



تأثیر جهتگیری ساخت و اندازه در میزان نقص قطعات فولادی زنگ‌زن L۳۱۶ ساخته‌شده با فرآیند ذوب انتخابی لیزر

محمد رنجبرکهن^۱، امجد سازگار*^۲، علی پورکمالی انارکی^۱

۱- دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸

کلمات کلیدی:

ذوب انتخابی لیزر
فولاد L۳۱۶
جهت و اندازه ساخت
نقص و تخلخل

خلاصه: انتخاب صحیح و بهینه پارامترهای فرآیند ذوب انتخابی لیزر از ایجاد نقص‌هایی چون تخلخل، سوراخ‌های همجوشی ناقص و ترک‌ها در فرآیند ساخت قطعات جلوگیری می‌کند. با وجود تمام مزایای روش فرآیند ذوب انتخابی لیزر، نقص‌های ایجادشده به‌طور مستقیم بر خواص مکانیکی و مقاومت به خستگی قطعات تأثیر منفی می‌گذارد. در این پژوهش، اثر زوایای ساخت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه و اثر تغییر اندازه قطعات بر خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی و برشی، کرنش شکست و میزان نقص‌ها بررسی شد. قطعات ساخته‌شده تحت آزمون‌های کشش و برش قرار گرفته و محل شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی و نقص‌های موجود شناسایی شد. نتایج آزمون کشش نشان داد نمونه‌های بزرگتر دارای استحکام کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های کوچکتر هستند. همچنین، استحکام کششی بیشتر و کرنش شکست کمتر در نمونه‌های ساخته‌شده در جهت صفر درجه مشاهده شد. نتایج آزمون برش نیز نشان داد استحکام برشی برای نمونه‌های کوچک و بزرگ ساخته‌شده در همه جهات تقریباً یکسان است و بیشترین کرنش برشی شکست مربوط به نمونه‌های ۴۵ درجه مستقل از ابعاد می‌باشد. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان داد که میزان و توزیع حفره‌های کروی و شکاف‌های همجوشی ناقص در نمونه‌های بزرگ ساخته‌شده ۹۰ درجه بیشتر از نمونه‌های ساخته‌شده در جهت‌های دیگر است.

۱- مقدمه

یکی از فرآیندهای پیشرو در ساخت افزایشی، روش ذوب انتخابی لیزر^۱ است که با تابش پرتو لیزر از یک منبع لیزر پرتوان روی لایه‌های پودر فلز، آن را ذوب کرده و موجب هم‌جوشی دانه‌های پودری می‌شود. از پارامترهای تأثیرگذار این فرآیند می‌توان به توان لیزر، سرعت اسکن، ضخامت لایه پودری، دما، فاصله بین خطوط اسکن و نوع پودر مورد استفاده اشاره کرد. از مزایای این روش می‌توان ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده، زمان کم تولید، امکان تولید چند قطعه به‌طور هم‌زمان، بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی و ساخت مواد با چگالی بالا را نام برد.

دنگ و همکاران^۲، تأثیر اندازه سازه بر ریزساختار، نقص هندسی و خواص مکانیکی را با انجام آزمایش‌های تجربی بررسی کردند. آزمون کشش تک‌محوری روی نمونه‌های میله‌ای آلومینیومی سری Mg₁₀AlSi با

قطرهای مختلف ساخته‌شده به روش ذوب انتخابی لیزر نشان داد که با کاهش قطر سازه، استحکام و مدول یانگ ۳۰٪ بیشتر از حالت پایدار کاهش می‌یابد؛ همچنین، آنها دریافتند که با افزایش اندازه نمونه از قطر ۱ میلی‌متر به ۵ میلی‌متر سطح تخلخل از ۱/۸۷٪ به ۰/۱٪ کاهش می‌یابد [۱].

هارچونیان و همکاران^۳ تأثیر جهت‌های متفاوت ساخت قطعات V۴Al۶Ti- با فرآیند ذوب انتخابی لیزر را روی خواص مکانیکی و ریزساختار آن مطالعه کردند. آنها دریافتند که نمونه ساخته‌شده در جهت Z، ضعیف‌ترین استحکام کششی را در مقایسه با سایر جهت‌ها دارد. نمونه‌های ساخته‌شده در جهت‌های X و Y، مشخصه شکست ترد را در نواحی نزدیک ماده و مشخصه شکست نرم را در نواحی دورتر از آن نشان دادند. همچنین، ادعان داشتند عیب‌ها شامل حفره‌ها، ترک‌ها، پودرهای ذوب‌نشده یا نیمه ذوب‌شده موجب کاهش استحکام کششی و خواص چقرمگی شکست می‌شوند [۲].

1 Selective Laser Melting (SLM)

2 Dong et al.

3 Hartunian et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Asazgar@aeoi.org.ir



استفاده از ابزار وایرکات^۵ قطعات از سینی دستگاه ذوب انتخابی لیزر جدا شده و در ادامه تحت آزمون‌های کشش و برش قرار گرفته و محل شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی گردید و نقص‌های موجود شناسایی شدند.

۲-۱- ساخت نمونه‌ها

در این فرآیند از پرتو لیزر به‌عنوان منبع انرژی برای ذوب لایه پودر فلزی استفاده می‌شود. این روش قادر به ساخت قطعات با هندسه‌های پیچیده، دقت بالا و چگالی بالا است [۵]. شکل ۱ دستگاه ذوب انتخابی لیزر مدل SLM ۵۰۰ را نشان می‌دهد. ضخامت لایه‌های ساخته‌شده توسط این فرآیند با داده‌های اولیه ورودی به دستگاه تعیین می‌شود. در این دستگاه، دو محفظه پودر وجود دارد که به تدریج با استفاده از یک غلتک پودر براساس داده‌های ورودی بالا می‌رود. سپس، با تابش پرتوی لیزر، پودر فلزی ذوب می‌شود و لایه‌ها به ترتیب ایجاد شده تا قطعه نهایی تکمیل شود [۶].

نمونه‌های کشش در اندازه‌های ۱۰۰×۱۰×۴ میلی‌متر (بزرگ) و ۵۰×۵×۲ میلی‌متر (کوچک) و نمونه‌های برش در اندازه‌های ۱۱۴×۳۸/۱×۶/۳۵ میلی‌متر (بزرگ) و ۵۷×۱۹/۰۵×۳/۱۷ میلی‌متر (کوچک) در سه جهت ساخت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه در نرم‌افزار سالیدورکس^۶ طراحی شدند، آنگاه نمونه‌ها با دستگاه ذوب انتخابی لیزر SLM ۵۰۰ با منبع لیزر نوری ۵۰۰ وات در صفحه‌ای به مساحت ۲۵×۲۵ سانتی‌متر مربع ساخته شدند. در شکل ۲ مدل طراحی‌شده به‌عنوان داده ورودی به دستگاه نشان داده شده است.

