

## بررسی مکانیزم شکست نرم با در نظر گرفتن رفتار ناهمسانگرد ماده‌ی فولاد ضد زنگ SS316L ساخته شده به روش تولید مواد افزودنی تف جوشی مستقیم لیزر بر روی فلزات (DLMS)

رامین دارویی<sup>۱</sup>، جیران نفر دستگردی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی هوافضا - ramindarooee@aut.ac.ir

۲- عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، دانشکده مهندسی هوافضا - j.nafardastgerdi@aut.ac.ir

\*نویسنده مخاطب

### چکیده

با توسعه‌ی روش تولید افزودنی فلزات و استفاده‌ی گسترده‌ی آن در صنایع مختلف به خصوص هوافضا، مطالعه و پژوهش برای افزایش کیفیت و بالابردن سطح استاندارد این روش ساخت نوین مورد توجه و اهمیت قرار گرفته است. متغیرهای مختلفی از جمله انرژی لیزر، سرعت اسکن، اندازه و ضخامت لایه و جهت ساخت بر روی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش تولید افزودنی تأثیرگذار است. در این تحقیق ماده‌ی فولاد ضدزنگ SS316L به شکل نمونه تست کشش به روش تولید افزودنی تف جوشی مستقیم لیزر بر روی فلزات (Direct Laser Metal Sintering) به شیوه‌ی ذوب مبتنی بر بستر پودر، در دو جهت افقی و عمودی ساخته شده و تحت بار کششی قرار گرفته است. نتایج تست کشش، خواص مکانیکی متفاوتی برای نمونه های تولید شده نشان می دهد، به نحوی که تنش تسلیم و استحکام نمونه‌ی افقی بیشتر از نمونه‌ی عمودی و کرنش شکست در نمونه‌ی افقی کم تر از نمونه‌ی عمودی است. با وجود آنکه هر دو نمونه دچار شکست نرم شده‌اند، تأثیر ایجاد و رشد عیوب در روند شکست یکسان نیست. همچنین تغییر جهت لایه‌گذاری نسبت به جهت بارگذاری، سبب ناهمسانگردی خواص مکانیکی ماده می‌شود. این مقاله قصد دارد با نمایش سطح مقطع شکست به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope)، مکانیزم شکست این دو نمونه را مقایسه و بر این اساس علل تفاوت خواص مکانیکی نسبت به جهت ساخت را بررسی نماید.

**واژه های کلیدی:** روش تولید/افزودنی- مکانیزم شکست- خواص مکانیکی- صفحه‌ی برش- حفره

### ۱- مقدمه

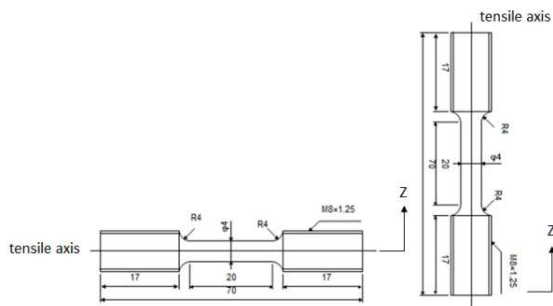
روش تولید مواد افزودنی یکی از روش‌های نوین برای ساخت قطعات براساس قراردادن لایه به لایه‌ی مواد بر روی یکدیگر است. این روش ابتدا برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت، اما رفته رفته جایگاه کاربردی خود را در زمینه‌ی تولید قطعات صنعتی پیدا کرد و امروزه برای تولید بسیاری از قطعات اصلی با هندسه‌ی پیچیده در صنایع مختلف مانند هوافضا، خودرو و پزشکی مورد توجه قرار گرفته است. مزیت این روش دستیابی به شکل نهایی قطعات با هندسه‌ی پیچیده، بدون نیاز به اتصالات و مفاصل و با صرفه جویی در مواد اولیه و در مدت زمان کوتاه می باشد. اما چالشی که در مسیر توسعه‌ی این روش تولید قرار دارد، ناشناخته بودن خواص مکانیکی این محصولات است که با تغییر پارامترهای ساخت از جمله چگالی انرژی، سرعت اسکن، اندازه و ضخامت لایه و راستای لایه‌گذاری

تغییر می‌کند. همچنین در این روش ساخت، نمونه ها به شدت مستعد شکل‌گیری عیوب و حفره در داخل و بر روی سطوح خود می‌باشند.

