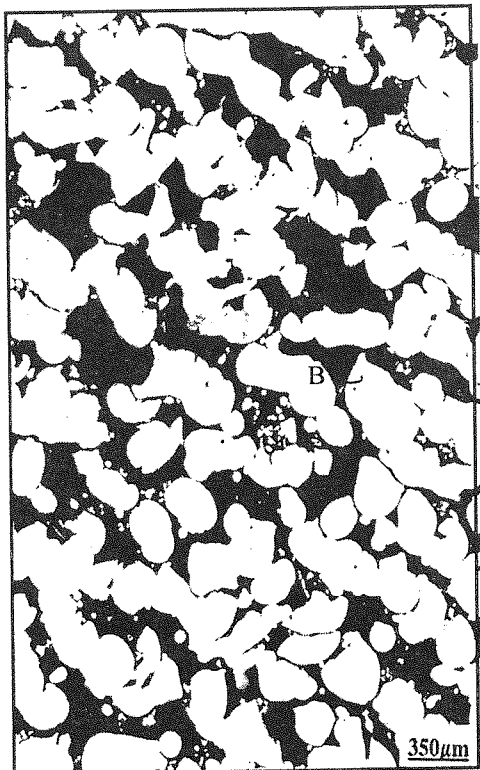
شکل (۲) نمودار تصویری روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و تعریف عوامل موثر بر چگالش.



شکل (۳) اثر پارامترهای تولید بر وزن مخصوص پودر آهن مورد مطالعه.  
 الف) فاصله بین خطوط جاروب لیزر ( $W = 0.105 \text{ mm}$  و  $H = 0.13W$ ) ب) توان لیزر ( $W = 0.105 \text{ mm}$  و  $H = 0.13W$ )  
 ج) ضخامت لایه پودر و فاصله بین خطوط جاروب لیزر ( $P = 215W$ )



شکل (۴) چگالی نسبی پودر آهن تف جوشی شده توسط لیزر بر حسب انرژی مخصوص (E).



D-د

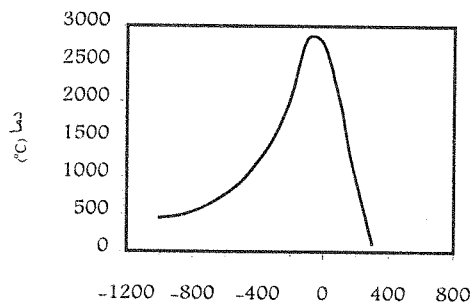
C-ج

راستای ساخت

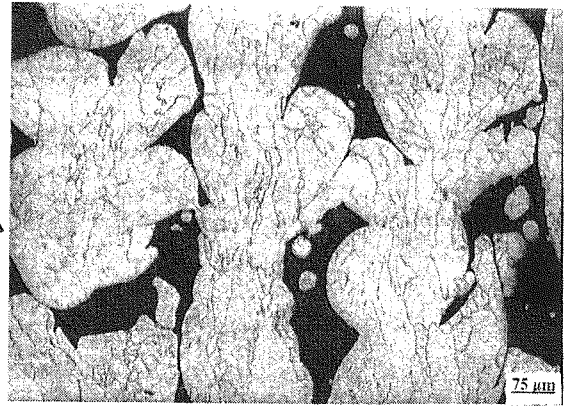
شکل (۵) نمونه هایی از ریز ساختار حفره های حاصل از تف جوشی مستقیم بودر آهن توسط انرژی لیزر

امیر کبیر / سال چهاردهم / شماره ب - ۵۵ / (مهندسی مکانیک) تابستان ۱۳۸۲





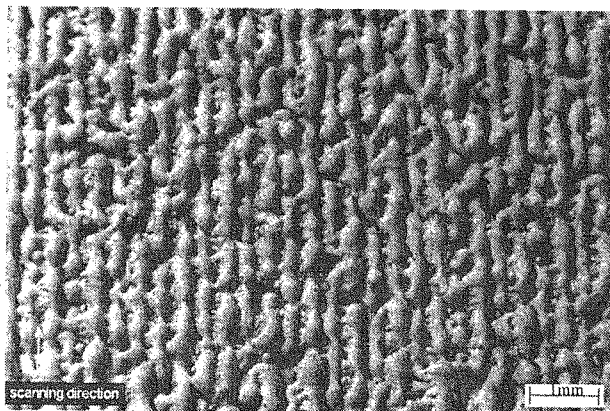
فاصله از مرکز اشعه لیزر (میکرومتر)



راستای ساخت

شکل (۸) شبیه سازی توزیع دما در سطح پودر آهن تحت اثر انرژی لیزر (توان ۲۰۰ W و سرعت ۷۵ mm/s).

شکل (۶) دانه بندی پودر آهن تف جوشی شده توسط لیزر در انرژی مخصوص  $۰/۲۹ \text{ kJ/mm}^3$ .