در این فرآیند از پودر فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ با اندازه ذرات ۱۵ تا ۵۳ میکرون استفاده شده است. در جدول ۱ پارامترهای دستگاه ذوب انتخابی لیزر مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. برای مقایسه دقیق‌تر نمونه‌ها در آزمون‌های کشش و برش، تمام نمونه‌ها با شرایط اولیه یکسان و بدون تغییر در پارامترها ساخته شدند.

ابتدا، پودر خام در یک کوره خلأ در فشار حدود ۰/۲ اتمسفر و دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت به منظور جلوگیری از همجوشی نامطلوب یا تغییر شکل‌های ناخواسته در فرآیند ذوب انتخابی قرار داده شد. در جدول ۲ ترکیب شیمیایی نمونه ساخته‌شده فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ نشان داده شده است.

پان و همکاران^۱ خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ را بررسی نمودند. مطالعات آنها نشان داد سرعت اسکن اگرچه تأثیر کمی بر مدول یانگ دارد؛ اما، تأثیر زیادی بر استحکام کششی، نقطه تسلیم، ازدیاد طول و زبری سطح دارد. آنها تأکید داشتند که با بهینه‌کردن پارامترهای فرآیند می‌توان از نقص‌ها شامل پیوندهای ضعیف متالورژیکی بین لایه‌ها، زبری سطح، عیوب داخلی (حفرات، وجود حباب و ...) و نیروهای اتمی ضعیف که منجر به ایجاد و گسترش ترک و کاهش خواص مکانیکی می‌شوند، جلوگیری به‌عمل آورد [۳].

راتگر و همکاران^۲ به بررسی خواص قطعات فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ ساخته‌شده به دو روش عمودی و افقی با دستگاه‌های مختلف ذوب انتخابی لیزر پرداختند. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی در راستای عمودی بسیار ضعیف‌تر از راستای افقی است. اما در کل، روش ذوب انتخابی لیزر نسبت به قطعه ریختگی مرجع آزمایش، موجب بهبود خواص مکانیکی شده است [۴]. مقاله حاضر، به بررسی خواص مکانیکی قطعات فلز فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ ساخته‌شده با استفاده از فرآیند ذوب انتخابی لیزر می‌پردازد. نمونه‌هایی در سه جهت ساخت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه با دو اندازه نمونه متفاوت بزرگ و کوچک ساخته شدند. سپس، آزمون کشش با استاندارد (۲۰۱۰) ASTM E ۸ و آزمون برش با روش استاندارد (۲۰۱۹) ASTM B ۸۳۱ روی نمونه‌ها انجام شد. پس از اجرای آزمون‌ها، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳، محل شکست و عمق محل برش در نمونه‌ها بررسی و نقص‌های موجود شناسایی و تحلیل شد. تأثیر مقدار حفره‌های کروی و حفره‌های عدم همجوشی^۴ در محل شکست نمونه‌های آزمون‌های کشش و برش بررسی شد. نتایج این مطالعه درک مناسبی از ارتباط بین جهت‌گیری‌ها و اندازه‌های مختلف با خواص مکانیکی قطعه ساخته‌شده با فرآیند ذوب انتخابی لیزر را نشان می‌دهد.

۲-۲ مواد و روش‌ها

در این مقاله اثر زوایای ساخت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه و اثر تغییر اندازه قطعات بر خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی و برشی، کرنش شکست و میزان نقص‌ها بررسی شد. در این پژوهش، برای ساخت قطعات با دستگاه ذوب انتخابی لیزر از پودر فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ استفاده شد. سپس، با

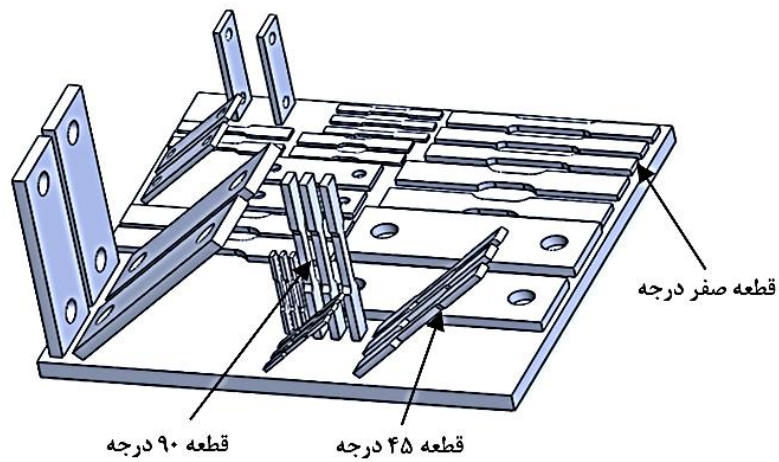
- 1 Pan Lu et al.
- 2 Röttger et al.
- 3 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 4 Fusion Gaps

5 Wire Electrical Discharge Machining
6 Solidworks Permium 2020



شکل ۱. نمایی از دستگاه SLM500 استفاده شده در این پژوهش.

Fig. 1. The SLM500 machine used in this research.



شکل ۲. مدل نمونه‌های فلزی برای ساخت در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه روی سینی دستگاه ذوب انتخابی لیزر.

Fig. 2. Metal samples model to be made in three directions of zero, 45, and 90 degrees on the bed of the selective laser melting machine.

