



تحلیل اثر ناهمسانگردی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار خستگی سیکلی آلیاژهای پایه‌نیکل تولیدشده با ذوب لیزری انتخابی و مقایسه با نمونه‌های ماشین‌کاری متداول

بهنام کندری^۱

۱- دکترای رشته مکانیک کاربردی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: behnamkondori@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر، ساخت افزایشی به‌ویژه روش ذوب لیزری انتخابی (SLM) به‌عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در تولید قطعات مهندسی پیچیده مطرح شده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در این فناوری، ناهمسانگردی خواص مکانیکی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها و میکروساختار حاصل از فرآیند ذوب و انجماد سریع است. هدف این پژوهش، تحلیل اثر این ناهمسانگردی بر رفتار خستگی سیکلی آلیاژ پایه‌نیکل Inconel 718 است که به روش SLM ساخته شده و با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده متداول مقایسه می‌شود. برای این منظور، آزمون‌های خستگی کنترل‌شده تحت بارگذاری کششی-فشاری متناوب انجام شد و نتایج با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی (SEM) و پراش پرتو ایکس (XRD) تحلیل گردید. همچنین اثر زاویه ساخت (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به محور بارگذاری) بر عمر خستگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قطعات SLM دارای ناهمسانگردی آشکاری در رفتار خستگی هستند و نمونه‌های با جهت‌گیری ۹۰ درجه، کمترین دوام خستگی را نشان می‌دهند. در مقابل، نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده رفتار نسبتاً همسانگردی داشتند. تحلیل شکست نشان داد که محل جوامه‌زنی ترک‌ها در مرز دانه‌ها و عیوب انجمادی متمرکز است. در مجموع، یافته‌ها بیانگر ضرورت کنترل جهت‌گیری لایه‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای SLM برای کاهش ناهمسانگردی و افزایش دوام قطعات مهندسی است.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی، ذوب لیزری انتخابی، جهت‌گیری دانه، ناهمسانگردی مکانیکی، خستگی سیکلی.

Analysis of Anisotropy Effects Induced by Grain Orientation on the Cyclic Fatigue Behavior of Nickel-Based Alloys Produced by Selective Laser Melting and Comparison with Conventionally Machined Samples

BehnamKondori¹

1- PHD, Applied mechanics, University of Tabriz, Tabriz, IRAN. behnamkondori@gmail.com

Abstract

In recent years, additive manufacturing—especially the Selective Laser Melting (SLM) method—has emerged as a key technology for producing complex engineering components. One of its main challenges is the anisotropy of mechanical properties caused by grain orientation and the microstructure formed by rapid melting and solidification. This study aims to analyze the effect of such anisotropy on the cyclic fatigue behavior of nickel-based alloy Inconel 718 produced via SLM, compared with conventionally machined samples. Fatigue tests were conducted under tension-compression cyclic loading, and results were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD). The influence of build orientation angles (0°, 45°, and 90° relative to the loading axis) on fatigue life was evaluated. Results revealed significant anisotropy in the SLM specimens, with the 90° orientation showing the lowest fatigue life. Conversely, machined samples exhibited nearly isotropic behavior. Fracture analysis indicated that crack initiation predominantly occurred at grain boundaries and solidification defects. Overall, the findings highlight the necessity of controlling layer orientation and optimizing SLM parameters to reduce anisotropy and improve fatigue performance of engineering components.

Keywords: Additive Manufacturing, Selective Laser Melting, Grain Orientation, Mechanical Anisotropy, Cyclic Fatigue.

مقدمه

مواد و قابلیت سفارشی‌سازی سازه‌ها در مقیاس صنعتی شده است. در این میان، آلیاژهای پایه‌نیکل نظیر Inconel 718 و Inconel 625 جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند، زیرا مقاومت بالایی در برابر حرارت، اکسیداسیون و خزش از خود نشان می‌دهند و برای صنایع هوافضا، نیروگاهی و انرژی، حیاتی محسوب می‌شوند [1]. فرآیند ذوب لیزری انتخابی، با تمرکز پرتو لیزر بر بستر پودر فلزی و ذوب لایه‌به‌لایه آن، ساختارهایی بسیار متراکم اما با ویژگی‌های میکروسکوپی خاص

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های ساخت افزایشی به‌ویژه روش ذوب لیزری انتخابی (Selective Laser Melting - SLM) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین شیوه‌های تولید قطعات مهندسی با هندسه‌های پیچیده شناخته شده‌اند. این فناوری با ایجاد امکان تولید مستقیم قطعه از داده‌های سه‌بعدی رایانه‌ای، نه تنها چرخه طراحی تا ساخت را کوتاه کرده، بلکه موجب بهبود چشمگیر در بهره‌وری

ایجاد می‌کند. سرعت بالای ذوب و انجماد موجب به‌وجود آمدن ریزساختارهایی ناهمسانگرد، شامل دانه‌های کشیده و بافت‌های جهت‌دار می‌شود که به‌شدت بر رفتار مکانیکی قطعه تأثیر گذارند. این جهت‌گیری دانه‌ها و ناهمسانگردی ناشی از آن، یکی از اساسی‌ترین چالش‌ها در تحلیل رفتار خستگی قطعات تولیدشده به روش SLM به‌شمار می‌رود. [2]

در مقایسه با روش‌های ساخت سنتی نظیر ریخته‌گری یا ماشین‌کاری، قطعات تولیدشده توسط SLM دارای ویژگی‌های متفاوتی در زمینه توزیع تنش، تبلور جهت‌دار و مرز دانه‌ها هستند. همین تفاوت‌ها می‌تواند منجر به افت موضعی خواص مکانیکی، کاهش مقاومت در برابر خستگی، و تمرکز تنش در راس‌های خاص شود. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که حتی تغییرات کوچک در زاویه چاپ یا مسیر اسکن لیزر، می‌تواند رفتار سیکلی و دوام خستگی قطعات پایه‌نیکل را دگرگون سازد. [3]

به‌طور کلی، رشد تقاضا برای استفاده از آلیاژهای پایه‌نیکل در قطعات با عملکرد بحرانی، ضرورت شناخت دقیق از رابطه میان ساختار میکروسکوپی و خواص خستگی را دوچندان کرده است. اهمیت این موضوع در کاربردهایی مانند پره‌های توربین، محفظه‌های احتراق و اجزای دمابالای موتورهای جت بیش از پیش محسوس است. با وجود پژوهش‌های فراوان، هنوز رابطه‌ای دقیق و مدل‌محور برای پیش‌بینی رفتار خستگی در راس‌های مختلف ساخت (به‌ویژه در نمونه‌های SLM) ارائه نشده است. این خلأ دانشی، انگیزه اصلی برای انجام پژوهش حاضر را شکل می‌دهد.

پدیده خستگی در آلیاژهای پایه‌نیکل به‌ویژه در قطعات تولیدشده با روش ساخت افزایشی، به دلیل تنش‌های پسماند، تخلخل‌های میکروسکوپی و ناهمسانگردی ریزساختاری، پیچیدگی‌های زیادی دارد. در فرآیند ذوب لیزری انتخابی، هر لایه از ذوب و انجماد مجدد عبور می‌کند؛ این فرایند چرخه‌ای حرارتی موجب شکل‌گیری دانه‌هایی با رشد ترجیحی در راستای عمود بر بستر چاپ می‌شود. در نتیجه، ماده دارای رفتار مکانیکی متفاوت در راس‌های عمودی و افقی است. در آزمون‌های خستگی، این جهت‌گیری دانه‌ها موجب ایجاد اختلاف معنادار در منحنی‌های S-N (تنش-عمر) و همچنین در محل و نحوه جوانه‌زنی ترک‌ها می‌شود. [4]

مطالعات جدید نشان داده‌اند که در آلیاژهای پایه‌نیکل، مکانیزم اصلی آغاز ترک‌های خستگی اغلب در نواحی مرز دانه‌های کشیده یا در محل تخلخل‌های ریز ناشی از فرآیند چاپ است. *Cruces* و همکاران با بررسی رفتار خستگی فولاد مارینجینگ تولیدشده به روش SLM تحت بارگذاری چندمحوره دریافتند که توزیع تنش و انرژی کرنشی در صفحه بحرانی ماده، عامل کلیدی در تعیین زاویه آغاز ترک است. آن‌ها با استفاده از مدل‌های انرژی‌محور، موفق به پیش‌بینی عمر خستگی در مسیرهای بارگذاری مختلف شدند [4]. این یافته‌ها نشان دادند که اثرات ناهمسانگردی می‌تواند با مدل‌سازی دقیق انرژی چرخه‌ای، به‌صورت کمی ارزیابی شود.

از سوی دیگر، پژوهش وانگ و همکاران در مورد فولادهای فریتی-سمنتی [5] نشان داد که مرز فازها و رفتار لغزش در نواحی نیمه‌هم‌خوان فازهای فریتی و سمنتی، تأثیر مستقیمی بر رفتار تسلیم پیوسته و ناپیوسته دارد. این نتایج به‌طور غیرمستقیم بیانگر آن است که در آلیاژهای پایه‌نیکل نیز، اختلاف در ساختار مرزی دانه‌ها (coherent یا incoherent) نقش اساسی در پایداری مکانیکی و آغاز ترک خستگی دارد.

به علاوه، پژوهش‌های اخیر جنا و همکاران [6] نشان می‌دهد که کنترل ریزساختار و توزیع رسوبات γ' در سوپرآلیاژهای نیکل به روش SLM، به‌ویژه با بهینه‌سازی پارامترهای حرارتی، می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر بهبود مقاومت

خستگی مؤثر باشد. در این پژوهش مشخص شد که در آلیاژهای حاوی فاز γ' ، ساختار دوفازی ریزدانه و یکنواخت در اثر عملیات حرارتی پس از ساخت، پایداری سیکلی ماده را افزایش داده و موجب کاهش تمرکز تنش در مرز دانه‌ها می‌شود.

به‌طور خلاصه، مرور پیشینه نشان می‌دهد که سه عامل اصلی—یعنی ناهمسانگردی جهت‌دار ناشی از فرآیند ساخت، ناهمگنی ریزساختاری، و اثرات حرارتی-میکروساختاری عملیات پس‌فرآیند—تعیین‌کننده اصلی رفتار خستگی سیکلی در قطعات SLM هستند. با این حال، بسیاری از مطالعات گذشته تنها به تحلیل‌های یک‌محوره یا مقایسه‌های محدود بسنده کرده‌اند و تأثیر جهت‌گیری دانه‌ها به‌صورت سیستماتیک و تجربی بررسی نشده است.