علاوه بر پارامترهای ساخت، عیوب داخل قطعه‌ی ساخته شده و ریزساختار آن بر روی خواص مکانیکی تأثیرگذار است. همچنین هر یک از این مولفه‌ها می‌تواند روی مولفه‌های دیگر به صورت متوالی تأثیرگذار باشد. لئو و همکارانش میزان تأثیرگذاری ۴۶ مولفه‌ی بر روی یکدیگر را برای آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V به روش ذوب مبتنی بر بستر پودر بررسی کردند و با تولید نمونه‌های متعدد و آزمون‌های مختلف، به کمک چهار رابطه‌ی همبستگی مختلف، میزان همبستگی این مولفه‌ها را در قالب ۱۶ پارامتر مرتبط با یکدیگر به صورت نمودارهای ماتریسی نمایش دادند [۱]. عوامل مختلفی مانند راستای لایه‌گذاری و میزان عیوب و حفره‌های موجود در قطعات می‌تواند روی خواص مکانیکی ماده تأثیرگذار باشد. فدرنکو و همکارانش در مقاله‌ای به بررسی خواص مکانیکی ماده‌ی فولاد ضدزنگ SS316L ساخته‌شده به روش ذوب مبتنی بر بستر پودر برای نمونه‌هایی در راستای افقی و عمودی پرداختند که در نتیجه استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌ی افقی بیشتر از نمونه‌ی عمودی به‌دست آمد در حالی که میزان افزایش طول نمونه‌ی عمودی کمی بیشتر بود. نمونه ها به کمک مازول تولید مواد افزودنی در نرم‌افزار تجاری آباکوس (ABAQUS) با شرایط مرزی مشابه آزمایش تجربی شبیه سازی گردیده و تنش پسماند موجود در نمونه‌ی عمودی به عنوان علت این ناهمسانگردی گزارش شده است [۲]. گودن و همکارانش در مقاله‌ای ماده‌ی فولاد ضدزنگ SS316L را در زوایای لایه-گذاری صفر تا ۹۰ درجه در بازه‌های ۱۵ درجه نسبت به جهت بارگذاری به روش ذوب انتخابی لیزر ساخته و تحت آزمون کشش قرار دادند که استحکام تسلیم و نهایی برخلاف افزایش طول، با بیشتر شدن زاویه نسبت به راستای بارگذاری افزایش یافت. در شبیه‌سازی این آزمون به کمک نرم‌افزار تجاری انسیس (ANSYS) تنش پسماند تا بیشترین حد امکان اعمال شد اما اثر جهت‌گیری بافت ریزساختار، برجسته‌تر از اثر تنش پسماند مشاهده شد و علت این ناهمسانگردی چگالی نابجایی‌های دوقلو بیان شده است [۳]. یانگ و همکارانش نیز در مقاله‌ای برای جنس ماده و زوایای لایه‌گذاری مشابه نسبت به راستای بارگذاری، آزمون کشش انجام دادند که بیشترین افزایش طول در نمونه‌ی افقی و بیشترین استحکام تسلیم در نمونه‌ی لایه‌گذاری شده در راستای ۳۰ درجه نسبت به راستای بارگذاری مشاهده گردیده است، که به ترتیب علت آن حرکت آسان‌تر نابجایی‌ها بر روی مرز دانه‌ها در نمونه‌ی افقی و دستیابی به بیشترین مقدار ضریب اشمید در زاویه‌ی ۳۰ درجه گزارش شده است [۴]. در مقاله‌ای دیگر جئون و همکارانش فولاد ضدزنگ SS316L را در زوایای افقی و عمودی و قطری نسبت به راستای بارگذاری لایه‌گذاری نمودند و تحت آزمون کشش قرار دادند. خواص مکانیکی به‌دست

### ۱- مشخصات ماده و فرایند ساخت

در این مقاله، ماده‌ی فولاد ضد زنگ SS316L با روش تولید افزودنی DMLS به شیوه‌ی ذوب مبتنی بر بستر پودر (Powder Bed Fusion) به کمک دستگاه پرینت سه بعدی فلزات EOS GmbH (M290) تولید و مورد مطالعه قرار گرفته است. دو نمونه عمودی و افقی مطابق استاندارد ASTM E8 با سطح مقطع دایره‌ای به نحوی که محور بارگذاری یکی از آن‌ها در راستای محور Z (نمونه‌ی عمودی) و دیگری در راستای عمود بر محور Z (نمونه‌ی افقی) ساخته شده است (شکل ۱). هر دو نمونه با ۲۵۰ W قدرت توانی دستگاه و سرعت اسکن ۱۰۸۳ mm/s و فاصله‌ی بین لایه‌ها mm ۰.۰۹ ساخته شده‌اند. طبق معادله‌ی  $E_a = \frac{\rho}{vht} (E_a, \rho, v, h, t)$  که در آن قدرت لیزر بر حسب وات (W)، سرعت حرکت پرتوی اسکن بر حسب میلی-متر بر ثانیه (mm/s)، فاصله‌ی بین مسیر بستر مذاب و نیز ضخامت لایه بر حسب میلی-متر (mm) می‌باشد، مقدار چگالی انرژی بر واحد حجم  $64.127 \text{ J/mm}^3$  محاسبه شده است. پودر ماده به صورت کروی شکل و اندازه-ی قطر آن  $37 \mu\text{m}$  و ضخامت لایه برای هر دو نمونه یکسان و برابر با  $40 \mu\text{m}$  می‌باشد. برای جلوگیری از ایجاد تنش پسماند، صفحه‌ی زمینه‌ی ساخت پیش‌گرم و در حین فرایند ساخت در دمای ثابت  $80^\circ\text{C}$  نگه‌داشته شده است. قطعات به شکل نهایی خود تولید شده و بر روی هیچ یک از نمونه‌ها عملیات حرارتی و پس پردازش انجام نشده است. در نهایت، آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM E8/E8M برای دو نمونه‌ی افقی و عمودی با نرخ کرنش  $(s^{-1}) 0.001$  انجام گرفت [۱۲].