جدول ۱. پارامترهای دستگاه ذوب انتخابی لیزر

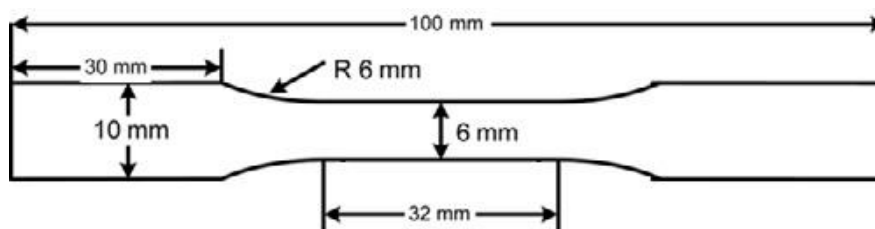
Table 1. Parameters of selective laser melting machine

عنوان	توضیحات
قطر دانه‌های پودر	۵۳-۱۵ میکرومتر
الگوی اسکن	نواری
دمای پیش‌گرم دستگاه	۶۰ درجه سانتی‌گراد
ضخامت لایه	۰/۰۳ میلی‌متر
فاصله خطوط اسکن	۱۲۰ میلی‌متر
سرعت	۸۰۰ میلی‌متر بر ثانیه
توان مورد استفاده	۲۵۵ وات

جدول ۲. درصد وزنی ترکیب شیمیایی نمونه ساخته شده فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L

Table 2. Weight percentage of the chemical composition in 316L stainless steel built sample

عنصر	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
نمونه ساخته شده ۳۱۶L	۰/۰۳	۱/۱۶	۰/۷۴	۱۷/۱۵	۱۱/۰۶	۲/۴۴	۰/۰۰۶	۰/۰۳



شکل ۳. نمونه آزمون کشش بزرگ مطابق استاندارد ASTM E8 (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر) [۷].

Fig. 2. Large tensile test sample according to ASTM E8 (dimensions in mm).

جهات ساخت نشان داده شده است.

در ساخت نمونه‌های آزمون کشش از استاندارد ASTM E8 استفاده شد [۷]. این قطعات در دو ابعاد بزرگ با ضخامت ۴ میلی‌متر و ابعاد کوچک با ضخامت ۲ میلی‌متر ساخته شدند که در شکل ۳ ابعاد نمونه بزرگ با ضخامت ۴ میلی‌متر نشان داده شده است.

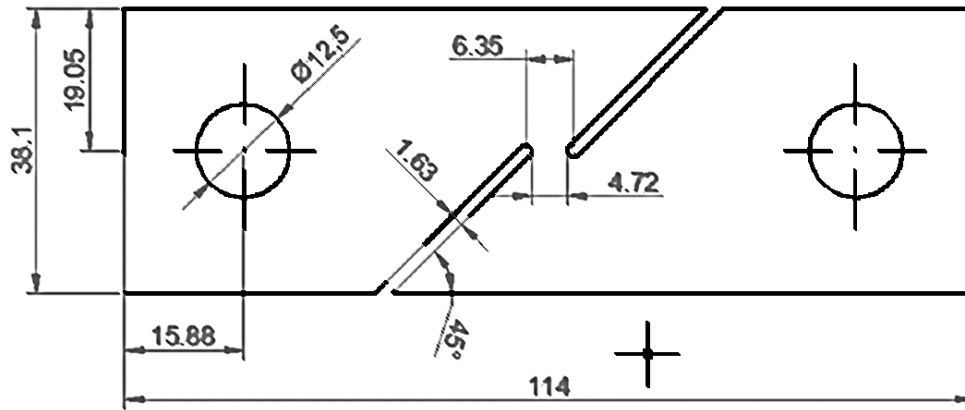
همچنین، برای آزمون برش از استاندارد ASTM B۳۱۸ استفاده شد [۸]. نمونه‌های آزمون برش نیز در دو اندازه بزرگ با ضخامت ۶/۳۵ میلی‌متر و اندازه کوچک با ضخامت ۳/۱۷ میلی‌متر ساخته شدند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده می‌شود، برش نمونه توسط دستگاه وایرکات ایجاد شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ برخی از نمونه‌های L۳۱۶ ساخته شده با دستگاه ذوب انتخابی لیزر نشان داده شده است.

در جدول ۳، توزیع ۱۵ نمونه آزمون کشش و برش ساخته شده بر مبنای

۲-۲- آزمون‌های کشش، برش و میکروسکوپ الکترونی روبشی آزمون کشش برای هر دو نوع نمونه کششی و برشی با دستگاه زوییک/ رول Z^۱۱۰۰ انجام شد. همچنین، در آزمون نمونه‌های کششی همزمان از دستگاه اکستنسومتر سنتام^۲ استفاده شده است. شکل ۷-الف موقعیت نمونه و نحوه نصب دستگاه اکستنسومتر و شکل ۷-ب موقعیت نمونه آزمون برش را نشان می‌دهد. آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز روی محل شکست و اطراف

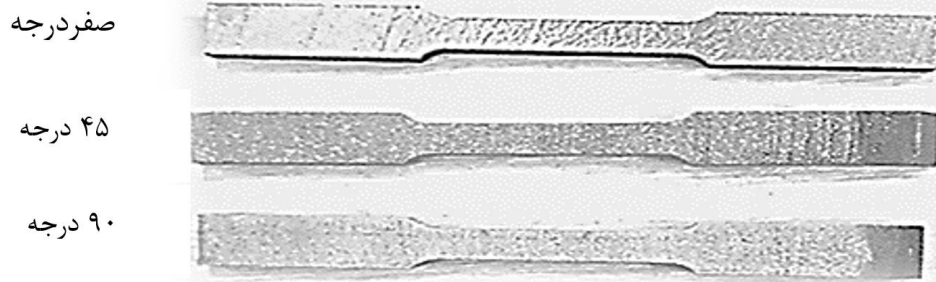
1 Zwick/ Roll Z100

2 SANTAM Extensometer Device



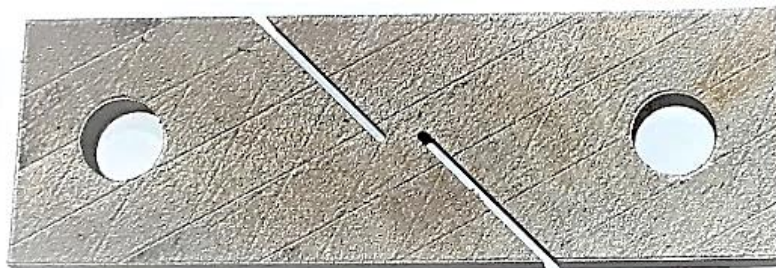
شکل ۴. نمونه آزمون برش استاندارد ASTM B831 [۸].

Fig. 4. Shear test sample based on ASTM B831.



شکل ۵. نمونه‌های آزمون کششی فولاد زنگ نزن 316L ساخته شده به روش ذوب انتخابی لیزر در سه جهت.

Fig. 5. Tensile test samples of 316L stainless steel produced by selective laser melting process in three directions.