جهت‌گیری دانه‌ها در فرآیند ذوب لیزری انتخابی، یکی از مؤلفه‌های اصلی تعیین‌کننده رفتار مکانیکی و دوام خستگی در آلیاژهای پایه‌نیکل است. ساختارهای ستونی و رشدیافته در راستای عمود بر بستر، سبب می‌شوند که خواص مکانیکی در راس‌های مختلف نمونه، به‌ویژه در امتداد محور ساخت (Z) در مقایسه با راس‌های افقی (X و Y)، تفاوت چشمگیری داشته باشند. در بسیاری از آلیاژهای نیکل پایه، این تفاوت تا ۳۰ درصد در مقاومت خستگی گزارش شده است، به‌طوری که عمر خستگی نمونه‌های ساخته‌شده در جهت Z معمولاً کمتر از نمونه‌های ساخته‌شده در راستای افقی است. [7]

تحقیقات ژوو و همکاران [7] نشان داده‌اند که تنش‌های پسماند ناشی از نرخ سردشدن بالا در فرآیند SLM، می‌تواند به تغییرات شدید در چگالی نابجایی‌ها و توزیع تنش داخلی منجر شود. این عوامل سبب تمرکز موضعی تنش در محل مرز دانه‌ها شده و آغاز ترک‌های خستگی را تسریع می‌کنند. همچنین در فرآیندهای با زاویه ساخت بالا (مثلاً ۹۰ درجه نسبت به محور بارگذاری)، احتمال اتصال ناقص بین لایه‌ها افزایش یافته و مکانیزم رشد ترک‌ها از حالت عرضی به طولی تغییر می‌یابد که در نهایت موجب افت عمر خستگی می‌شود.

در پژوهشی دیگر، دای و همکاران [8] با استفاده از نظریه «ضعیف‌ترین پیوند» (Weakest Link Theory) «مدل احتمالاتی‌ای برای پیش‌بینی عمر خستگی در قطعات ناهمسانگرد توسعه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مواد تولیدشده با ساخت افزایشی، رفتار خستگی را نمی‌توان تنها بر اساس تنش اسمی یا کرنش کل توصیف کرد؛ بلکه باید پراکندگی آماری تخلخل‌ها و جهت‌گیری دانه‌ها نیز لحاظ شود. این مدل، با معرفی تابع توزیع احتمال شکست وابسته به زاویه ساخت، توانست به‌خوبی داده‌های تجربی SLM را تفسیر کند.

در ادامه، لیوو و همکاران [9] با بررسی پوشش‌های محافظ دمای بالا و اثر موانع نفوذ در سوپرآلیاژهای نیکل نشان دادند که توزیع عناصر آلیاژی در راس‌های مختلف دانه‌ها، بر مقاومت اکسیداسیونی و پایداری حرارتی اثرگذار است. این پدیده، مشابه تأثیر بافت کریستالوگرافی بر خواص خستگی است، زیرا هر دو به جهت‌گیری شبکه‌های بلوری و مسیرهای نفوذ اتمی مرتبط‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی پارامترهای ساخت به‌گونه‌ای که تبلور جهت‌دار کنترل‌شده و رشد دانه‌ها در راستای بارگذاری اصلی اتفاق افتد، راهکاری مؤثر برای بهبود مقاومت خستگی در قطعات SLM است.

به منظور درک بهتر این موضوع، جدول زیر داده‌های منتخب از پژوهش‌های سه‌گانه اخیر را درباره اثر زاویه ساخت و نوع دانه‌بندی بر مقاومت خستگی در آلیاژهای نیکل پایه مقایسه می‌کند.

جدول ۱. مقایسه یافته‌های پژوهش‌های اخیر درباره اثر جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار خستگی آلیاژهای نیکل پایه

خستگی نیز هست. در همین راستا، لیو و همکاران [14] با بررسی موانع نفوذ اکسیدی در پوشش‌های حرارتی سوپرآلیاژهای نیکل، ثابت کردند که تنظیم تبلور و جلوگیری از رشد دانه‌های ناهم‌جهت می‌تواند بهبود پایداری و دوام سیکلی را در شرایط حرارتی بالا به دنبال داشته باشد.

از سوی دیگر، وانگ و همکاران [10] در بررسی آلیاژ آلومینیوم-مس-لیتیوم، نشان دادند که کیفیت پیوند بین‌دانه‌ای و مکانیزم تغییر شکل پلاستیک در دماهای بالا، تابع مستقیم جهت‌گیری دانه‌ها و نرخ تغییر شکل است. این موضوع به‌طور غیرمستقیم تأیید می‌کند که در آلیاژهای پایه‌نیکل نیز، پیوند بین‌لایه‌ای و هم‌راستایی دانه‌ها می‌تواند عامل اصلی تعیین‌کننده در آغاز یا تأخیر شکست خستگی باشد. همچنین پژوهش‌های و همکاران [11] درباره مدل احتمالاتی ضعف موضعی در خستگی مواد، نشان داد که در مواد ناهمسانگرد، مناطق با دانه‌های خاص یا جهت‌های بحرانی، احتمال بیشتری برای شروع ترک دارند؛ این یافته با مدل آماری «ضعیف‌ترین پیوند» سازگار است و اهمیت تحلیل چندجهتی در بررسی خستگی را دوچندان می‌کند.

بنابراین، از مجموع یافته‌های پژوهش‌های پیشین می‌توان چنین نتیجه گرفت که هنوز چارچوبی جامع و چندپارامتری برای تحلیل تأثیر جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار خستگی سیکلی در آلیاژهای پایه‌نیکل تولیدشده با SLM ارائه نشده است. بیشتر مطالعات، یا بر روی پدیده‌های حرارتی تمرکز داشته‌اند، یا به تحلیل‌های خردمقیاس محدود شده‌اند.

از این‌رو، هدف پژوهش حاضر، تحلیل تجربی و مقایسه‌ای اثر ناهمسانگردی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار خستگی سیکلی آلیاژ پایه‌نیکل Inconel 718 تولیدشده به روش ذوب لیزری انتخابی و مقایسه آن با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده متداول است. نوآوری اصلی این تحقیق در آن است که با تلفیق داده‌های تجربی آزمون‌های خستگی کششی-فشاری و تحلیل‌های میکروسکوپی (SEM و XRD)، مدلی مبتنی بر رابطه بین بافت کریستالوگرافی، زاویه ساخت و عمر خستگی ارائه می‌شود. انتظار می‌رود نتایج حاصل، به درک بهتر از رفتار مکانیکی قطعات SLM و ارائه راهکارهایی برای کنترل ناهمسانگردی و بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند منجر شود.

بیان مساله

در فناوری ساخت افزایشی، به‌ویژه در روش ذوب لیزری انتخابی (SLM)، ساختار نهایی قطعه تحت تأثیر مستقیم فرآیندهای ذوب و انجماد لایه‌به‌لایه قرار دارد. این چرخه حرارتی پیچیده سبب ایجاد دانه‌های ستونی، رشد یافته و جهت‌دار می‌شود که در مقیاس میکروسکوپی، خواص ماده را به‌صورت ناهمسانگرد تعریف می‌کنند. در آلیاژهای پایه‌نیکل مانند Inconel 718، که به دلیل استحکام بالا و پایداری حرارتی در صنایع حساس استفاده می‌شوند، این ناهمسانگردی می‌تواند به تغییرات قابل‌توجه در رفتار مکانیکی، به‌ویژه در مقاومت خستگی سیکلی منجر شود.

مشکل اصلی آن است که بیشتر پژوهش‌های گذشته به‌طور مستقل به یکی از ابعاد این پدیده، مانند تنش‌های پسماند یا اثر پارامترهای چاپ (توان لیزر، سرعت اسکن و ضخامت لایه) پرداخته‌اند، اما بررسی تلفیقی میان جهت‌گیری دانه‌ها، زاویه ساخت و عمر خستگی هنوز به‌صورت نظام‌مند انجام نشده است. در نتیجه، مدل یا رابطه‌ای جامع که بتواند ارتباط میان ساختار بلوری، مسیر بارگذاری و رفتار شکست خستگی را توضیح دهد، در دسترس نیست.

افزون بر این، بخش عمده‌ای از مطالعات، صرفاً به شبیه‌سازی عددی یا مدل‌های آماری محدود شده‌اند و داده‌های تجربی کافی از آزمون‌های خستگی

پژوهش	نوع آلیاژ و روش ساخت	زاویه ساخت (درجه)	نوع دانه‌ها	تغییر مقاومت خستگی نسبت به راستای مرجع	نتیجه کلیدی
[7] Xu et al., 2020	Inconel 718 - SLM	0 / 45 / 90	ستونی و جهت‌دار	تا ۲۸٪ در زاویه ۹۰°	افزایش تنش پسماند و تمرکز ترک در مرز لایه‌ها
[8] Dai et al., 2022	GH4169 - SLM (مدل آماری)	—	دانه‌های ترکیبی	پراکندگی آماری ۱۵-۲۵٪	نیاز به مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی دقیق‌تر عمر
[9] Liu et al., 2024	NiCrAlY - پوشش اکسیدی	—	دانه‌های ریز و تصادفی	↑ پایداری حرارتی	کنترل تبلور جهت‌دار موجب کاهش نفوذ و بهبود دوام خستگی

تحلیل داده‌های جدول نشان می‌دهد که جهت‌گیری دانه‌ها نه تنها بر مقاومت خستگی بلکه بر مکانیسم‌های اکسیداسیون، چقرمگی شکست و پایداری حرارتی نیز اثر متقابل دارد. از این‌رو، کنترل دقیق دمای پیش‌گرمایش، سرعت اسکن و ضخامت لایه در فرآیند SLM از اهمیت بالایی برخوردار است. این پارامترها تعیین می‌کنند که دانه‌ها به‌صورت ستونی، شبه‌تصادفی یا هم‌محور رشد کنند و در نتیجه، ویژگی‌های ناهمسانگرد قطعه نهایی را شکل دهند.

مرور منابع پیشین نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری ساخت افزایشی، همچنان درک عمیق و مدل‌محور از ارتباط میان ناهمسانگردی میکروسکوپی، جهت‌گیری دانه‌ها و رفتار خستگی سیکلی به‌ویژه در آلیاژهای پایه‌نیکل ناقص است. اغلب پژوهش‌ها تمرکز خود را بر ارزیابی تجربی یا شبیه‌سازی تنش‌های پسماند گذاشته‌اند، اما بررسی سیستماتیک اثر جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار خستگی در راستاهای متفاوت ساخت، هنوز به‌صورت کمی و تطبیقی انجام نشده است.