شکل ۱- نمای نمونه‌ی آزمون کشش ساخته شده در دو راستای افقی و عمودی

### ۲- نتایج آزمون کشش

پس از انجام آزمون کشش، نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی تنش تسلیم و تنش نهایی بیشتر در نمونه‌ی افقی و کرنش شکست بیشتر در نمونه‌ی عمودی می‌باشد. خواص مکانیکی به دست آمده برای نمونه افقی و عمودی در جدول ۱ ارائه شده است و نمودار تنش-کرنش مهندسی برای این دو نمونه در شکل ۲ و همچنین نمودار تنش-کرنش حقیقی در شکل ۳ نمایش داده شده است. برتری استحکام نمونه‌ی افقی و بالاتر بودن میزان کرنش پلاستیک نمونه‌ی عمودی در هر دو نمودار مهندسی و حقیقی قابل مشاهده است. در شکل ۲ رابطه‌ی رامبرگ اسگود (رابطه‌ی (۱)) [۱۳] بین تنش و کرنش مهندسی برقرار است:

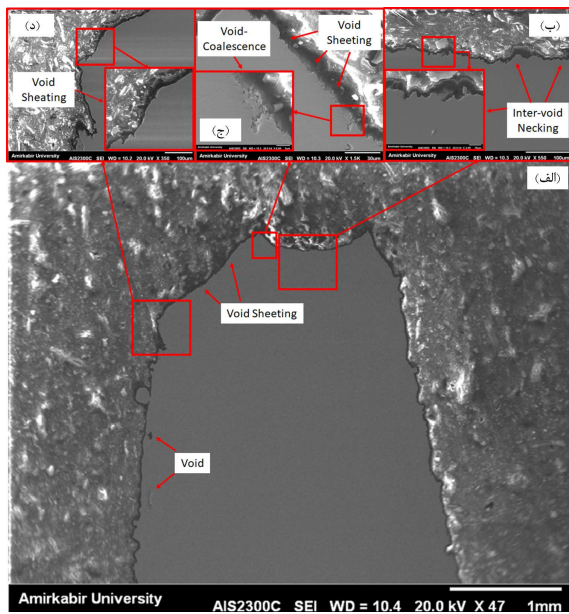
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n \quad (1)$$

آمده در آزمون کشش نشان‌دهنده‌ی بالاتر بودن استحکام تسلیم و نهایی و بیشتر بودن میزان افزایش طول در نمونه‌ی افقی بود. علت این ناهمسانگردی قرارگیری عیوب و حفره‌ها در میان لایه‌ها و رشد آن‌ها در راستای لایه‌گذاری شناخته شد [۱۵]. بارکیا و همکارانش در مقاله‌ای به مقایسه‌ی خواص مکانیکی دو نمونه از جنس فولاد ضدزنگ SS316L ساخته شده در راستای افقی و عمودی به روش تولید افزودنی با استفاده از توزیع مستقیم لیزر (Direct Laser Deposition) پرداختند. در این تحقیق هر دو نمونه دارای حداقل میزان حفره و عیوب اولیه بودند و رفتار همسانگرد با اختلاف خواص مکانیکی اندک در این دو نمونه دیده شد [۱۶]. این نتیجه نشان داد، با کاهش چگالی عیوب و حفره‌ها، می‌توان میزان ناهمسانگردی را به حداقل رساند. راتگر و همکارانش بر روی فولاد ضدزنگ SS316L ساخته شده به روش ذوب انتخابی لیزر، به کمک چهار دستگاه ساخت متفاوت با پارامترهای ساخت و دسته‌ی پودر یکسان، در دو راستای افقی و عمودی آزمون کشش انجام دادند. در هر چهار مورد نمونه‌ی افقی بیشترین مقدار تنش تسلیم و نهایی را داشت. علت این ناهمسانگردی سهولت در جدایش لایه‌های نمونه‌ی عمودی به علت عمود بودن راستای نیرو نسبت به لایه بیان گردید [۱۷]. در مطالعات دیگری SS316L تولید شده به روش ذوب انتخابی لیزر با استراتژی‌های لایه‌گذاری جدیدتر ساخته شد و نتایج مشابهی به دست آمد که در آن استحکام تسلیم و نهایی به افزایش طول نمونه‌ی افقی بیشتر است [۸، ۹]. رابریگ و همکارانش در مقاله‌ای به بررسی خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ SS316L ساخته شده به روش افزودنی ذوب مبتنی بر بستر پودر در دو راستای افقی و عمودی تحت بار کشش پرداختند. نتایج نشان داد که با وجود چگالی بیشتر حفره‌ها و عیوب در داخل نمونه‌ی افقی، خواص مکانیکی این نمونه نسبت به نمونه‌ی عمودی بهتر است، زیرا رشد و شروع حفره‌ها هم‌راستا با جهت لایه‌ها اتفاق می‌افتد. ایشان همچنین خواص مکانیکی ماده پس از انجام فرایند بازیخت در دماهای مختلف مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. پارامتر ساخت جهت لایه‌گذاری نه تنها بر روی خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به روش تولید افزودنی تاثیرگذار است بلکه بر روی مقاومت خستگی این دسته از مواد نیز تاثیر به سزایی دارد [۱۱]. نپردستگردی و همکارانش، نشان دادند که این قطعات تولید شده فولاد ضدزنگ SS316L با روش تولید افزودنی DLMS، تحت بارگذاری چرخه-ای استحکام خستگی بیشتری در راستای لایه‌گذاری افقی نسبت به راستای عمودی دارا می‌باشند.