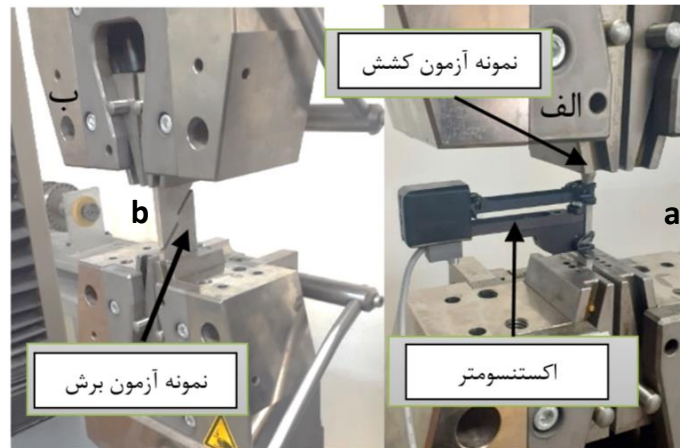
شکل ۶. نمونه آزمون برشی فولاد زنگ نزن 316L ساخته شده به روش ذوب انتخابی لیزر.

Fig. 6. Shear test sample of 316L stainless steel made by selective laser melting process.

جدول ۳. تعداد نمونه‌های کششی و برشی ساخته شده برای آزمون

Table 3. The number of tensile and shear samples built for the test

قطعات	صفر (درجه)	۴۵ (درجه)	۹۰ (درجه)
کششی	۳	۳	۳
برشی	۲	۲	۲



شکل ۷. الف) آزمون کشش به همراه اکستنسومتر؛ ب) آزمون برش.

Fig. 7. a) tensile test with extensometer; b) shear test.

جدول ۴. ابعاد ناحیه تحت کشش و مقادیر تنش و کرنش شکست نمونه‌های آزمون کشش

Table 4. The dimensions of the region under tension and the stress and failure strain values of tensile test samples

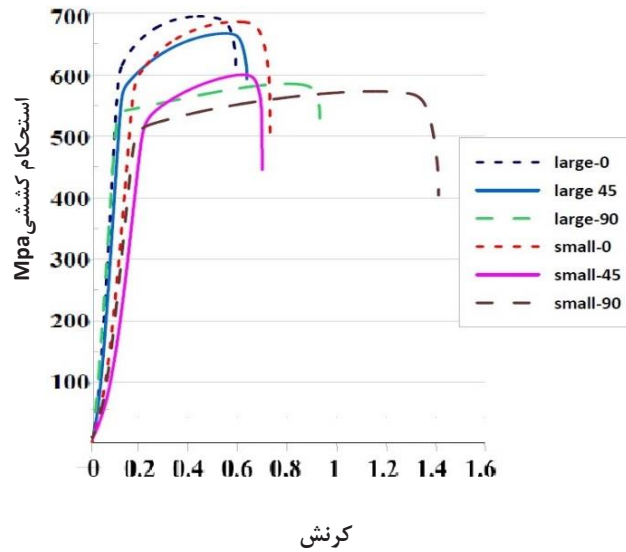
شرح	ابعاد ناحیه کشش نمونه عرض × ضخامت × طول	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی نهایی (مگاپاسکال)	کرنش شکست	استحکام کششی نهایی / استحکام تسلیم
صفر (درجه)	بزرگ	۶۱۰	۶۹۴	۰/۵۹	۰/۸۸
	کوچک	۵۹۴	۶۸۶	۰/۷	۰/۸۷
۴۵ (درجه)	بزرگ	۵۷۴	۶۶۷	۰/۶۴	۰/۸۶
	کوچک	۵۳۰	۶۰۰	۰/۷۳	۰/۸۸
۹۰ (درجه)	بزرگ	۵۳۹	۵۸۴	۰/۹۳	۰/۹۲
	کوچک	۵۱۰	۵۷۳	۱/۴۷	۰/۸۹

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون کشش

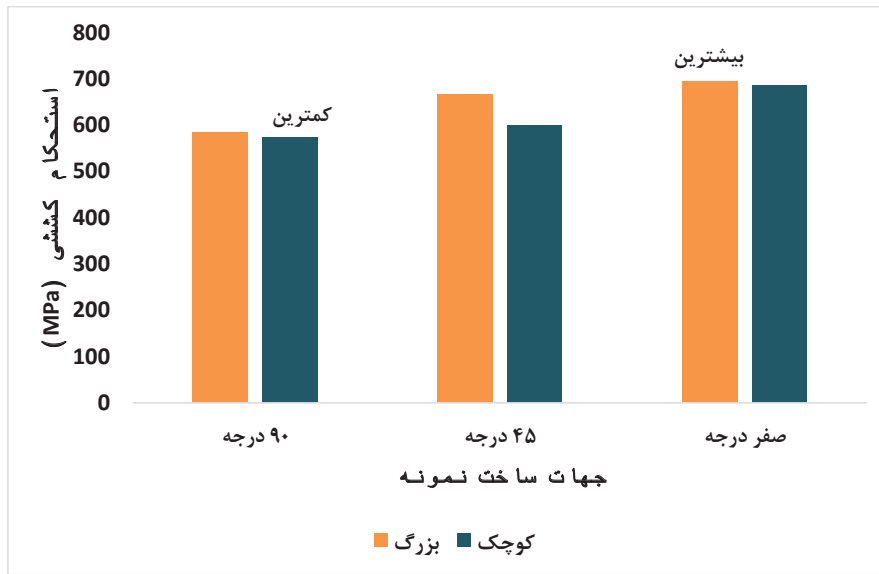
آزمون کشش روی نمونه‌های با جهات ساخت متفاوت و اندازه‌های مختلف انجام شد. ابعاد ناحیه تحت کشش و مقادیر تنش و کرنش شکست نمونه‌های آزمون کشش به صورت کمی در جدول ۴ نشان داده شده است.

محل شکست نمونه‌های آزمون کشش قطعات بزرگ (ساخته شده در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) با بزرگ‌نمایی (۳۰۰، ۴۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰) برابر و با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت برای بررسی حفره‌ها، تخلخل‌های کروی، شکاف‌های ناشی از عدم همجوشی و اعوجاج نقص‌ها انجام شد.



شکل ۸. تنش- کرنش قطعات بزرگ و کوچک.

Fig. 8. Stress-strain of large and small parts.



شکل ۹. تغییرات استحکام کششی نهایی براساس جهت ساخت نمونه.

Fig. 9. Ultimate tensile strength changes based on sample manufacturing directions.