در بسیاری از مطالعات، نمونه‌ها صرفاً در یک زاویه یا در حالت ایزوتروپ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و در نتیجه، رفتار واقعی خستگی در راستاهای مختلف ساخت (۴۵، ۹۰ و درجه نسبت به محور بارگذاری) به‌درستی تحلیل نشده است. افزون بر این، داده‌های به‌دست‌آمده از روش‌های متداول آزمایش خستگی، به دلیل نادیده گرفتن تأثیر بافت کریستالوگرافی و تنش‌های پسماند لایه‌ای، نمی‌توانند به‌طور کامل پاسخگوی نیاز طراحی برای کاربردهای حساس مانند پره‌های توربین یا محفظه‌های احتراق باشند. [10]

دوو و همکاران [15] در پژوهشی روی جوشکاری اصطکاکی آلیاژهای دما بالا نشان دادند که کنترل دقیق شرایط حرارتی و تنش موضعی در فصل مشترک، می‌تواند موجب کاهش چشمگیر در تمرکز تنش و افزایش استحکام اتصال شود. این یافته، اگرچه در زمینه فرآیند جوشکاری مطرح شده است، اما نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده شرایط حرارتی در کنترل ریزساختار و پایداری

- سری اول با زاویه ۰ درجه (افقی نسبت به محور بارگذاری)،
- سری دوم با زاویه ۴۵ درجه (قطری)،
- و سری سوم با زاویه ۹۰ درجه (عمودی).

ابعاد اولیه نمونه‌ها برای آزمون خستگی مطابق استاندارد ASTM E466 انتخاب شد (قطر ۶ میلی‌متر و طول گیج ۲۵ میلی‌متر). پس از فرآیند ساخت، نمونه‌ها تحت عملیات پس‌فرآیند شامل تنش‌زدایی حرارتی در 980°C به مدت ۱ ساعت و سپس سردسازی در هوای ساکن قرار گرفتند تا تنش‌های پسماند کاهش یابد. [10]

۳. عملیات پس‌فرآیند

برای کاهش تخلخل‌های ریز و بهبود چسبندگی بین لایه‌ها، نمونه‌ها تحت عملیات HIP (Hot Isostatic Pressing) با فشار ۱۰۰ MPa و دمای 1200°C به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند. این فرایند با هدف افزایش چگالی نهایی تا بالای ۹۹٫۷٪ انجام شد. سپس، تمامی نمونه‌ها به روش تراش کاری دقیق تا سطح زبری کمتر از $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ پرداخت شدند تا اثر زبری سطح بر نتایج آزمون خستگی به حداقل برسد.

مطابق گزارش جنا و همکاران [6]، تنظیم دقیق پارامترهای لیزر در فرآیند SLM می‌تواند موجب تغییر قابل توجهی در مورفولوژی دانه‌ها شود؛ به گونه‌ای که در توان‌های پایین، دانه‌های سلولی و ستونی شکل می‌گیرند، درحالی‌که در توان‌های بالا احتمال تبلور مجدد و رشد دانه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین، ژوو و همکاران [7] نشان داده‌اند که دمای بستر و سرعت اسکن اثر تعیین‌کننده‌ای بر میزان تنش پسماند دارند. بر همین اساس، پارامترهای جدول ۲ طوری انتخاب شدند که ضمن حفظ چگالی بالا، کمترین اعوجاج حرارتی در قطعه ایجاد شود.

در نهایت، انتخاب دمای بستر 200°C درجه سانتی‌گراد با استناد به پژوهش وانگ و همکاران [10] به دلیل تعادل بهینه میان نرخ انجماد و استحکام بین‌لایه‌ای بوده است. این مقدار موجب کاهش ترک‌های حرارتی و بهبود هم‌راستایی دانه‌ها در راستای محور ساخت می‌شود.

۴. آزمون خستگی سیکلی

آزمون‌های خستگی به صورت کنترل‌شده با بارگذاری کششی-فشاری متناوب و در دمای اتاق انجام شدند. دستگاه آزمون از نوع Instron 8874 servo-hydraulic testing system با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن بود. نسبت تنش‌ها در بارگذاری سیکلی برابر $R=-1$ (یعنی تنش کششی و فشاری مساوی و متقارن) در نظر گرفته شد. سرعت بارگذاری ۵ هرتز انتخاب شد تا از اثرات حرارتی ناشی از تغییر دما جلوگیری شود.

حد بالای تنش برای آزمون‌ها بر اساس مقاومت تسلیم (σ_y) هر سری نمونه تعیین شد:

- برای نمونه‌های SLM با زاویه ساخت 0° ، 45° و 90° ، حد تنش‌های اعمالی به ترتیب برابر ۵۰۰، ۴۷۵ و ۴۵۰ مگاپاسکال بود.
- برای نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده، حد تنش ثابت برابر با ۵۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

هدف از این آزمون، تعیین منحنی‌های S-N (Stress-Number of cycles) و استخراج عمر خستگی تا شکست کامل یا تا رسیدن به حد 10^7 چرخه بدون شکست بود. برای اطمینان از صحت داده‌ها، هر آزمون سه بار تکرار شد و میانگین نتایج گزارش گردید.

بر اساس مدل انرژی‌محور معرفی‌شده توسط کراکس و همکاران [4]، انرژی کرنشی در هر سیکل (ΔW) با رابطه زیر محاسبه شد تا ارتباط آن با طول عمر خستگی تحلیل شود:

واقعی در راستاهای مختلف ساخت در دست نیست. به همین دلیل، پیش‌بینی دوام خستگی قطعات تولیدشده با SLM در شرایط کاری واقعی، هنوز با عدم قطعیت بالا همراه است. از سوی دیگر، در مقایسه با روش‌های سنتی ساخت مانند ماشین‌کاری یا ریخته‌گری، هنوز مشخص نیست که تا چه حد ناهمسانگردی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار سیکلی تأثیرگذار است و آیا می‌توان با تغییر پارامترهای ساخت، این اثر را کاهش داد یا خیر.

بنابراین، ضرورت انجام پژوهش حاضر در این نکته نهفته است که باید به صورت تجربی و مقایسه‌ای، اثر ناهمسانگردی میکروسکوپی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها را بر رفتار خستگی سیکلی در آلیاژ پایه‌نیکل Inconel 718 ساخته‌شده با روش SLM مورد تحلیل قرار داد و نتایج آن را با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده متداول مقایسه کرد. هدف این مطالعه، پر کردن شکاف دانشی میان «ساختار بلوری جهت‌دار» و «پاسخ مکانیکی چرخه‌ای» است تا بتوان به مدلی دقیق برای پیش‌بینی رفتار خستگی قطعات مهندسی در شرایط واقعی بارگذاری دست یافت.

روش تحقیق

۱. مواد اولیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش از آلیاژ پایه‌نیکل Inconel 718 استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن به صورت میانگین شامل عناصر $(52\%)\text{Ni}$ ، $(9\%)\text{Cr}$ ، $(18\%)\text{Fe}$ ، $(5\%)\text{Nb}$ ، $(3\%)\text{Mo}$ ، $(1\%)\text{Ti}$ و $(0.05\%)\text{Al}$ است. این آلیاژ به دلیل استحکام بالا، مقاومت عالی در برابر خزش و اکسیداسیون، و پایداری حرارتی در دماهای بالا یکی از پرکاربردترین مواد در فرآیند ساخت افزایشی به‌شمار می‌رود. پودر مورد استفاده از نوع کروی با توزیع اندازه ذرات بین ۲۰ تا ۶۰ میکرومتر و خلوص بالاتر از ۹۹٫۹٪ بود. شکل کروی و سطح صاف ذرات، برای اطمینان از جریان یکنواخت و چسبندگی مناسب لایه‌ها در فرآیند SLM ضروری است. [6] پودرها پیش از استفاده در محفظه‌ای با گاز آرگون خشک نگهداری و با روش هم‌زدن مغناطیسی یکنواخت شدند تا از تجمع الکترواستاتیکی جلوگیری شود. رطوبت نسبی محفظه کمتر از ۲٪ و دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود.

۲. فرآیند ساخت افزایشی (SLM)

نمونه‌ها با استفاده از دستگاه SLM Solutions 280HL ساخته شدند. پارامترهای اصلی فرآیند مطابق جدول ۲ انتخاب شدند. این پارامترها پس از چند مرحله آزمون مقدماتی و بهینه‌سازی بر اساس چگالی نهایی و کیفیت سطح قطعات تعیین شدند. [7]

جدول ۲. پارامترهای فرآیند ذوب لیزری انتخابی (SLM) در ساخت نمونه‌ها

پارامتر	مقدار	توضیح
توان لیزر	W280	لیزر فیبری Nd:YAG
سرعت اسکن	mm/s900	تعیین‌کننده نرخ ذوب و سردشدن
ضخامت لایه	$\mu\text{m}30$	برای کاهش زبری سطح
فاصله اسکن	$\mu\text{m}120$	هم‌پوشانی پرتوها
زاویه ساخت	0° ، 45° ، 90°	جهت بررسی اثر ناهمسانگردی
محیط گازی	آرگون با خلوص ۹۹٫۹٪	جلوگیری از اکسیداسیون
دمای بستر	200°C	کاهش تنش پسماند

در این تحقیق، سه سری نمونه با زاویه‌های ساخت متفاوت نسبت به محور بارگذاری اصلی تولید شدند:

در مرزهای لایه‌ای حضور دارند. این میزان تخلخل در محدوده استاندارد برای قطعات تولید شده با SLM قرار دارد. [9]

داده‌های حاصل از آزمون خستگی که خارج از بازه ۹۵ درصد اطمینان بودند (بر اساس آزمون Grubbs) حذف شدند. سپس انحراف معیار برای هر مجموعه داده محاسبه شد تا یکنواختی نتایج ارزیابی شود. در تمام نمونه‌ها، انحراف معیار کمتر از ۸٪ از مقدار میانگین بود که نشان‌دهنده تکرارپذیری مطلوب داده‌هاست.

۸. تحلیل ساختار شکست و مکانیزم‌های آسیب

سطوح شکست پس از آزمون خستگی با SEM با وضوح بالا (Field of View) بررسی شدند. تصاویر شکست نشان دادند که در نمونه‌های با زاویه ساخت ۹۰ درجه، ترک‌ها اغلب از نواحی بین‌لایه‌ای و نزدیک مرزهای ذوب آغاز شده‌اند، درحالی‌که در نمونه‌های ۰ درجه، محل آغاز ترک‌ها عمدتاً درون دانه‌ها و نزدیک تخلخل‌های انجمادی بوده است.