در بیشتر مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های تولید افزودنی رفتار ناهمسانگرد در خواص مکانیکی ماده مشاهده می‌شود که به برخی از آن‌ها اشاره شد. همچنین در مقالات ذکر شده نوع شکست ماده‌ی فولاد ضدزنگ SS316L به صورت شکست نرم گزارش گردیده اما در این مطالعات به جزئیات مکانیزم شکست نرم و روند تاثیرپذیری آن از عیوب و حفره‌های داخل قطعه اشاره نشده است. هدف از انجام این پژوهش مقایسه‌ی خواص مکانیکی دو نمونه فولاد ضدزنگ SS316L ساخته شده به روش تولید افزودنی DMLS در راستای افقی و عمودی و بررسی مکانیزم شکست و تاثیرپذیری آن از روند شکل‌گیری و رشد عیوب ماده به کمک تصاویر SEM می‌باشد.

و خش‌های سطح آن به کم‌تر از  $1 \mu m$  برسد. بعد از آن قطعه تحت تصویربرداری SEM قرار گرفته است (شکل ۴ و ۵)، همچنین قسمت دیگر قطعه‌ی شکسته شده از نمای جانبی تصویربرداری SEM گردیده است (شکل ۶ و ۷).

شکل ۴ نمای عرضی سطح شکست نمونه‌ی عمودی را نمایش می‌دهد. در شکل ۴-الف نمای کلی سطح شکست نشان می‌دهد که در نواحی بیرونی، شکست به صورت مورب و تقریباً با زاویه‌ی ۴۵ درجه رخ داده است در حالی که در وسط سطح شکست، شیب بسیار کم و برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های بسیاری دیده می‌شود. همچنین در قسمت‌های پایین‌تر از مرز شکست، در نزدیکی لبه‌ی قطعه، حفره‌های نسبتاً بزرگی وجود دارد. شکل ۴-ب نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی با شیب کم، پستی بلندی‌ها و برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های بسیار با جهت‌گیری‌های نامنظم دیده می‌شود. در حالی که در شکل ۴-ج روی سطوح مورب پستی و بلندی‌های کم‌تر و تعداد زیادی از حفره‌های کوچک‌تر وجود دارد که در مجاورت یکدیگر قرار دارند، همچنین با بزرگنمایی قسمتی از شکل، مشاهده می‌شود که حفره‌ها و تخلخل‌های کوچک به یکدیگر و همچنین به سطح شکست متصل شده‌اند. در شکل ۴-د سطح شکست دارای حفره‌های ریز و پستی و بلندی‌های کم‌تر می‌باشد اما در بخشی از تصویر بزرگنمایی شده، تعدادی حفره دیده می‌شود که در مسیر صفحه‌ی شکست و همچنین در نزدیکی لبه قرار گرفته‌اند.



شکل ۴-الف- تصویر SEM از نمای عرضی نمونه‌ی عمودی ب- ناحیه‌ی گلوبی شدن حفره‌های داخلی ج- ناحیه‌ی صفحه‌های شدن حفره‌ها و اتصالشان به یکدیگر د- اتصال به سطح حفره‌های نزدیک به لبه

نمای جانبی از سطح مقطع شکست نمونه‌ی عمودی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود که صفحات شکست به صورت مورب و از جهات مختلف در بخش‌های بیرونی قطعه ایجاد شده و در میانه‌ی قطعه یکدیگر را قطع می‌کنند. اما در مرکز و میانه‌ی قطعه شیب کم‌تر وجود

که در این رابطه  $\sigma_{Eng}$  و  $\epsilon_{Eng}$  به ترتیب بیانگر تنش و کرنش مهندسی،  $E$  مدول یانگ،  $K$  ضریب سخت‌شوندگی و  $n$  پارامتر نمایی سخت‌شوندگی می‌باشند. در شکل ۳، تنش و کرنش حقیقی به ترتیب از روابط (۳ و ۲) [۱۴] محاسبه می‌گردد:

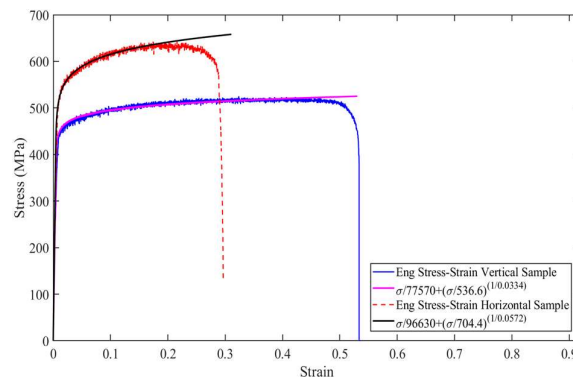
$$\sigma_{True} = \sigma_{Eng} (1 + \epsilon_{Eng}) \quad (2)$$

$$\epsilon_{True} = \ln(\epsilon_{Eng} + 1) \quad (3)$$

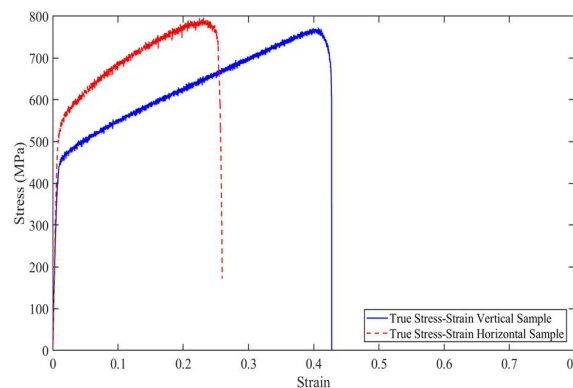
در این روابط  $\sigma_{True}$  و  $\epsilon_{True}$  به ترتیب مقادیر کرنش حقیقی و تنش حقیقی می‌باشند.