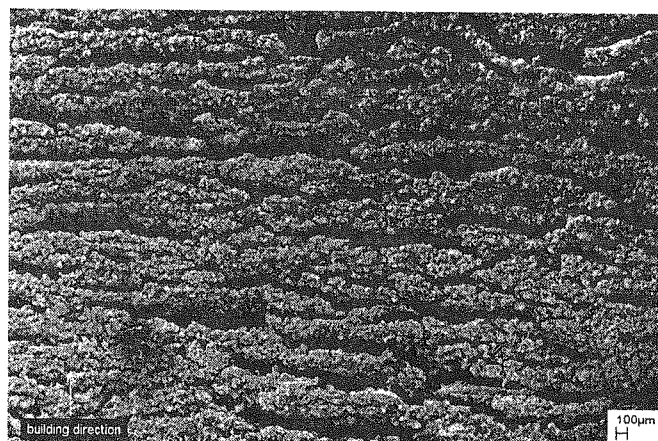
راستای حرکت نور لیزر

شکل (۹) تصویر SEM از سطح فوقانی آهن تف جوشی شده توسط لیزر در انرژی مخصوص  $۰/۲۹ \text{ kJ/mm}^3$ .



راستای حرکت نور لیزر

شکل (۷) اثر کشش سطحی و گرانیوی مذاب بر تف جوشی پودر آهن در توان لیزر ۲۱۵ W و سرعت حرکت اشعه  $۷۵ \text{ mm/s}$ .



راستای ساخت

شکل (۱۰) تصویر SEM از سطح جانبی آهن تفجوشی شده توسط لیزر در انرژی مخصوص  $۰/۸۶ \text{ kJ/mm}^3$ .

- [1] Wohlers, T., Wohlers Report, Wohlers Associates, Inc., 2001, Colorado, USA.
- [2] Petzoldt, F., Greul, M., "Functional Components and Molds Produced by Laser Sintering", *Advances in Powder Metallurgy and Particular Materials*, MPIF, Vol. 3, Part 21, 1997, pp. 61-66.
- [3] Kai, C.C. Fai, L.K., "Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing, John Wiley & Sons, Inc., 1997, Jin Xing Distripark, Singapore.
- [4] Dalgarno, K.W., Wright, C.S., "Approaches to Processing Metals and Ceramics through the Laser Scanning of Powder Beds-A Review", *Powder Metallurgy Progress*, Vol. 1, No. 1, 2001, pp. 70-79.
- [5] Simchi, A., Petzoldt, F., Pohl, H., "Direct Laser Sintering: Material Considerations and Mechanisms of Particle Bonding", *Int. J. Powder Metall*, Vol. 37, No. 2, 2001, pp. 46-61.
- [6] Lewis, G., Schleoinger, E., "Practical Consideration and Capabilities for Laser Assisted Direct Metal Deposition", *Materials and Design*, Vol. 21, 2000, pp. 417-423.
- [7] *Standart Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products*, MPIF, 1986, N.J., USA.
- [8] Mohanty, P.S., Mazumder, J., "Solidification Behavior and Microstructural Evolution during Laser Beam – Material Interaction", *Metall. and Mat. Trans.*, Vol. 29B, 1998, pp. 1269-1279.
- [9] Bourell, D.L., Marcus, H.L., Barlow, J.W., Beaman, J.J., "Selective Laser Sintering of Metals and Ceramics", *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 28, No. 4, 1992, pp. 269-381.
- [10] Niu, H.J., chang, T.H., "Selective Laser Sintering of Gas and Water Atomized High Speed Steel powders", *Scripta Materialia*, Vol. 39, No. 1, 1999, pp. 25-30.
- [11] Niu, H.J., Chary, T.H., "Liquid Phase Sintering of M 3/2 High Speed Steel by Selective Laser Sintering", *Scripta Materialia*, Vol. 41, No. 1, 1998, pp. 67-72.
- [12] Pawlowski, L., "Thick Laser Coating: A Review", *J. Thermal Spray Technology*, Vol. 8, No. 2, 1999, pp. 279-295.
- [۱۳] عبدالرضا سیم چی، " مکانیزم چگالش در تف جوشی پودرهای آهنی با انرژی لیزر"، پنجمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالورژی ایران، ۱۴-۱۶ آبان ماه ۱۳۸۰، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۸۵۳-۸۶۳.
- [14] Pantelis, D.I., Pantazopoulos, G., *Laser in Surface Engineering*, Complied by N. B. Dahorte, ASM International, Materials Park, OH, 1998, pp. 357-394.
- [15] Das, S., "On Some Physical Aspects of Control in Direct Selective Laser Sintering of Metals – Part III", *Solid Freeform Fabrication Symposium*, University of Texas, Austin, 2001, pp. 102-109.
- [16] Niu, H.J., Chary, T.H., "Instbility of Scan Tracks of Selective Laser Sintering of High Speed Steel Powder", *Scripta Materialia*, Vol. 41, No. 1, 1999, 1229-1234.