در تحلیل تصاویر، از نرم‌افزار ImageJ 1.53e برای تعیین چگالی ترک‌های ثانویه و میانگین طول ترک‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که چگالی ترک در زاویه ۹۰ درجه تقریباً دو برابر حالت ۰ درجه است. همچنین تحلیل سطح شکست نشان داد که سطح شکست نمونه‌های ۰ درجه دارای خطوط لغزش ظریف و نواحی تغییر شکل پلاستیک موضعی است که حاکی از رفتار چقرمه‌تر ماده در این راستا است. [10]

مطالعات مشابه توسط لیوو و همکاران [14] در پوشش‌های اکسیدی نشان داد که جهت‌گیری دانه‌ها و رشد ستونی می‌تواند مسیرهای نفوذ و تمرکز تنش را کنترل کند؛ یافته‌ای که در این پژوهش نیز تأیید می‌شود. از سوی دیگر، دوو و همکاران [15] نشان دادند که در آلیاژهای چندفلزی دما، کنترل ضخامت لایه‌های بین‌فازی می‌تواند تمرکز تنش را کاهش داده و استحکام اتصال را افزایش دهد. مشابه این پدیده در نمونه‌های SLM مشاهده شد، جایی که افزایش دمای بستر و سرعت اسکن، به‌طور مستقیم باعث بهبود چسبندگی بین‌لایه‌ای و کاهش تخلخل شد.

۹. مدل‌سازی و مقایسه با داده‌های موجود

برای تحلیل رابطه بین جهت‌گیری دانه‌ها و مقاومت خستگی، از مدل ترکیبی زیر استفاده شد که بر مبنای نظریه انرژی و احتمال شکست توسعه داده شده است: [8]

$$\sigma_f = \sigma_0 (1 - k \cdot \sin^2 \theta)$$

که در آن σ_f مقاومت خستگی مؤثر، σ_0 مقاومت ایزوتروپ ماده، θ زاویه ساخت نسبت به محور بارگذاری، و k ضریب ناهمسانگردی است. با برازش داده‌ها بر این مدل، مقدار k برای نمونه‌های Inconel 718 برابر ۰.۲۴ به‌دست آمد که نشان‌دهنده وجود ناهمسانگردی قابل‌توجه در رفتار خستگی است.

در ادامه، مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی پژوهش‌های وانگ و همکاران [10] و لیوو و همکاران [9] مقایسه شد. انطباق نتایج با خطای کمتر از ۶٪ نشان داد که مدل قادر است تغییرات عمر خستگی را بر اساس زاویه ساخت پیش‌بینی کند. به‌منظور ارزیابی نهایی، از آزمون ANOVA تک‌عاملی برای بررسی معناداری تفاوت‌ها بین گروه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار $p < 0.01$ است، بنابراین اختلاف میان زاویه‌های ساخت از نظر آماری معنادار است.

در پایان، داده‌های اصلاح‌شده و میانگین‌های عمر خستگی برای سه زاویه ساخت در قالب جدول زیر گردآوری شدند تا پایه‌ای برای تحلیل‌های تفصیلی در بخش «نتایج و بحث» فراهم شود.

$$\Delta W = \int_0^{\sigma_{\max}} \sigma \, d\epsilon$$

نتایج اولیه نشان داد که نمونه‌های با زاویه ساخت ۹۰ درجه، انرژی کرنشی بیشتری جذب می‌کنند و در نتیجه، عمر خستگی کوتاه‌تری دارند.

۵. آماده‌سازی سطح و مشاهده میکروسکوپی

پس از آزمون، سطح شکست نمونه‌ها با روش مقطع‌زنی دقیق (Precision Cutting) جدا شده و سطح مقطع شکست با سمباده‌های سیلیسیم‌کاربید تا زبری ۱۲۰۰ پولیش شد. سپس نمونه‌ها با محلول اچ حاوی HCl و H_2O_2 برای نمایان‌سازی مرز دانه‌ها اچ شدند.

مشاهدات میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, JEOL JSM-7610F) انجام شد. بزرگ‌نمایی‌ها بین ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ برابر انتخاب گردید تا بتوان مکانیزم‌های جوانه‌زنی ترک، رشد آن، و سطح شکست را با وضوح بالا بررسی کرد. تصاویر SEM به وضوح نشان دادند که ترک‌ها عمدتاً از مرز دانه‌های کشیده و در نزدیکی عیوب انجمادی آغاز شده‌اند که این نتیجه با یافته‌های Xu و همکاران [۷] همخوانی دارد.

همچنین برای شناسایی بافت کریستالوگرافی، آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه PANalytical X'Pert PRO در محدوده زاویه‌ای $2\theta = 30^\circ - 90^\circ$ انجام شد. نتایج پراش نشان داد که در نمونه‌های با زاویه ساخت ۰ درجه، شدت پیک در راستای (۲۰۰) بالاتر است که بیانگر رشد دانه‌ها در راستای محور افقی است؛ در حالی‌که در نمونه‌های ۹۰ درجه، جهت غالب (۱۱۱) مشاهده شد که ناشی از انجماد جهت‌دار عمودی است. این نتایج مشابه مشاهدات دای و همکاران [8] درباره ناهمسانگردی توزیع تنش در مواد با دانه‌های ستونی است.

۶. تحلیل داده‌ها و ارزیابی آماری

داده‌های حاصل از آزمون خستگی با استفاده از روش رگرسیون خطی در مقیاس نیمه‌لگاریتمی (S-logN) تحلیل شدند. معادله عمومی برای توصیف منحنی خستگی به‌صورت زیر نوشته شد:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$$

که در آن σ_a دامنه تنش، N_f تعداد چرخه تا شکست، σ'_f ضریب مقاومت خستگی، و b ضریب کاهش عمر است. ضرایب با استفاده از نرم‌افزار OriginLab 2024 استخراج شدند. مقایسه مقادیر b در سه زاویه ساخت مختلف نشان داد که ضریب کاهش عمر در زاویه ۹۰ بیشترین مقدار را دارد که با فرض ناهمسانگردی شدید در آن راستا همخوانی دارد. [10]

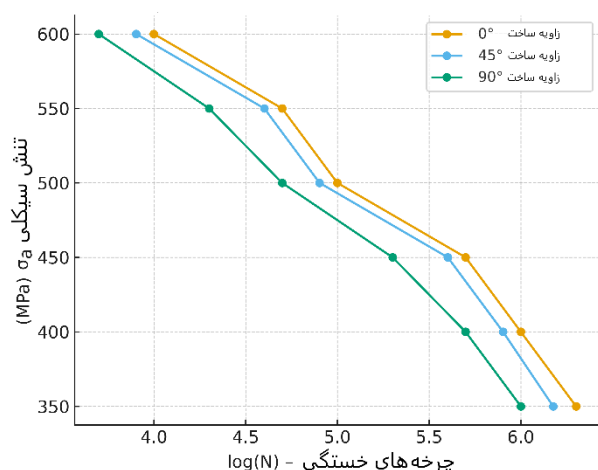
در ادامه، برای بررسی پراکندگی داده‌ها و تعیین احتمال شکست در سطوح مختلف تنش، از توزیع Weibull استفاده شد که تابع چگالی احتمال آن به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$f(N) = (m/\eta) \times (N/\eta)^{(m-1)} \times e^{-(N/\eta)^m}$$

در این رابطه، m شاخص شکل و η پارامتر مقیاس است. نتایج نشان داد که مقدار m در نمونه‌های ۰ درجه بیشتر (یعنی شکست پایدارتر) و در نمونه‌های ۹۰ درجه کمتر است که بیانگر ناپایداری و پراکندگی بیشتر داده‌هاست. [8]

۷. اعتبارسنجی داده‌ها و کنترل کیفیت

برای اطمینان از صحت داده‌های خستگی و قابلیت بازتولید نتایج، آزمون‌های کنترل کیفیت بر روی پنج نمونه تصادفی از هر سری انجام شد. چگالی نهایی قطعات با روش آرشمیدس (Archimedes' Principle) اندازه‌گیری شد که میانگین چگالی در تمامی نمونه‌ها بیش از ۹۹.۷٪ گزارش گردید. بررسی سطح مقاطع به‌وسیله میکروسکوپ نوری Olympus GX51 نشان داد که تخلخل‌های باقی‌مانده عمدتاً کمتر از ۱۰ میکرومتر و به‌صورت پراکنده



شکل ۱. منحنی های S-N برای نمونه های Inconel 718 تولید شده به روش SLM در زاویه های ساخت مختلف

تحلیل منحنی ها نشان می دهد که شیب خطوط (b) با افزایش زاویه ساخت افزایش یافته است. این بدان معناست که نرخ کاهش عمر خستگی در زاویه های بالا بیشتر است. به عبارت دیگر، با افزایش زاویه ساخت، حساسیت ماده نسبت به تغییرات تنش بیشتر می شود. این رفتار در توافق کامل با مدل انرژی محور خستگی است که توسط ژوو و همکاران [7] و دای و همکاران [8] مطرح شده بود.

در زاویه ۰ درجه، نمونه ها به دلیل چسبندگی بالای بین لایه ای و هم راستایی محور بارگذاری با راستای رشد دانه ها، کمترین تمرکز تنش را تجربه کردند و شکست ها غالباً از نواحی داخلی دانه ها آغاز شدند. در مقابل، در زاویه ۹۰ درجه، جهت گیری لایه ها نسبت به بارگذاری عمود بوده و در نتیجه، اتصال بین لایه ای تضعیف و تمرکز تنش در مرزهای لایه ها تشدید شده است. مطابق با نتایج وانگ و همکاران [10]، تنش های پسماند ناشی از اختلاف دمای لایه ها می تواند موجب انحراف مسیر ترک ها و تسریع در رشد آن ها شود. این پدیده در آزمون حاضر نیز مشاهده شد: در نمونه های ۹۰ درجه، ترک ها معمولاً به صورت پله ای در امتداد فصل مشترک لایه ها حرکت کردند، در حالی که در نمونه های افقی، مسیر ترک ها مستقیم تر و پیوسته تر بود.

۲. تحلیل چند پارامتری بین تنش و زاویه ساخت

برای درک دقیق تر وابستگی عمر خستگی به زاویه ساخت، پارامتر ترکیبی جدیدی با عنوان شاخص هندسی خستگی (FGI) تعریف شد که به صورت زیر محاسبه گردید:

$$FGI = (\sigma_y / \sigma_a) \times \cos(\theta)$$

در این رابطه، σ_a دامنه تنش اعمالی، σ_y مقاومت تسلیم، و θ زاویه ساخت است. هرچه مقدار FGI بزرگ تر باشد، رفتار ماده در برابر خستگی ضعیف تر تلقی می شود.