جدول ۱- خواص مکانیکی به‌دست آمده از آزمون کشش

$\epsilon_f$ %	n	K (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_{UTS}$ (MPa)	
۵۲	۰.۰۳۳۴	۵۳۶/۶	۳۹۲/۳	۵۲۲	نمونه‌ی عمودی
۲۷	۰.۰۵۷۲	۷۰۴/۴	۴۵۲/۷	۶۴۲	نمونه‌ی افقی



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش مهندسی برای دو نمونه‌ی عمودی و افقی

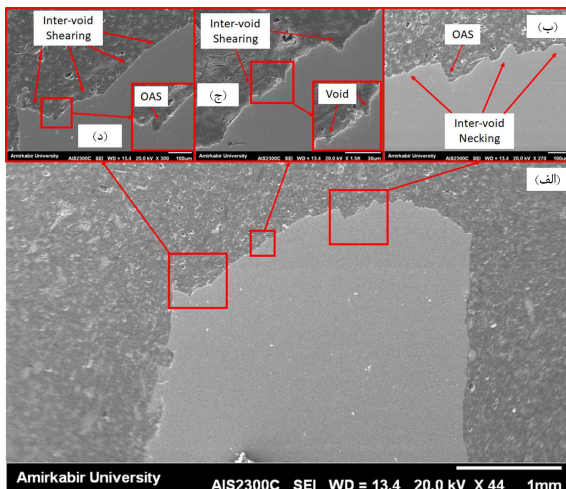


شکل ۳- نمودار تنش-کرنش حقیقی برای دو نمونه‌ی عمودی و افقی

### ۳- مشخصات سطح شکست

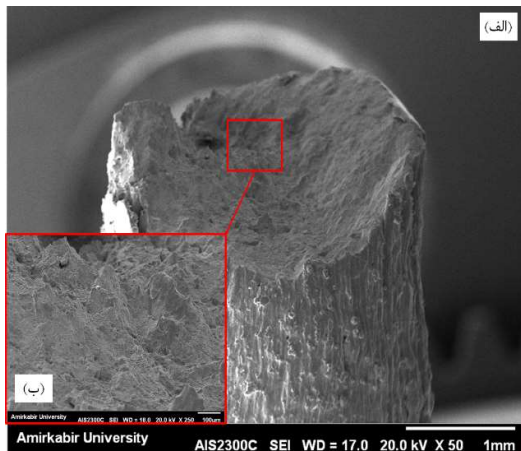
برای بررسی سطح مقطع شکست هر یک از نمونه‌ها، یک قسمت از قطعه‌ی شکسته شده، به وسیله‌ی ابزار برش سیمی، برش داده‌شد تا سطح مقطع عرضی آن به‌دست آید، سپس قطعه‌ی برش داده‌شده به وسیله‌ی رزین کربن تحت فشار قرار گرفت تا رزین کربن اطراف آن را پر کرده و بتواند آن را نگاه‌دارد. سپس قطعه با استفاده از سمباده از زبری ۸۰۰ تا ۵۰۰۰ سمباده زده شد و سپس با استفاده از خمیر جلاسنج صیقل داده شد تا عمق خطوط

که سطوح مورب در امتداد یکدیگر قرار نگیرند. در شکل ۶-د ادامه‌ی سطح مورب را شاهد هستیم که بعد از گذشتن از برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های متعدد، به یک حفره‌ی بزرگ متصل شده است. دیواره‌ی این حفره نیز مانند فرورفتگی‌های دیگر در راستای طول قطعه کشیده شده است. در سمت دیگر حفره نیز سطح شیب‌دار دیگری دیده می‌شود که روی آن نیز برآمدگی و فرورفتگی وجود دارد و از سمت دیگر به همان حفره متصل شده است.



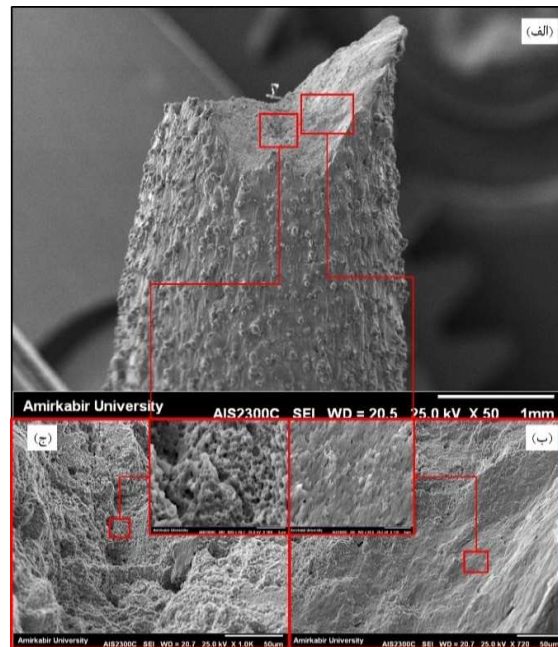
شکل ۶-الف- نمای عرضی سطح شکست نمونه‌ی افقی ب- ناحیه‌ی شکست با مکانیزم شکست گلوبی شدن حفره‌های داخلی ج- ناحیه‌ی شکست با مکانیزم برش حفره‌های داخلی د- ناحیه‌ی شکست با مکانیزم شکست برش حفره‌های داخلی و OAS

تصویر جانبی از سطح شکست نمونه‌ی افقی، نمای خوبی از شکست نمونه را نشان می‌دهد (شکل ۷) که در آن دو صفحه‌ی شیب‌دار از شعاع بیرونی سطح شکست به سمت داخل امتداد و به یک ناحیه با شیب کم و پستی و بلندی‌های فراوان خاتمه می‌یابد. با وجود این که در ناحیه‌ی بدون شیب پستی بلندی‌ها و برآمدگی و فرورفتگی‌های بسیاری دیده می‌شود که نمای عرضی نیز تایید کننده‌ی آن است (شکل ۶-الف). این برآمدگی و فرورفتگی‌ها بر روی سطوح شیب‌دار نیز ادامه می‌یابد (شکل ۷-ب).