کششی بیشتری نسبت به جهت‌های ۴۵ و ۹۰ درجه برخوردار هستند. همچنین، قطعات ساخته‌شده در جهت ۴۵ درجه استحکام کششی بیشتری نسبت به جهت ۹۰ درجه دارند. استحکام کششی ضعیف‌تر در نمونه ساخته‌شده در جهت ۹۰ درجه را می‌توان به دلیل اتصال ضعیف لایه‌ها در آن راستا و انطباق آن با جهت کشش دانست. از آنجاکه هر لایه ذوب شده روی

شکل ۸ منحنی‌های تنش-کرنش تمامی قطعات را نشان می‌دهد. براساس اطلاعات به‌دست آمده از داده‌های آزمون کشش که در جدول ۴ آورده شده است، شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات استحکام‌های کششی نهایی و کرنش شکست را نسبت به جهت ساخت مختلف نشان می‌دهند. براساس شکل ۹، قطعات ساخته‌شده در جهت صفر درجه از استحکام



شکل ۱۰. تغییرات کرنش شکست براساس جهات ساخت نمونه.

Fig. 10. variation of fracture strain based on the directions of the specimen.

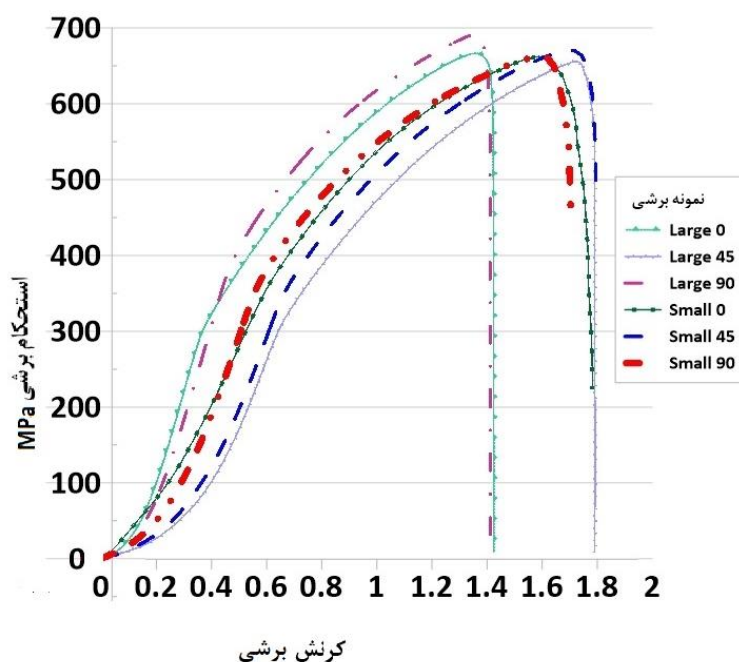
درجه بیشتر از سه نمونه بزرگ مشابه است. اگرچه جنس، پارامترها و روش ساخت قطعات بزرگ و کوچک مشابه هستند؛ اما، مقدار کرنش شکست در قطعات کوچکتر بیشتر مشاهده شد. قطعات بزرگتر با درصد تخلخل کمتر، استحکام بیشتر و کرنش شکست کمتری را از خود نشان می‌دهند که با نتایج نشان داده شده در جدول ۴ و شکل ۸ کاملاً مطابقت دارد.

در طول فرآیند ساخت قطعات بزرگ به روش ذوب انتخابی لیزر با الگوی اسکن نواری، گرادیان حرارتی شدید بین حوضچه مذاب و لایه منجمدشده قبلی به دلیل خنک شدن بسیار سریع وجود دارد که منجر به ایجاد تنش پسماند زیاد و تشکیل دانه‌های ستونی درشتی می‌شوند که در جهت ساخت رشد می‌کنند. اما در نمونه‌های کوچکتر، این فرصت بسیار محدودتر بوده و انجماد سریع رخ نمی‌دهد و گرم بودن لایه قبلی در آن منطقه منجر به گرادیان حرارتی کمتری در حین ذوب لایه جدید می‌شود و بنابراین دانه‌ها به صورت ریز و هم‌محور رشد کرده و چقرمگی و کرنش شکست بیشتری را به هنگام تغییر شکل از خود نشان می‌دهند.

سطح با لایه زیرین خود پیوند ضعیف‌تری را برقرار کرده است و حفره‌های گازی یا پودرهای ذوب نشده در جهت عمودی قرار می‌گیرند؛ بنابراین، منجر به ضعیف‌تر شدن استحکام در راستای عمود و شکست زودرس می‌شوند. نتایج به دست آمده با مشاهدات دنگ و همکاران و راتگر و همکاران همراستا است [۹، ۴].

از نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نمونه‌ها می‌توان چنین استنباط کرد که همه نمونه‌های ساخته شده از استحکام بالا به طور همزمان با حفظ چقرمگی و مقادیر بالای ازدیاد طول برخوردار هستند. این نسبت برای همه قطعات حدود ۰/۹ است. علاوه بر این، اختلاف بین استحکام‌ها و کرنش‌های شکست نمونه‌ها به جهت ساخت وابسته است که با یافته‌های تولسا و همکاران نیز منطبق است [۱۰].

به طور کلی، نمونه‌های کششی بزرگ ساخته شده با فرآیند ذوب انتخابی لیزر در هر سه جهت ساخت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه از استحکام بیشتری نسبت به نمونه‌های مشابه کوچک برخوردارند. با مشاهده شکل ۱۰ می‌توان دریافت کرنش شکست هر سه نمونه کوچک در جهات ساخت صفر، ۴۵ و ۹۰



شکل ۱۱. استحکام برشی و کرنش برشی نمونه‌های برش بزرگ و کوچک.

Fig. 11. Shear strength and shear strain of large and small shear samples..

موضوع را می‌توان به تفاوت در دانه‌بندی و رشد دانه‌ها که به دلیل بیشتر بودن گرادیان حرارتی قطعات بزرگتر نسبت به قطعات کوچکتر در حین فرآیند ساخت نسبت داد.

نتایج نشان می‌دهد که قطعات با جهت ساخت ۴۵ درجه رفتار متفاوتی داشته و مقادیر استحکام برشی و کرنش شکست ۱/۸ مستقل از ابعاد نمونه است. مشاهده می‌شود که قطعات با جهت ساخت ۴۵ درجه شکل‌پذیری و چقرمگی شکست بیشتری نسبت به زوایای صفر و ۹۰ درجه دارند.