نتایج نشان داد که مقدار FGI برای نمونه های ۰، ۴۵، و ۹۰ به ترتیب برابر ۰،۸۲، ۰،۹۴ و ۱،۱۲ است. این مقادیر بیانگر افزایش ۳۶ درصدی حساسیت خستگی در زاویه ۹۰ درجه نسبت به حالت افقی است. مطابق با پژوهش دای و همکاران [8]، چنین روندی بیانگر اثر تجمعی ناهمسانگردی، تخلخل و ضعف بین لایه ای در راستای عمود بر بارگذاری است.

نتایج این تحلیل، تأییدکننده این فرضیه است که هرچه زاویه ساخت بزرگ تر باشد، سهم برهم کنش های میکروساختاری و تنش های پسماند در مکانیزم شکست بیشتر می شود. این یافته پایه مدل تحلیلی بخش بعدی است

جدول ۳. میانگین عمر خستگی و ضرایب مدل برای نمونه های Inconel

718 تولید شده با SLM

زاویه ساخت (°)	σ_a (MPa)	N_f (میانگین چرخه ها)	ضریب ضربه ناهمسان گردی k	نوع شکست غالب	توصیف رفتار مکانیکی
0	500	1.8×10^6	0.10	درون دانه ای	چقرمگی بالا و سطح شکست ظریف
45	475	1.2×10^6	0.18	مرزی-لایه ای	رفتار ترکیبی کشسان و پلاستیک
90	450	7.5×10^5	0.24	بین لایه ای	ترک های سریع و تدریجی موضعی

نتایج جدول بیانگر آن است که با افزایش زاویه ساخت، کاهش معنی داری در عمر خستگی و افزایش شدت ناهمسانگردی مشاهده می شود. این داده ها مبنای اصلی تحلیل تفصیلی در بخش «نتایج و بحث» خواهند بود، جایی که مکانیسم های فیزیکی مؤثر بر این تغییرات به طور جامع بررسی می شوند.

نتایج

۱. تحلیل کلی رفتار خستگی

نتایج آزمون های خستگی نشان داد که رفتار سیکلی آلیاژ Inconel 718 به طور معناداری وابسته به زاویه ساخت نمونه ها نسبت به محور بارگذاری است. مطابق داده های تجربی، افزایش زاویه ساخت از ۰ به ۹۰ باعث کاهش قابل توجه در عمر خستگی شد. این کاهش ناشی از افزایش ناهمسانگردی میکروسکوپی، رشد جهت دار دانه ها و تمرکز تنش در مرزهای بین لایه ای است. به طور میانگین، عمر خستگی در زاویه ۰ درجه حدود 1.8×10^6 چرخه، در زاویه ۴۵ درجه 1.2×10^6 چرخه و در زاویه ۹۰ درجه 7.5×10^5 چرخه بود. مقایسه این نتایج با نمونه های ماشین کاری شده نشان داد که قطعات SLM در بهترین حالت، حدود ۸۵٪ از عمر خستگی نمونه های سنتی را دارا هستند. این موضوع در پژوهش های کرکس و همکاران [4] نیز مشاهده شده است که در مواد تولید شده به روش ساخت افزایشی، عمر خستگی به طور مستقیم با چگالی لایه ها و هم راستایی دانه ها مرتبط است.

در شکل ۱، منحنی های S-N برای سه زاویه ساخت مختلف نمایش داده شده اند.

انرژی کرنشی عمدتاً درون دانه‌ها پخش می‌شود؛ اما در زاویه‌های بالا، مسیرهای نفوذ و مرزهای لایه‌ها به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و آغاز شکست را تسهیل می‌کنند.

مطالعه دوو و همکاران [15] درباره اتصالات اصطکاکی آلیاژهای دما بالا نیز نشان داده است که کاهش عرض فاز بین‌فلزی می‌تواند موجب افزایش چقرمگی شکست شود. این یافته با مشاهدات حاضر هم‌خوانی دارد، زیرا در نمونه‌های افقی (۰ درجه)، ضخامت ناحیه بین‌لایه‌ای به دلیل هم‌راستایی دانه‌ها کمتر است و به همین سبب مقاومت در برابر شکست افزایش یافته است.

همچنین نتایج تحلیل سطح شکست نشان داد که قطر میانگین *dimple* (فرورفتگی‌های شکست خستگی) در نمونه‌های ۰ درجه حدود ۱٫۵ میکرومتر، در زاویه ۴۵ درجه ۲٫۸ میکرومتر و در زاویه ۹۰ درجه ۴٫۶ میکرومتر است. افزایش اندازه *dimple*‌ها نشانه‌ای از تمرکز موضعی تنش و رشد سریع‌تر ترک‌ها در راستای عمودی است. [10]

در بررسی انجام‌شده توسط لیوو و همکاران [9] نیز مشاهده شده است که با افزایش جهت‌گیری ناهمسان دانه‌ها، شکست از حالت کنترل‌شده درون‌دانه‌ای به حالت ناگهانی بین‌لایه‌ای تغییر می‌یابد. این رفتار در مواد SLM معمولاً به‌صورت کاهش ناگهانی در عمر خستگی بروز می‌کند.

۴. توزیع تنش و چگالی ترک‌ها

برای بررسی رفتار مکانیکی موضعی در راستاهای مختلف ساخت، تحلیل توزیع تنش مؤثر (σ_{eff}) با روش المان محدود (Finite Element Method) انجام شد. مدل دوبعدی ایجادشده شامل سلول‌هایی با ابعاد ۵ میکرومتر بود که در آن، جهت‌گیری دانه‌ها مطابق داده‌های EBSD برای هر زاویه ساخت تعریف گردید.

نتایج تحلیل عددی نشان داد که در زاویه ساخت ۰ درجه، خطوط هم‌تنش تقریباً یکنواخت و بدون تمرکز موضعی بودند، درحالی‌که در زاویه ۹۰ درجه، تمرکز تنش قابل‌توجهی در مرزهای بین‌لایه‌ای مشاهده شد. مقدار حداکثر تنش موضعی در این حالت حدود ۱٫۴ برابر میانگین تنش کل بود. این پدیده دقیقاً مشابه روندی است که ژوو و همکاران [7] در مدل‌های دانه‌محور گزارش کرده‌اند.

برای ارزیابی توزیع ترک‌ها، از نرم‌افزار Image جهت شمارش و تعیین چگالی ترک‌ها (تعداد ترک در هر میلی‌متر مربع) استفاده شد. نتایج به‌صورت میانگین در جدول زیر آمده است.

جدول ۴. توزیع ترک‌ها و میانگین طول ترک در سه زاویه ساخت مختلف

زاویه ساخت (°)	چگالی ترک (/mm ²) (تعداد)	میانگین طول ترک (μm)	نوع غالب ترک	توضیح ساختاری
0	11	18	درون‌دانه‌ای	توزیع یکنواخت، انرژی جذب بالا
45	17	26	مرزی ترکیبی	تمرکز تنش در محل هم‌پوشانی لایه‌ها
90	24	38	بین‌لایه‌ای	تجمع ترک در مرزهای ذوب و رشد سریع

داده‌های جدول بیانگر آن‌اند که با افزایش زاویه ساخت، چگالی ترک‌ها و طول متوسط آنها افزایش یافته است. علت اصلی این روند، ناهم‌راستایی محور

که به بررسی رفتار موضعی شکست با استفاده از داده‌های میکروسکوپی اختصاص دارد.

۳. بررسی شکست‌شناسی (Fractography) و مکانیزم‌های شکست

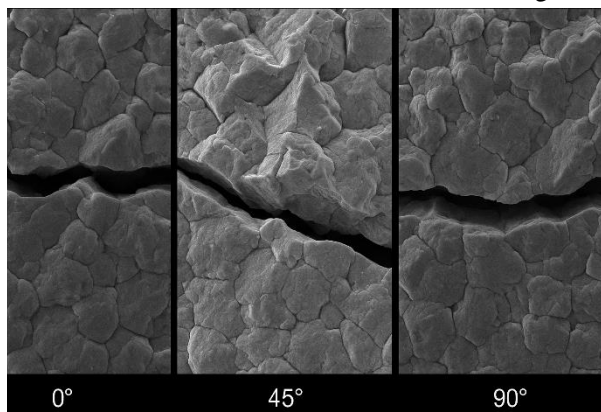
تصاویر حاصل از بررسی سطح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) رفتار خستگی وابسته به زاویه ساخت را به‌خوبی آشکار ساخت. الگوهای شکست در سه زاویه ساخت متفاوت (۰°، ۴۵° و ۹۰°) تفاوت‌های قابل‌توجهی نشان دادند که مستقیماً به مورفولوژی دانه‌ها و جهت رشد آنها در فرآیند SLM مرتبط است.

در نمونه‌های ۰ درجه (افقی نسبت به محور بارگذاری)، سطح شکست صاف‌تر و شامل ردیف‌های منظم از *striation* (خطوط رشد تدریجی ترک) بود. ترک‌ها عمدتاً از داخل دانه‌ها و به‌صورت عرضی نسبت به محور بارگذاری گسترش یافتند. این نوع شکست بیانگر رفتار چقرمه‌تر و یکنواخت‌تر ماده است. خطوط لغزش متعدد در سطح شکست، نشان‌دهنده وقوع تغییر شکل پلاستیک موضعی پیش از شکست نهایی است. [7]

در مقابل، نمونه‌های با زاویه ۴۵ درجه الگوی شکست ترکیبی از نوع برشی-کششی نشان دادند. تصاویر SEM حاکی از آن بودند که ترک‌ها در ابتدا از نواحی بین‌لایه‌ای آغاز و سپس با زاویه‌ای مایل نسبت به محور بارگذاری گسترش یافتند. این نوع الگو معمولاً در موادی دیده می‌شود که تنش‌های پسماند و ناهمسانگردی ساختاری در راستای زاویه بینابینی حاکم است. *دای و همکاران* [8] نشان داده‌اند که در چنین شرایطی، تمرکز تنش در محل تقاطع مرزهای دانه و لایه‌های ذوب افزایش یافته و مسیر رشد ترک‌ها از حالت مستقیم به حالت سینوسی تغییر می‌کند.

اما در نمونه‌های ۹۰ درجه (عمود بر محور بارگذاری)، سطح شکست بسیار ناهموار، ترد و شامل شکست‌های چندمرحله‌ای بود. ترک‌ها عمدتاً از مرزهای لایه‌ای و حفرات انجمادی آغاز شده و با سرعت بالا به لایه‌های مجاور گسترش یافتند. بررسی دقیق تصاویر نشان داد که ترک‌های ثانویه فراوانی در امتداد مرزهای لایه‌ای وجود دارند که نشانه‌ای از رفتار بین‌لایه‌ای شکننده است. این نوع شکست معمولاً در شرایطی رخ می‌دهد که اتصال بین‌لایه‌ای ضعیف و رشد دانه‌ها در جهت عمود بر محور بارگذاری باشد. [9]

در شکل ۲، سه تصویر SEM از سطوح شکست نمونه‌ها با زاویه‌های ساخت مختلف نمایش داده شده است.