شکل ۷-الف- نمای جانبی سطح شکست نمونه‌ی افقی ب- برآمدگی و فرورفتگی روی سطح برش

دارد و برآمدگی و فرورفتگی‌های بیشتری نیز مشاهده می‌شود. در شکل ۵-ب یک ناحیه از سطح روی صفحه‌ی شیب‌دار بزرگنمایی شده است. روی این صفحه حفره‌های نسبتاً کوچکی وجود دارد که به سطح متصل گردیده و همچنین خلل و فرج‌ها به صورت برشی و با اندازه‌ی کوچک به سمت بالا کشیده شده‌اند. شکل ۵-ج بخش میانی سطح شکست را نشان می‌دهد که در آن حفره‌های نسبتاً بزرگی وجود دارد که تعدادی از آن‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین اندازه‌ی خلل و فرج‌ها به مراتب بیشتر از خلل و فرج‌های روی سطح شیب‌دار است و جهت‌گیری مشخصی ندارد.



شکل ۵-الف- نمای جانبی سطح مقطع شکست نمونه‌ی عمودی ب- ناحیه‌ی شکست با مکانیزم صفحه‌ای شدن حفره‌ها ج- ناحیه‌ی شکست با مکانیزم گلوبی شدن حفره‌های داخلی

در تصاویر سطح شکست نمونه‌ی افقی ویژگی‌های متفاوتی دیده می‌شود. در شکل ۶-الف نمای عرضی سطح شکست به صورت کامل نمایش داده شده است. در سمت راست سطح شکست، تنها پستی و بلندی و برآمدگی و فرورفتگی‌های بسیاری را مشاهده می‌نماییم که شیب مشخصی ندارند. اما در سمت چپ سطح شکست یک صفحه‌ی شیب‌دار را شاهد هستیم. با نگاه دقیق‌تر از نمای نزدیک به سمت راست سطح شکست قطعه، در شکل ۶-ب مشخص می‌گردد که در این ناحیه برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های عمیقی وجود دارد که با زاویه‌ی تقریباً ۴۵ درجه به یکدیگر متصل شده‌اند و در نتیجه برآمدگی‌های نوک تیزی را تشکیل داده‌اند. برخی از این فرورفتگی‌ها نیز در عمق خود، در راستای طولی قطعه کشیده شده‌اند. در شکل ۶-ج تصویر بزرگنمایی سطح شیب‌دار سمت چپ سطح شکست نمایش داده شده است. بر روی این سطح شیب‌دار علاوه بر فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های کوچک، فرورفتگی‌های عمیق‌تر و بزرگ‌تری دیده می‌شود که در امتداد طول قطعه کشیده شده‌اند و بر روی صفحه‌ی مورب با اندکی فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند. چنین فرورفتگی‌ها و حفره‌هایی سبب شده‌اند



صفحات نیز در قبال نیروی برشی کاهش می‌یابد. این نوع شکست را در شکل ۶-ج در نمونه‌ی افقی مشاهده می‌نماییم. اگر نرخ تشکیل حفره‌ها نسبت به نرخ رشد آن‌ها بیشتر باشد، روی صفحات برشی، تعداد زیادی حفره‌ی ریز در مجاورت یکدیگر و در نزدیکی سطح شکست مشاهده می‌شود که امکان پیوستن آن‌ها به یکدیگر نیز وجود دارد. چنان که در شکل ۴-ج بر روی سطح شکست نمونه‌ی عمودی شاهد آن هستیم. این روند شکست، صفحه‌ای شدن حفره‌ها نامیده شده است (شکل ۸-ج). علاوه بر این هنگامی که یک حفره‌ی بزرگ در قطعه وجود دارد و در مسیر چند صفحه‌ی برشی قرار می‌گیرد، شکست با مکانیزم لغزش متناوب اوروان (OAS) رخ می‌دهد (شکل ۸-د). در این شکست بر روی صفحات برشی حفره و تخلخل‌های کم‌تری دیده می‌شود (شکل ۶-ب و ۶-د).