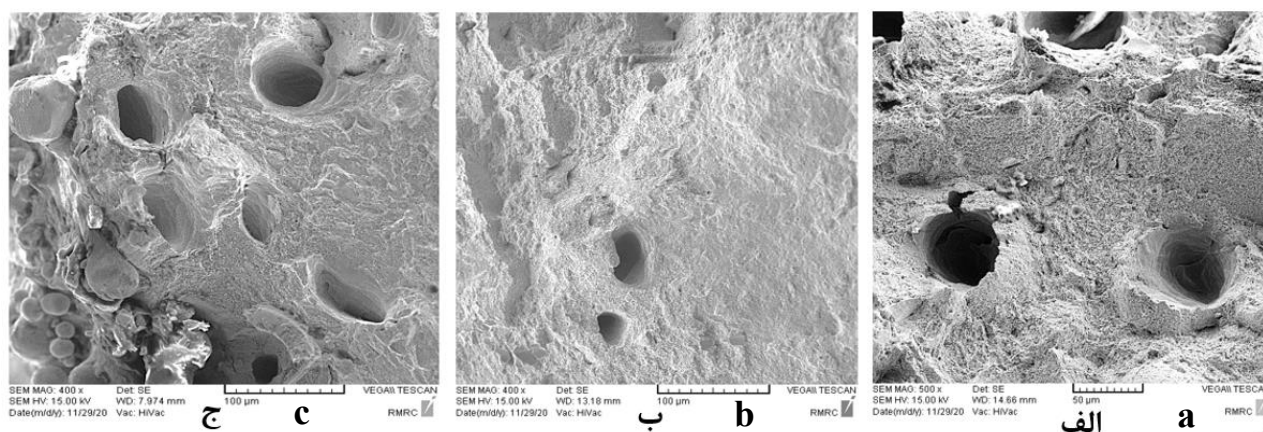
درواقع اعمال نیروی برشی به این نمونه همانند اعمال نیرو در راستای صفر به قطعات ساخته‌شده در جهت صفر درجه است. با توجه به بیشتر بودن درصد حجمی حفرات در نمونه ساخته‌شده در جهت ۴۵ درجه نسبت به نمونه ساخته‌شده در جهت صفر درجه، نمونه ساخته‌شده در جهت ۴۵ درجه کرنش برشی بیشتر و شکل‌پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین، یافته‌های این پژوهش با مطالعات یانگ و همکاران نیز مطابقت دارد. آن‌ها در پژوهش خود دریافتند که بهترین رفتار برشی مربوط به زاویه ساخت ۳۰ تا ۴۵ درجه بوده است [۱۱].

۳-۲- آزمون برش

شکل ۱۱ نتایج آزمون برش قطعات بزرگ و کوچک ساخته‌شده در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه را برحسب استحکام برشی و کرنش برشی ایجاد شده نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نتایج آزمون برش حاکی از آن است که استحکام برشی نمونه‌های بزرگ و نمونه‌های کوچک تقریباً یکسان است.

قطعات بزرگ با جهت ساخت صفر و ۹۰ درجه استحکام برشی ۶۸۰ مگاپاسکال و کرنش برشی ۱/۴ تقریباً یکسانی را از خود نشان می‌دهند. این رفتار در قطعات کوچک ساخته‌شده با زوایای صفر و ۹۰ درجه نیز دیده شد. به طوری که استحکام برشی ۶۸۰ مگاپاسکال و کرنش برشی ۱/۷ یکسانی نشان دادند. به طوری که می‌توان بیان کرد که در زوایای ساخت صفر و ۹۰ درجه مقادیر استحکام برشی و کرنش شکست تابع ابعاد نمونه و مستقل از زاویه ساخت می‌باشد. همچنین کرنش برشی قطعات بزرگتر میزان کمتری را نسبت به کرنش برشی قطعات کوچکتر از خود نشان می‌دهد که این



شکل ۱۲. تصویر تخلخل و حفرات کروی در سطح شکست نمونه‌های کششی بزرگ ساخته‌شده در جهات: الف) صفر درجه؛ ب) ۴۵ درجه؛ ج) ۹۰ درجه.

Fig. 12. Image of porosity and spherical holes on the fracture zone of large tensile samples produced in directions: a) zero degree; b) 45 degrees; c) 90 degrees.

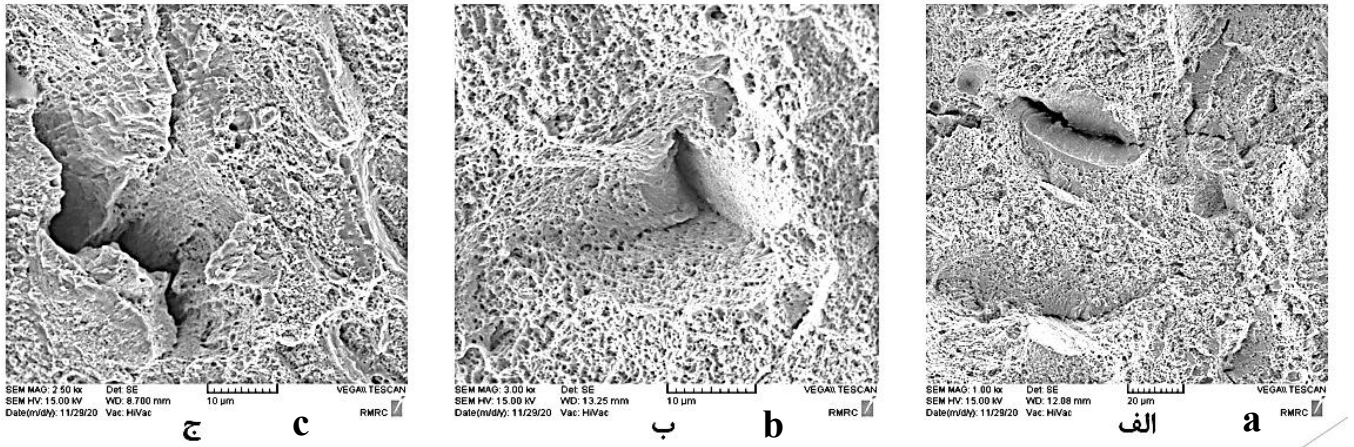
ایجاد ترک‌های پیوسته و گسترده‌تر و در نتیجه ایجاد شکاف‌های وسیع‌تر و عمیق‌تر بیشتر خواهد بود. شکل ۱۳ شکاف‌های همجوشی ناقص در سطح مقطع شکست نمونه‌های آزمون کششی را در سه جهت صفر درجه شکل ۱۳-الف، ۴۵ درجه شکل ۱۳-ب و ۹۰ درجه شکل ۱۳-ج نشان می‌دهد. شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه سطح مقطع شکست نمونه بزرگ آزمون کشش در جهت ساخت ۹۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود حفره کروی به قطر $38/83$ میکرومتر و شکاف عمیقی به طول $72/5$ میکرومتر ناشی از عدم همجوشی ایجاد شده‌است. در شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محل برش خورده از اطراف سطح مقطع شکست نمونه بزرگ آزمون کشش در جهت ساخت ۹۰ درجه نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود در اطراف محل شکست نیز نقص‌ها حضور داشته و دچار اعوجاج و تغییر شکل شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمون کشش و برش نمونه‌های ساخته‌شده با فرآیند ذوب انتخابی لیزر در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه، در دو اندازه بزرگ و کوچک انجام شد و نقص‌های موجود با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ارزیابی شد. نتایج این مطالعه جدید، درک مناسبی از ارتباط بین جهت‌گیری‌ها و اندازه‌های مختلف با خواص مکانیکی قطعه ساخته‌شده