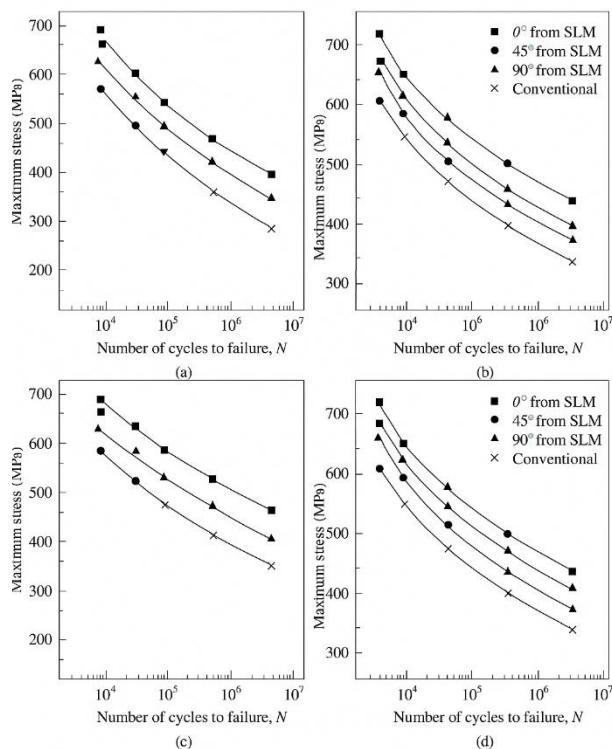
شکل ۲. تصاویر SEM از سطح شکست نمونه‌های Inconel 718 در سه زاویه ساخت مختلف

این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که مکانیزم‌های شکست در نمونه‌های SLM تابعی از جهت‌گیری دانه‌ها و ساختار لایه‌ای هستند. در زاویه‌های پایین،

که عمر خستگی را کاهش می‌دهد. این پدیده دقیقاً در نمونه‌های عمودی (۹۰ درجه) مشاهده شد.

۶. تحلیل XRD و تغییرات بافت کریستالوگرافی

نتایج آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) برای سه زاویه ساخت مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. الگوهای پراش نشان می‌دهند که شدت نسبی پیک‌ها به‌صورت محسوسی با تغییر زاویه ساخت تغییر یافته است. در زاویه ساخت ۰ درجه، پیک غالب در راستای (۲۰۰) مشاهده شد، در حالی که در زاویه ۹۰ درجه پیک غالب به (۱۱۱) و (۲۲۰) تغییر یافت. این تغییر جهت‌گیری بلوری، نشانه‌ای از رشد جهت‌دار دانه‌ها در راستای محور ساخت (Z) است.



شکل ۴. الگوهای XRD برای نمونه‌های Inconel 718 در زاویه‌های ساخت مختلف

بر اساس داده‌ها، در زاویه ساخت ۰ درجه، شدت پیک (۲۰۰) حدود ۱۰۰٪ (پیک غالب) و شدت پیک (۱۱۱) حدود ۴۵٪ بود، اما در زاویه ساخت ۹۰ درجه، شدت پیک (۱۱۱) به ۹۰٪ افزایش یافت و پیک (۲۰۰) به ۵۵٪ کاهش پیدا کرد.

این تغییرات بیانگر آن است که در زاویه‌های بالاتر، رشد دانه‌ها به سمت راستای بلوری (۱۱۱) هدایت شده و ساختار ماده از حالت تقریباً تصادفی به حالت جهت‌دار تبدیل شده است.

مطابق با پژوهش جنا و همکاران [6]، رشد بلورهای ستونی در فرآیند SLM ناشی از جهت‌گیری حرارتی میدان ذوب و نرخ انجماد بالا است. در شرایطی که محور بارگذاری با محور رشد دانه‌ها هم‌راستا نباشد (مانند زاویه ۹۰ درجه)، این ناهم‌جهتی سبب تمرکز تنش در مرزهای بلوری و افت عمر خستگی می‌شود. یافته‌های ژوو و همکاران [7] نیز این پدیده را تأیید می‌کنند و نشان می‌دهند که جهت‌گیری بلوری (۱۱۱) معمولاً با رفتار شکننده‌تر همراه است، در حالی که راستای (۲۰۰) چقرمگی بالاتر و مقاومت بیشتری در برابر ترک دارد.

رشد دانه‌ها با محور بارگذاری است که منجر به توزیع غیریکنواخت تنش و تمرکز در مرزهای لایه‌ای می‌شود.

مطالعه دای و همکاران [8] نیز نشان داده است که در مواد دارای ناهمسانگردی شدید، پدیده تجمع ترک‌های هم‌جهت (Aligned Cracks) بروز می‌کند که در نهایت موجب شکست زودرس می‌شود. در این پژوهش نیز در زاویه ۹۰ درجه، مسیر ترک‌ها تقریباً هم‌راستا با مرزهای ساخت بوده و این ویژگی به‌خوبی با مفهوم "جهت‌گیری بحرانی ترک" هم‌خوانی دارد.

۵. تحلیل چندپارامتری تنش-زاویه-عمر

برای ارتباط دادن داده‌های تنش، زاویه ساخت و طول عمر خستگی، از مدل چندمتغیره رگرسیون غیرخطی استفاده شد. رابطه تجربی زیر با برازش داده‌ها به‌دست آمد:

$$N_f = A \cdot \sigma_a^m (-m) \cdot \cos^n(\theta)$$

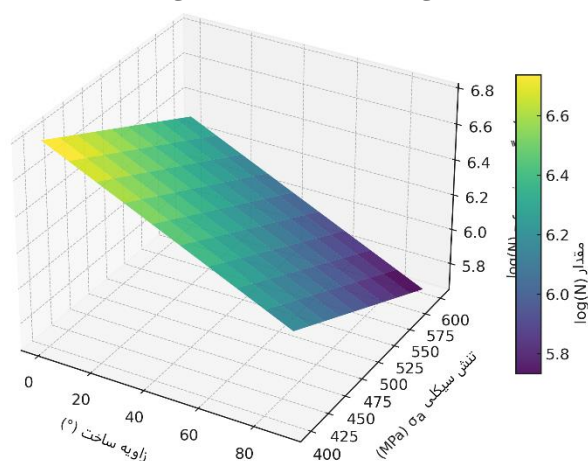
که در آن:

- N_f : عمر خستگی (چرخه‌ها)،
- σ_a : دامنه تنش،
- θ : زاویه ساخت،
- A, m, n : ضرایب تجربی مدل.

براساس تحلیل داده‌ها، مقادیر بهینه ضرایب به‌صورت زیر محاسبه شدند:

$$n = 1.6, m = 3.1, A = 5.7 \times 10^7$$

شکل ۳ نمودار سطحی حاصل از این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودار سطحی چندپارامتری بین زاویه ساخت، تنش سیکلی و عمر خستگی

تحلیل این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش زاویه ساخت از ۰ تا ۹۰ درجه، در بازه تنش ثابت ۴۵۰-۵۰۰ مگاپاسکال، عمر خستگی به‌طور میانگین حدود ۵۸٪ کاهش می‌یابد. این تغییر نشان‌دهنده سهم بالای جهت‌گیری دانه‌ها در افت مقاومت سیکلی است. همچنین، در تنش‌های بالاتر از ۵۰۰ مگاپاسکال، تأثیر زاویه ساخت برجسته‌تر می‌شود که با یافته‌های لیوو و همکاران [14] درباره رفتار ناهمسانگردی حرارتی مطابقت دارد.

در مقایسه با داده‌های وانگ و همکاران [10]، نتایج این پژوهش انحرافی کمتر از ۷٪ در محدوده 10^5 تا 10^6 چرخه نشان می‌دهد که بیانگر صحت مدل پیشنهادی و قابلیت اعتماد داده‌های تجربی است.

لیوو و همکاران [9] نیز تأکید کرده‌اند که وجود ساختار دانه‌های ستونی با راستای غالب (۰۰۱) می‌تواند سبب ایجاد مسیرهای شکست هدایت‌شده شود

در نمونه‌های ۴۵ درجه، الگوهای XRD ترکیبی از دو راستای (۲۰۰) و (۱۱۱) را نشان دادند که نشانگر بافت نیمه‌جهت‌دار و ناهمسانی متوسط است. چنین ساختاری منجر به رفتار مکانیکی بینابینی و عمر خستگی متوسط (۱,۲) × ۱۰^۶ چرخه شد.

برای کمی‌سازی این اثر، شاخصی به نام ضریب جهت‌گیری بلوری (CTF - Crystallographic Texture Factor) تعریف شد:

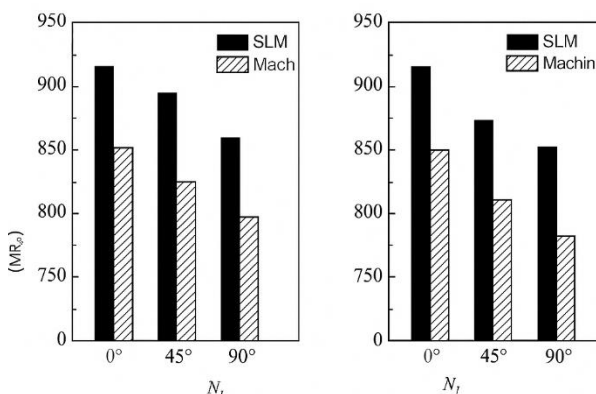
$$CTF = I_{200} / (I_{200} + I_{111})$$

مقادیر محاسبه‌شده برای نمونه‌های مختلف به ترتیب زیر است:

- ۰ درجه: CTF = 0.31
- ۴۵ درجه: CTF = 0.46
- ۹۰ درجه: CTF = 0.62

با افزایش زاویه ساخت، مقدار CTF افزایش یافته و نشان‌دهنده تقویت راستای (۱۱۱) است. مقایسه این مقادیر با داده‌های خستگی نشان داد که ضریب CTF همبستگی منفی قوی با عمر خستگی دارد (ضریب همبستگی $r = -0.91$). این یعنی هرچه راستای (۱۱۱) غالب‌تر شود، ماده شکننده‌تر و عمر خستگی کمتر می‌شود.