در هر دو نمونه مکانیزم شکست گلوبی شدن حفره‌های داخلی رخ داده‌است که می‌توان این پدیده را به تجمع و قرارگیری حفره‌های اولیه در نمونه‌ی ساخته شده نسبت داد، زیرا مستعد ترین نواحی برای پیش‌روی این مکانیزم شکست هستند. در نمونه‌ی افقی بیشتر حفره‌ها و فرورفتگی‌ها در راستای طول نمونه رشد یافته‌اند در حالی که در نمونه‌ی عمودی چنین اتفاقی نمی‌افتد و علت این رخداد، آن است که در هنگام ساخت نمونه‌ی افقی، لایه‌ها در امتداد طول نمونه اسکن می‌شوند و بنابراین عیوب در میان لایه‌ها و در راستای طول قطعه ایجاد می‌شوند. این عامل سبب افزایش تعداد مرز دانه‌ها بر سر راه حرکت نایجایی‌ها و عیوب در راستای عمود بر محور اصلی نمونه می‌شود. به همین علت استحکام تسلیم و نهایی در نمونه‌ی افقی بیشتر است. اما در نمونه‌ی عمودی حفره‌های نسبتاً بزرگ در مجاورت لبه‌ها دیده می‌شود که به نظر می‌آید علت آن ازدیاد نرخ سرد شدن شعاع بیرونی لایه‌ها در هنگام لایه‌گذاری نسبت به شعاع داخلی قطعه می‌باشد. همچنین احتمال وقوع عدم ذوب مناسب در انتهای مسیر اسکن و تعویض خط لایه-گذاری در نمونه‌های عمودی وجود دارد. به هر ترتیب در نمونه‌های عمودی، شکست از ناحیه‌ی بیرونی و در اثر اتصال حفره‌ها به لبه شروع می‌شود (شکل ۴-د) و به داخل قطعه انتقال می‌یابد. علت پیشی گرفتن نرخ تشکیل حفره نسبت به نرخ رشد آن در نمونه‌ی عمودی، کم‌تر بودن سخت شونده‌ی در این راستای بارگذاری می‌باشد. زیرا صفحات برشی در نمونه‌ی عمودی با مانع کم‌تری بر سر راه خود روبرو می‌شوند و همین عامل، موجب کاهش تنش تسلیم و افزایش کرنش شکست بیشتر شده است. در نهایت می‌توان گفت صفحه‌ای شدن حفره‌ها در نمونه‌ی عمودی و برش حفره‌های داخلی در نمونه‌ی افقی مکانیزم غالب در روند شکست این دو نمونه می‌باشد. در آینده با مطالعات بیشتر بر روی ریزساختار و روند رشد و تغییرات عیوب در حین بارگذاری می‌توان به ویژگی‌ها و معلومات جامع‌تری از مکانیزم شکست نمونه‌های ساخته شده به روش تولید افزودنی دست یافت.

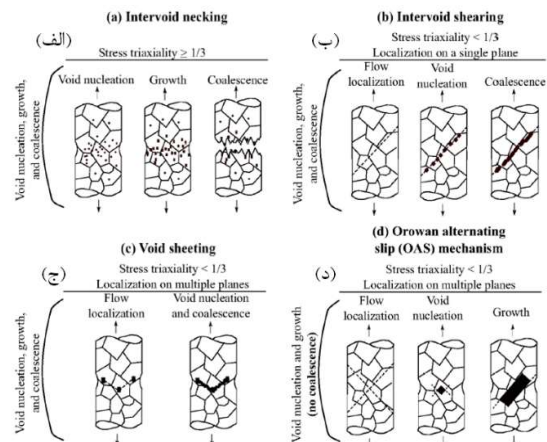
#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله خواص مکانیکی ماده‌ی فولاد ضد زنگ SS316L ساخته شده به روش تولید افزودنی DLMS در دو راستای افقی و عمودی مقایسه گردید و با مشاهده‌ی سطح مقطع شکست این دو نمونه، تفاوت میان مکانیزم شکست نرم در این دو نمونه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

#### ۴- بحث و بررسی پیرامون نتایج

همان‌گونه که از مرور تحقیقات نیز دریافت شد، یکی از عوامل ایجاد ناهمسانگردی و اختلاف بین خواص مکانیکی در نمونه‌های تولید افزودنی، وجود عیوب و حفره‌ها و تفاوت در شکل و موقعیت آن‌ها می‌باشد. از طرفی مکانیزم شکست نرم وابسته به نرخ تشکیل و رشد و جای‌گیری حفره‌ها و حرکت و رفتار عیوب و نایجایی‌ها می‌باشد. بنابراین به همان میزان که وجود عیوب و حفره‌ها در مواد ساخته شده به روش تولید افزودنی اجتناب ناپذیر است، تفاوت در مکانیزم شکست نمونه‌های افقی و عمودی وجود دارد.

برای تحلیل مکانیزم شکست نرم، نوئل و همکارانش مکانیزم‌های مختلف شکست را بررسی و تعریف نموده‌اند که به امکان وقوع همزمان ترکیبی از آن‌ها نیز اشاره شده است. بر اساس این مقاله، مکانیزم‌های شکست نرم به هفت گونه‌ی متفاوت تقسیم بندی شده است: ۱- گلوبی شدن حفره‌های داخلی ۲- برش حفره‌های داخلی ۳- صفحه‌ای شدن حفره‌ها ۴- لغزش متناوب اوروان (Orwan alternating slip) ۵- گلوبی شدن نقطه‌ای ۶- برش شدید تک صفحه‌ای ۷- برش شدید چند صفحه‌ای [۱۵]، شمای تعدادی از این مکانیزم‌های شکست در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸- طرح‌واره‌ی تعدادی از مکانیزم‌های شکست [۱۵]: الف- مکانیزم شکست گلوبی شدن حفره‌های داخلی ب- برش حفره‌های داخلی ج- صفحه‌ای شدن حفره‌های داخلی د- لغزش متناوب اوروان (OAS)