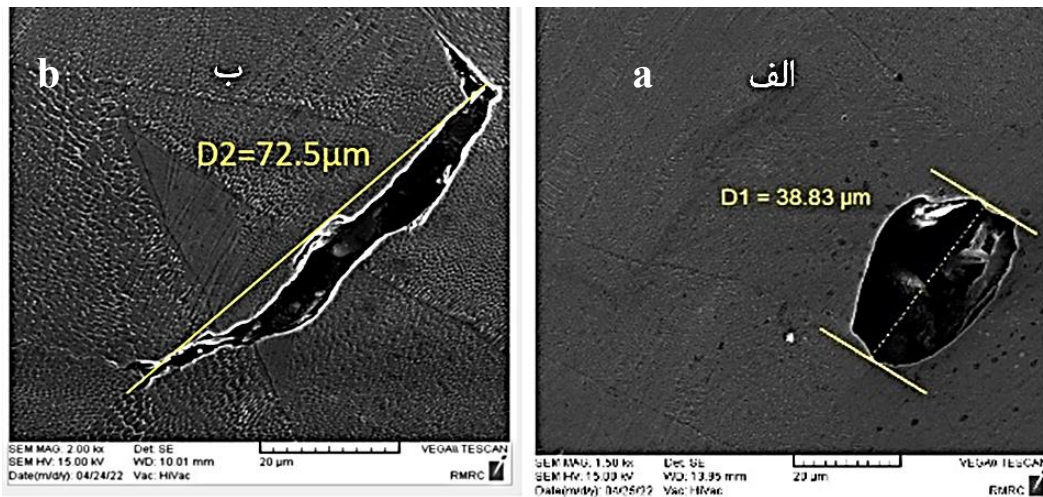
۳-۳- شکست‌نگاری میکروسکوپ الکترونی روبشی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محل شکست نمونه‌های آزمون کشش، قطعات بزرگ ساخته‌شده در سه جهت در شکل ۱۲ آورده شده‌است. با بررسی این تصاویر مشاهده شد تعداد حفره‌های کروی در نمونه‌های ساخته‌شده در جهت ۹۰ درجه بیشتر از نمونه‌های ساخته‌شده در جهت صفر و ۴۵ درجه است. اندازه این حفره‌ها معمولاً کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است. در واقع به دلیل سرعت بالای انجماد، گازها فرصت خروج کامل از فلز مذاب را پیدا نمی‌کنند و این منافذ در ریزساختار منجمد شده باقی می‌مانند. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاکی از آن است که اندازه قطعات تأثیر قابل توجهی روی نقص‌های هندسی قطعات دارد. با کاهش ابعاد نمونه، میزان نقص‌ها از جمله حفرات کروی و انحرافات ابعادی به دلیل تأثیر انتقال حرارت و گرادیان دما در طول فرآیند ذوب انتخابی لیزر افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ نیز نشان می‌دهد که تعداد و عمق شکاف‌های عدم همجوشی در نمونه‌های ساخته‌شده در جهت ۹۰ درجه بیشتر از نمونه‌های ساخته‌شده در جهت صفر و ۴۵ درجه است. یکی از دلایل ایجاد شکاف‌های عدم همجوشی می‌تواند به دلیل وجود دانه‌های ذوب‌نشده باقی‌مانده از لایه زیرین باشد. دانه‌های ذوب‌نشده مانند ناخالصی عمل کرده که موجب تمرکز تنش، جوانه‌زنی و رشد ترک می‌شود. هرچه توزیع این ناخالصی‌ها نامناسب‌تر باشد (به صورت تجمعی از دانه‌ها و یا منافذ بین لایه‌های [۱۲، ۱۳])، امکان



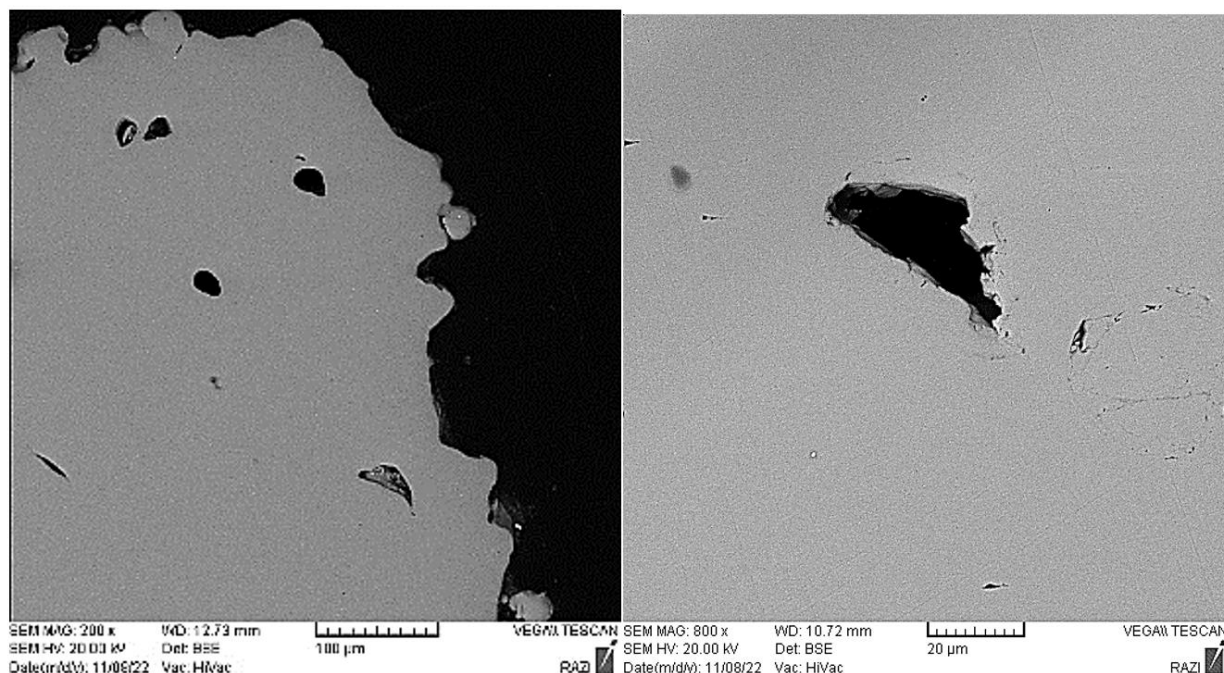
شکل ۱۳. تصویر شکاف‌های ناشی از عدم همجوئی سطح شکست نمونه‌های کششی بزرگ ساخته شده در جهات: الف) صفر درجه؛ ب) ۴۵ درجه؛ ج) ۹۰ درجه.