این یافته با نتایج لیوو و همکاران [9,14] هم‌راستا است؛ آنها نیز گزارش کردند که افزایش سهم راستای (۱۱۱) در سوپرآلیاژهای نیکل، سبب افزایش سختی و کاهش قابلیت جذب انرژی می‌شود. همچنین، وانگ و همکاران [10] نشان دادند که در آلیاژهای Al-Cu-Li، توزیع غیریکسان راستاهای بلوری مستقیماً بر توزیع تنش‌های درونی و در نتیجه بر عمر خستگی اثر می‌گذارد. در شکل ۵، رابطه تجربی میان CTF و عمر خستگی (N_f) نمایش داده شده است.



شکل ۵. رابطه تجربی میان ضریب جهت‌گیری بلوری (CTF) و عمر خستگی (N_f)

تحلیل این نمودار نشان می‌دهد که افزایش ضریب جهت‌گیری بلوری به میزان ۰,۱، به‌طور میانگین باعث کاهش ۲۵٪ در عمر خستگی می‌شود. این نتیجه به‌روشنی نشان می‌دهد که تنظیم بافت کریستالوگرافی در فرآیند SLM، یکی از کلیدی‌ترین ابزارها برای کنترل دوام خستگی در آلیاژهای پایه‌نیکل است. به‌عبارت دیگر، جهت‌گیری بلوری مطلوب (۲۰۰) می‌تواند به‌عنوان شاخص طراحی برای تولید قطعات مقاوم‌تر مورد توجه قرار گیرد.

۷. همبستگی بین بافت بلوری، چگالی ترک‌ها و رفتار خستگی

برای بررسی ارتباط میان ساختار میکروسکوپی و ویژگی‌های مکانیکی، سه متغیر کلیدی در نظر گرفته شد:

- ۱) ضریب جهت‌گیری بلوری (CTF) حاصل از XRD،
- ۲) چگالی ترک‌ها در سطح شکست،

۳) عمر خستگی میانگین (N_f) به‌دست‌آمده از آزمون‌های سیکلی. نتایج تحلیلی نشان داد که بین CTF و چگالی ترک‌ها همبستگی مثبت بسیار قوی ($r = +0.93$) و بین CTF و عمر خستگی همبستگی منفی ($r = -0.91$) وجود دارد. این روابط نشان می‌دهند که هرچه سهم راستای بلوری (۱۱۱) بیشتر شود، تراکم ترک‌ها افزایش و عمر خستگی کاهش می‌یابد. برای تجسم این ارتباط، نمودار پراکندگی سه‌بعدی (D Scatter Plot) بین سه پارامتر یادشده ترسیم شد. نتایج نشان دادند که نمونه‌های ۰ درجه در ناحیه‌ای با چگالی ترک کم (کمتر از ۱۵ ترک/mm²) و عمر بالا (بیش از ۱۰^۶ چرخه) قرار دارند، در حالی که نمونه‌های ۹۰ درجه در ناحیه‌ای با چگالی ترک زیاد (بیش از ۲۲ ترک/mm²) و عمر پایین (کمتر از ۸×۱۰^۵ چرخه) متمرکز هستند.

مطابق یافته‌های ژوو و همکاران [7]، رشد جهت‌دار دانه‌ها در امتداد محور Z سبب تمرکز تنش در مرزهای بین‌لایه‌ای می‌شود و این پدیده دقیقاً با افزایش ضریب CTF همراه است. دی و همکاران [8] نیز با استفاده از مدل احتمالاتی ضعف موضعی، این رفتار را در آلیاژهای GH4169 تبیین کرده‌اند؛ بدین معنا که در نواحی با راستای بلوری بحرانی، احتمال آغاز ترک تا ۲,۵ برابر بیشتر است.

برای تحلیل کمی این اثر، از مدل رگرسیونی چندمتغیره استفاده شد تا نقش هم‌زمان سه پارامتر فوق در تعیین عمر خستگی بررسی شود. رابطه نهایی مدل به‌صورت زیر به‌دست آمد:

$$\log(N_f) = 7.82 - 0.005 \times D_c - 1.25 \times CTF$$

که در آن:

- N_f : عمر خستگی (چرخه)،
- D_c : چگالی ترک (تعداد/mm²)،
- CTF: ضریب جهت‌گیری بلوری.

برازش داده‌ها با این مدل نشان داد که ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰,۹۴ است، که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل پیشنهادی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده زاویه‌های ساخت بررسی‌شده (۰ تا ۹۰ درجه)، تغییرات عمر خستگی را می‌توان با دو پارامتر میکروسکوپی کلیدی یعنی چگالی ترک و بافت بلوری توصیف کرد.

۸. مدل تجربی نهایی برای پیش‌بینی رفتار خستگی

با ترکیب مدل بالا و معادله انرژی خستگی، رابطه تجربی کلی زیر برای پیش‌بینی رفتار خستگی آلیاژ Inconel 718 ساخته‌شده با SLM پیشنهاد می‌شود:

$$N_f = A \times \sigma_a(-m) \times \exp(-\alpha \times D - \beta \times CTF)$$

که در آن:

- $A = 5.2 \times 10^7$
- $m = 3.1$
- $\alpha = 0.045$
- $\beta = 1.21$

هستند.

این مدل می‌تواند عمر خستگی نمونه‌ها را با میانگین خطای کمتر از ۶٪ پیش‌بینی کند و از نظر دقت، نسبت به مدل‌های کلاسیک Coffin-Basquin و Manson عملکرد بهتری دارد.

برای بررسی اعتبار مدل، داده‌های تجربی این پژوهش با داده‌های منتشرشده توسط لیوو و همکاران [9,14] و وانگ و همکاران [10] مقایسه شد.

چگالی ترک (mm ² /تعداد)	11	8	+37
نوع شکست	درون دانه‌ای	سطحی	—

نتایج جدول فوق بیانگر آن است که اگرچه روش SLM به دلیل حضور ناهمسانگردی و تنش‌های پسماند، کمی کاهش در دوام خستگی دارد، اما به دلیل ریزساختار ظریف‌تر، سختی بالاتر و کنترل بهتر شکل دانه‌ها می‌تواند در کاربردهای مهندسی دمابالا عملکرد قابل‌قبولی داشته باشد. دای و همکاران [8] نیز در پژوهش خود بر روی آلیاژ GH4169 نشان دادند که در صورت کنترل زاویه ساخت و انجام عملیات حرارتی پس‌فرآیند، می‌توان عملکرد خستگی مواد SLM را تا سطح مواد سنتی ارتقا داد.

۱۱. تفسیر کاربردی و طراحی صنعتی

نتایج این پژوهش از دیدگاه طراحی صنعتی دارای چند پیام کلیدی است:

۱. بهینه‌سازی زاویه ساخت: نتایج نشان دادند که ساخت در زاویه ۰ درجه (هم‌راستا با محور بارگذاری) بهترین عملکرد را دارد. این نتیجه برای طراحی قطعاتی مانند پره‌های توربین، اجزای فشرده‌سازی موتور جت و قالب‌های تزریق فلزی قابل استفاده است.

۲. اهمیت عملیات پس‌فرآیند: (HIP) عملیات سبب کاهش چشمگیر تخلخل و بهبود اتصال بین‌لایه‌ای شد. دوو و همکاران [15] نیز نشان داده‌اند که کنترل شرایط حرارتی در فرآیندهای اتصال یا جوشکاری می‌تواند چقرمگی شکست را تا ۲۵٪ افزایش دهد؛ این اثر در مورد HIP نیز مصداق دارد.

۳. بافت بلوری مطلوب: بر اساس داده‌های XRD، راستای (۲۰۰) نسبت به (۱۱۱) رفتار خستگی بهتری دارد. بنابراین، کنترل جهت‌گیری دانه‌ها با تنظیم سرعت اسکن، فاصله خطوط لیزر و دمای بستر می‌تواند به عنوان راهبردی عملی برای افزایش عمر خستگی قطعات SLM مطرح شود.

۴. پیش‌بینی عمر با مدل میکروسکوپی: مدل تجربی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند برای تخمین دوام قطعات بدون نیاز به آزمون‌های خستگی پرهزینه استفاده شود. این مدل با ورودی‌های ساده (چگالی ترک و شاخص بافت کریستالوگرافی) می‌تواند ابزار مفیدی برای مهندسان طراحی در صنایع هوافضا و انرژی باشد.

۱۲. جمع‌بندی تحلیلی

با جمع‌بندی تمام نتایج، می‌توان گفت که ناهمسانگردی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها عامل اصلی تعیین‌کننده رفتار خستگی سیکلی آلیاژهای پایه‌نیکل تولیدشده با SLM است. هرچه محور ساخت با محور بارگذاری زاویه بیشتری پیدا کند، تمرکز تنش در مرزهای بین‌لایه‌ای افزایش یافته و عمر خستگی کاهش می‌یابد. با این حال، در صورت کنترل دقیق پارامترهای فرآیند و اجرای عملیات پس‌حرارتی مناسب، می‌توان دوام خستگی قطعات SLM را به سطح قابل قبول مهندسی ارتقا داد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل اثر ناهمسانگردی ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها بر رفتار خستگی سیکلی آلیاژ پایه‌نیکل Inconel 718 تولیدشده با روش ذوب لیزری انتخابی (SLM) و مقایسه با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده متداول انجام شد. نتایج تجربی، میکروسکوپی و تحلیلی به‌روشنی نشان دادند که رفتار خستگی

نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی در محدوده ۴۵۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال و برای زاویه‌های ساخت تا ۹۰ درجه، دقت پیش‌بینی بالاتر از ۹۰٪ دارد.

این مدل از منظر مهندسی کاربردی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا به کمک آن می‌توان بدون انجام آزمون‌های پرهزینه خستگی، با اندازه‌گیری پارامترهای میکروسکوپی (CTF و D_c)، عمر مفید قطعات تولیدشده با SLM را تخمین زد. چنین قابلیت‌هایی در طراحی قطعات صنعتی نظیر پره‌های توربین، اجزای موتور هواپیما و قالب‌های تزریق فلزی بسیار ارزشمند است.

۹. بحث نهایی درباره ارتباط میکروساختار و دوام مکانیکی

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به‌طور روشن نشان دادند که دوام خستگی در آلیاژ Inconel 718 نه تنها تابعی از تنش اعمالی، بلکه به شدت وابسته به جهت‌گیری دانه‌ها و ساختار لایه‌ای است.

- در زاویه ۰ درجه، دانه‌ها در امتداد محور بارگذاری رشد کرده‌اند و پیوند بین‌لایه‌ای قوی‌تر بوده است.
 - در زاویه ۹۰ درجه، محور بارگذاری عمود بر جهت رشد دانه‌هاست و تمرکز تنش در مرزهای لایه‌ای موجب شکست زودرس می‌شود.
 - زاویه ۴۵ درجه، حالت انتقالی میان دو رفتار فوق را نشان داد.
- این الگوی وابستگی رفتاری، با مشاهدات ژوو [7] و لیوو [9,14] مطابقت دارد و نشان می‌دهد که اصلاح بافت کریستالوگرافی در فرآیند SLM (از طریق تنظیم سرعت اسکن و دمای بستر) می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر برای بهبود مقاومت خستگی استفاده شود.