هنگامی که تعداد زیادی از حفره‌ها در مجاورت یکدیگر قرار گرفته باشند، در اثر نیروی کششی رشد پیدا می‌کنند و هم‌زمان با تشکیل حفره‌های جدید به یکدیگر متصل می‌شوند. در این حالت شکست در اثر گلوبی شدن حفره‌های داخلی رخ می‌دهد (شکل ۸-الف). این سطوح شکست، همان‌طور که در شکل‌های ۴-ب، ۵-ج و ۶-ب مشاهده می‌شود، شامل برآمدگی و فرورفتگی‌های فراوان و خلل و فرج نسبتاً بزرگ با جهت‌گیری نامنظم هستند. هنگامی که این حفره‌ها بر روی صفحات برشی قرار می‌گیرند، به واسطه‌ی لغزش صفحات برشی، حفره‌های جدید روی این صفحات تشکیل می‌شوند و رشد می‌یابند و به یکدیگر متصل می‌شوند. به این نوع شکست، مکانیزم برش حفره‌های داخلی می‌گویند (شکل ۸-ب). همچنین نقش عمده را در این شکست حفره‌های رشد یافته ایفا می‌کنند زیرا سطح مقطع نمونه را روی صفحه‌ی برشی کاهش می‌دهند و در نتیجه مقاومت این

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 3, pp. 769-783, 2020.
- [8] R. Casati, J. Lemke, and M. Vedani, "Microstructure and fracture behavior of 316L austenitic stainless steel produced by selective laser melting," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 32, no. 8, pp. 738-744, 2016.
- [9] J. Suryawanshi, K. Prashanth, and U. Ramamurty, "Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 696, pp. 113-121, 2017.
- [10] T. Ronneberg, C. M. Davies, and P. A. Hooper, "Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment," *Materials & Design*, vol. 189, p. 108481, 2020.
- [11] J. N. Dastgerdi, O. Jaber, and H. Remes, "Influence of internal and surface defects on the fatigue performance of additively manufactured stainless steel 316L," *International Journal of Fatigue*, p. 107025, 2022.
- [12] A. Standard, "E8-04," "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards," 2004.
- [13] K. J. Rasmussen, "Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys," *Journal of constructional steel research*, vol. 59, no. 1, pp. 47-61, 2003.
- [14] Y. Ling, "Uniaxial true stress-strain after necking," *AMP Journal of technology*, vol. 5, no. 1, pp. 37-48, 1996.
- [15] P. J. Noell, J. D. Carroll, and B. L. Boyce, "The mechanisms of ductile rupture," *Acta Materialia*, vol. 161, pp. 83-98, 2018.
- در نتایج حاصل از آزمون کشش، تنش تسلیم و تنش نهایی نمونه‌ی افقی بیشتر از نمونه‌ی عمودی و کرنش شکست نمونه-ی افقی کم‌تر از نمونه‌ی عمودی به‌دست آمده است.
  - در نمونه‌ی افقی لایه‌ها در امتداد طول نمونه اسکن می‌شوند و در هنگام ساخت، عیوب نیز در میان لایه‌ها شکل می‌گیرد این عامل سبب می‌شود که حفره‌ها در راستای طول نمونه رشد کنند.
  - در نمونه‌ی افقی تعداد لایه‌های بیشتری در راستای عمود بر جهت بارگذاری نسبت به نمونه‌ی عمودی وجود دارد در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که تعداد مرز دانه‌ها در این راستا بیشتر باشد، این عامل سبب افزایش سخت شونده‌ی ماده‌ی افقی می‌شود که در نتیجه‌ی آن استحکام تسلیم و نهایی آن نیز بیشتر است. از طرف دیگر حرکت صفحات برشی در نمونه‌ی عمودی با مقاومت کم‌تری روبرو است که موجب افزایش طول بیشتر و پلاستیسیته‌ی بالاتر در این نمونه می‌شود.
  - علت تفاوت میان نرخ رشد حفره‌ها و نرخ تشکیل حفره‌ها، وجود اختلاف میان سخت شونده‌ی در این دو نمونه می‌باشد.
  - مکانیزم اصلی شکست در نمونه‌ی افقی برش حفره‌های داخلی و در نمونه‌ی عمودی صفحه‌ای شدن حفره‌ها می‌باشد. علاوه بر آن در هر دو نمونه گلوبی شدن حفره‌های داخلی مشاهده گردید. و در نمونه‌ی افقی مکانیزم شکست OAS نیز دیده شد.
- ۶- مراجع
- [1] Q. Luo, L. Yin, T. W. Simpson, and A. M. Beese, "Effect of processing parameters on pore structures, grain features, and mechanical properties in Ti-6Al-4V by laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, p. 102915, 2022.
- [2] A. Fedorenko *et al.*, "Anisotropy of Mechanical Properties and Residual Stress in Additively Manufactured 316L Specimens," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7176, 2021.
- [3] M. Güden *et al.*, "Orientation dependent tensile properties of a selective-laser-melt 316L stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 824, p. 141808, 2021.
- [4] H. Yang *et al.*, "Effect of laser scanning angle on shear slip behavior along melt track of selective laser melted 316L stainless steel during tensile failure," *Materials Characterization*, vol. 193, p. 112297, 2022.
- [5] J. M. Jeon *et al.*, "Effects of microstructure and internal defects on mechanical anisotropy and asymmetry of selective laser-melted 316L austenitic stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 763, p. 138152, 2019.
- [6] B. Barkia *et al.*, "On the origin of the high tensile strength and ductility of additively manufactured 316L stainless steel: Multiscale investigation," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 41, pp. 209-218, 2020.
- [7] A. Röttger *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel processed by different SLM devices," *The*