Fig. 13. Image of incomplete fusion holes of the fracture zone of large tensile samples produced in directions: a) zero degrees; b) 45 degrees; c) 90 degrees.



شکل ۱۴. سطح مقطع شکست نمونه بزرگ آزمون کشش، جهت ساخت ۹۰ درجه: الف) حفره کروی؛ ب) شکاف ناشی از عدم همجوئی.

Fig. 14. The fracture zone of the large tensile test specimen, 90-degree building direction: a) Spherical hole; b) Incomplete fusion hole.



شکل ۱۵. محل برشخورده از اطراف سطح مقطع شکست نمونه آزمون کشش؛ جهت ساخت ۹۰ درجه.

Fig. 15. The cut area around the fracture surface of the tensile test specimen in the direction of 90 degrees production.

کوچک ساخته شده در همان جهات، تقریباً یکسان و برابر با ۶۸۰ مگاپاسکال هستند. به بیان دیگر، در زوایای ساخت صفر و ۹۰ درجه مقادیر استحکام برشی و کرنش شکست تابع ابعاد نمونه و مستقل از زاویه ساخت هستند. همچنین، کرنش برشی قطعات بزرگتر میزان کمتری را نسبت به کرنش برشی قطعات کوچکتر نشان می‌دهد که این موضوع را می‌توان به تفاوت در دانه‌بندی و رشد دانه‌ها به دلیل گرادیان بیشتر حرارتی قطعات بزرگتر نسبت به قطعات کوچکتر در حین فرآیند ساخت نسبت داد. کرنش برشی و چقرمگی نمونه‌های ساخته شده در جهت ۴۵ درجه بیشتر از نمونه‌های ساخته شده در جهت صفر و ۹۰ درجه و مستقل از ابعاد می‌باشد. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان داد که میزان و توزیع حفره‌های کروی و شکاف‌های همجوشی ناقص در نمونه‌های بزرگ ساخته شده در جهت ۹۰ درجه، بیشتر از نمونه‌های ساخته شده در جهت صفر و ۴۵ درجه است.

با فرآیند ذوب انتخابی لیزر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌ها و نمودارهای نشان داده شده در مقاله، نتایج حاکی از آن است که بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه‌های بزرگ ساخته شده در جهت صفر درجه به مقدار ۶۹۴ مگاپاسکال و کمترین مقدار مربوط به جهت ۹۰ درجه به مقدار ۵۸۴ مگاپاسکال است. همچنین، بیشترین استحکام کششی مربوط به نمونه‌های کوچک ساخته شده در جهت صفر درجه به مقدار ۶۸۶ مگاپاسکال و کمترین مقدار مربوط به جهت ۹۰ درجه به مقدار ۵۷۳ مگاپاسکال است. به طور کلی، استحکام کششی نمونه‌های بزرگ ساخته شده در همه جهات بیشتر از نمونه‌های کوچک ساخته شده در همان جهات است و کرنش شکست نمونه‌های کوچک ساخته شده در همه جهات نیز بیشتر از نمونه‌های بزرگ ساخته شده در همان جهات است.

علاوه بر این، مقادیر استحکام برشی مربوط به نمونه‌های بزرگ ساخته شده در همه جهات با مقادیر استحکام برشی مربوط به نمونه‌های

- (2011) pp. 2.
- [8] ASTM B831 - 19: Standard test method for shear testing of thin aluminum alloy products.,)2019).
- [9] W. Deng, H. Lu, Y. Xing, K. Luo, J. Lu, Effect of laser shock peening on tensile properties and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel with different build directions, *Materials Science and Engineering: A*, 850 (2022) 143567.
- [10] I. Tolosa, F. Garcíandía, F. Zubiri, F. Zapirain, A. Esnaola, Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51 (2010) 639-647.
- [11] H. Yang, B. Liu, P. Niu, Z. Fan, T. Yuan, Y. Wang, Y. Liu, R. Li, Effect of laser scanning angle on shear slip behavior along melt track of selective laser melted 316L stainless steel during tensile failure, *Materials Characterization*, 193 (2022) 112297.
- [12] J.M. Jeon, J.M. Park, J.-H. Yu, J.G. Kim, Y. Seong, S.H. Park, H.S. Kim, Effects of microstructure and internal defects on mechanical anisotropy and asymmetry of selective laser-melted 316L austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 763 (2019) 138152.
- [13] V.-D. Le, E. Pessard, F. Morel, F. Edy, Interpretation of the fatigue anisotropy of additively manufactured TA6V alloys via a fracture mechanics approach, *Engineering Fracture Mechanics*, 214 (2019) 410-426.
- [1] Z. Dong, X. Zhang, W. Shi, H. Zhou, H. Lei, J. Liang, Study of size effect on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg samples made by selective laser melting, *Materials*, 11 (2018) 2463.
- [2] P. Hartunian, M. Eshraghi, Effect of build orientation on the microstructure and mechanical properties of selective laser-melted Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2 (2018) 69.
- [3] P. Lu, Z. Cheng-Lin, W. Liang, L. Tong, L. Xiao-Cheng, Research on mechanical properties and microstructure by selective laser melting of 316L stainless steel, *Materials Research Express*, 6 (2020) 1265h1267.
- [4] A. Röttger, J. Boes, W. Theisen, M. Thiele, C. Esen, A. Edelmann, R. Hellmann, Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108 (2020) 769-783.
- [5] I.G. Ian Gibson, *Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, Springer, second edition, (2015).
- [6] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker, Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, *Additive Manufacturing*, 1 (2014) 87-98.
- [7] ASTM Standard E8/E8M, *Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Materials*, USA,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ranjbarkohan, A. Sazgar, A. Pourkamali Anaraki, *Effect of Build Orientation and Size on the Defects Rate of Stainless Steel 316L Parts Produced by Selective Laser Melting Process*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(10) (2024) 1219-1232.

DOI: 10.22060/mej.2024.22323.7630