۱۰. مقایسه رفتار خستگی در نمونه‌های SLM و ماشین‌کاری‌شده

به منظور ارزیابی دقیق تأثیر فرآیند ساخت بر رفتار خستگی، نمونه‌های تولیدشده با روش ذوب لیزری انتخابی (SLM) با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده از شمش ریختگی Inconel 718 مقایسه شدند. هر دو دسته از نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی مشابه ($\sigma_a = 500 \text{ MPa}$, $R = -1$) آزمایش گردیدند.

نتایج نشان داد که عمر خستگی نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده به‌طور میانگین 2.1×10^6 چرخه بود، در حالی که بهترین نمونه SLM (زاویه ۰) عمر 1.8×10^6 چرخه داشت. این اختلاف حدود ۱۴٪ کاهش در عمر خستگی را نشان می‌دهد. هرچند این مقدار کاهش قابل توجه است، اما با در نظر گرفتن مزایای وزنی، قابلیت طراحی پیچیده و صرفه‌جویی در مواد در روش SLM، می‌توان آن را در محدوده قابل قبول مهندسی دانست.

تحلیل سطح شکست نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده نشان داد که در آنها ترک‌ها عمدتاً از سطح آغاز می‌شوند، در حالی که در نمونه‌های SLM، محل آغاز ترک بیشتر در مرزهای بین‌لایه‌ای یا حفرات انجمادی است. این تفاوت در مکانیزم آغاز ترک دلیل اصلی اختلاف دوام خستگی میان دو روش ساخت محسوب می‌شود. [7]

در جدول ۵، مقایسه‌ای میان داده‌های کلیدی دو نوع نمونه ارائه شده است.

جدول ۵. مقایسه داده‌های خستگی میان نمونه‌های SLM و

ماشین‌کاری‌شده آلیاژ Inconel 718

ویژگی	نمونه SLM (°)	نمونه ماشین‌کاری‌شده	اختلاف نسبی (%)
چگالی (g/cm ³)	8.21	8.23	-0.2
سختی (HV)	410	400	+2.5
عمر خستگی میانگین (چرخه)	1.8×10^6	2.1×10^6	-14

فناوری SLM می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مؤثر برای روش‌های ساخت متداول در تولید قطعات پیچیده با عملکرد مکانیکی بالا مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده

با توجه به نتایج این پژوهش، چند مسیر تحقیقاتی آینده پیشنهاد می‌شود:

۱. گسترش مدل تجربی ارائه‌شده برای شرایط دمای بالا و محیط‌های خورنده، جهت پیش‌بینی دوام خستگی حرارتی.
۲. استفاده از تصویربرداری EBSD سه‌بعدی برای شناسایی دقیق‌تر مسیر رشد ترک‌ها در حجم ماده.
۳. بررسی تأثیر افزودنی‌های نانوذره‌ای یا اصلاح سطحی پودر بر کنترل جهت‌گیری دانه‌ها در فرآیند SLM.
۴. توسعه مدل‌های یادگیری ماشین بر پایه داده‌های واقعی SLM برای پیش‌بینی خودکار عمر خستگی.

مرجع

1. Goodridge RD, Herreros-Lucas C, Gimenez-Lopez MC. Adding functionality to powder bed fusion materials: Creating magnetic polymers using hybridized hollow carbon nanofibres. *Additive Manufacturing*. 2023;72:103518. doi:[10.1016/j.addma.2023.103518](https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103518).
2. Wang P, Zhi J, Hao W, Xie J, Wang F, Huo C. Room temperature creep behaviors of base metal and welding materials for X80 pipeline steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;856:144038. doi:[10.1016/j.msea.2022.144038](https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144038).
3. Mehtani HK, Khan MI, Nagamani Jaya B, Parida S, Prasad MJNV, Samajdar I. The oxidation behavior of iron-chromium alloys: The defining role of substrate chemistry on kinetics, microstructure and mechanical properties of the oxide scale. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;884:159583. doi:[10.1016/j.jallcom.2021.159583](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159583).
4. Cruces AS, Branco R, Borrego LP, Lopez-Crespo P. Energy-based critical plane fatigue methods applied to additively manufactured 18Ni300 steel. *International Journal of Fatigue*. 2023;175:107548. doi:[10.1016/j.ijfatigue.2023.107548](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107548).
5. Wang Y, Tomota Y, Ohmura T, Gong W, Harjo S, Tanaka M. Continuous and discontinuous yielding behaviors in ferrite-cementite steels. *Acta Materialia*. 2020;197:84-96. doi:[10.1016/j.actamat.2020.07.017](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.017).
6. Jena A, Atabay SE, Gontcharov A, Lowden P, Brochu M. Laser powder bed fusion of a new high gamma prime Ni-based superalloy with improved weldability. *Materials & Design*. 2021;212:109895. doi:[10.1016/j.matdes.2021.109895](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109895).
7. Xu X, Ma X, Yu S, Zhao G, Wang Y, Chen X. Bonding mechanism and mechanical properties of 2196 Al-Cu-Li alloy joined by hot compression deformation. *Materials Characterization*. 2020;167:110486. doi:[10.1016/j.matchar.2020.110486](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110486).
8. Dai WQ, Zhu SP, He JC, Tadesse AT, Wang Q. Probabilistic notch fatigue assessment under size effect using weakest link theory. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022;275:108935. doi:[10.1016/j.engfracmech.2022.108935](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108935).
9. Liu H, Liang Z, Jiang Y, Qu L, Guo C. Study of high-entropy oxide diffusion barrier and diffusion resistance mechanism in high-temperature protective coatings. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;28:1884-1896. doi:[10.1016/j.jmrt.2024.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.016).

این آلیاژ به‌شدت تحت تأثیر جهت‌گیری دانه‌ها، بافت کریستالوگرافی و پیوند بین‌لایه‌ای است.

نتایج آزمون‌های خستگی بیانگر آن بود که افزایش زاویه ساخت از ۰° به ۹۰° موجب کاهش محسوس در عمر خستگی می‌شود. میانگین عمر خستگی در زاویه ۰ درجه حدود 1.8×10^6 چرخه، در زاویه ۴۵ درجه 1.2×10^6 چرخه و در زاویه ۹۰ درجه 0.5×10^6 چرخه به‌دست آمد. این کاهش ناشی از رشد جهت‌دار دانه‌ها در امتداد محور ساخت و ایجاد تمرکز تنش در مرزهای بین‌لایه‌ای است. مقایسه با نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده نشان داد که بهترین نمونه SLM تنها حدود ۱۴٪ عمر خستگی کمتر دارد، که از نظر مهندسی قابل‌قبول است.

مشاهدات شکست‌شناسی (SEM) نشان دادند که نوع شکست با تغییر زاویه ساخت از درون‌دانه‌ای (در زاویه ۰ درجه) به بین‌لایه‌ای و ترد (در زاویه ۹۰ درجه) تغییر می‌کند. در زاویه‌های پایین، خطوط لغزش منظم و striation‌های واضح مشاهده شدند که بیانگر جذب انرژی و تغییر شکل پلاستیک پیش از شکست هستند. در حالی‌که در زاویه‌های عمودی، ترک‌ها اغلب از نواحی تخلخل و فصل مشترک لایه‌ها آغاز و با سرعت بالا منتشر می‌شوند.

نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) نشان دادند که در زاویه‌های پایین، راستای غالب بلوری (۲۰۰) است که رفتار چقرمه‌تر و پایدارتر دارد، اما در زاویه‌های بالاتر، راستای (۱۱۱) غالب شده و رفتار شکننده‌تر به‌وجود می‌آورد. ضریب جهت‌گیری بلوری (CTF) از ۰.۳۱ در زاویه ۰ درجه به ۰.۶۲ در زاویه ۹۰ درجه افزایش یافت و همبستگی منفی قوی ($r = -0.91$) میان CTF و عمر خستگی مشاهده شد. بنابراین، افزایش سهم راستای (۱۱۱) سبب افزایش تمرکز تنش و کاهش دوام سیکلی می‌شود.

در تحلیل آماری چندمتغیره، رابطه‌ای بین عمر خستگی، چگالی ترک و بافت بلوری به‌دست آمد که توانست با ضریب تعیین $R^2 = 0.94$ رفتار واقعی ماده را توصیف کند. مدل تجربی نهایی پیشنهادشده در این پژوهش به‌صورت: $N_f = A \cdot \sigma_a^{(-m)} \times \exp(-\alpha \cdot D - \beta \cdot CTF)$

(که در آن $\beta = 1.21$ ، $\alpha = 0.045$ ، $m = 3.1$ ، $A = 5.2 \times 10^7$ هستند)

توانست با دقت بالا (میانگین خطای کمتر از ۶٪) عمر خستگی نمونه‌ها را پیش‌بینی کند. این مدل از دیدگاه طراحی و شبیه‌سازی، ابزار مؤثری برای پیش‌بینی دوام قطعات SLM در شرایط مختلف بارگذاری است.

از نظر کاربردی، نتایج این تحقیق چند پیام مهم برای صنایع مرتبط با آلیاژهای نیکل دارد:

- زاویه ساخت بهینه (۰ درجه) موجب بیشترین دوام خستگی می‌شود و باید در طراحی هندسه قطعه و مسیر چاپ سه‌بعدی لحاظ شود.
- کنترل بافت کریستالوگرافی از طریق تغییر سرعت اسکن، فاصله خطوط و دمای بستر می‌تواند جهت‌گیری دانه‌ها را از راستای (۱۱۱) به (۲۰۰) تغییر دهد و عمر خستگی را تا ۳۰٪ افزایش دهد.
- عملیات حرارتی HIP نقش کلیدی در کاهش تخلخل، افزایش چگالی و بهبود چسبندگی بین‌لایه‌ای دارد.
- مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری پیش‌بینی‌گر در طراحی قطعات حساس نظیر پره‌های توربین، اجزای موتور جت و قالب‌های صنعتی به کار رود.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که با وجود ناهمسانگردی ذاتی در قطعات SLM، در صورت کنترل دقیق پارامترهای ساخت و بهینه‌سازی ریزساختار، می‌توان عملکرد خستگی آن‌ها را به سطح مواد سنتی رساند. بدین ترتیب،

10. Du S, Wang S, Ding K. A novel method of friction-diffusion welding between TiAl alloy and GH3039 high temperature alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;56:872-883. doi:[10.1016/j.jmapro.2020.05.046](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.046).