

بررسی مواد و بهینه سازی طراحی قطعات هوافضا با فناوری ساخت افزایشی

حمید مسفروش^{۱*}، محمدرضا پاکمنش^۲، محمدرضا فاضل پرور^۳

^{۱*} کارشناس محقق، پژوهشکده مواد و انرژی پژوهشگاه فضایی ایران؛ h.mesforoush@isrc.ac.ir

^۲ هیات علمی، پژوهشکده مواد و انرژی پژوهشگاه فضایی ایران؛ mr.pakmanesh@isrc.ac.ir

^۳ کارشناس محقق، پژوهشکده مواد و انرژی پژوهشگاه فضایی ایران؛ mr.fazelparvar@isrc.ac.ir

چکیده

ساخت افزایشی در سال های اخیر به عنوان یکی از فناوری های تحول آفرین در صنعت هوافضا مطرح شده و با ایجاد امکان ساخت قطعات پیچیده، سبک و سفارشی سازی شده، مرزهای طراحی و تولید را گسترش داده است. سرعت بالای ساخت، کاهش زمان چرخه توسعه محصول و توانایی بهره گیری از مواد پیشرفته فلزی، پلیمری و سرامیکی از جمله مزایایی است که این فناوری را به گزینه ای جذاب برای کاربردهای حساس هوایی و فضایی تبدیل کرده است. روش های گوناگون ساخت افزایشی همچون SLM، EBM و FDM هر یک بر اساس ماهیت فرایند و نوع ماده، در بخش های مختلف صنعت هوافضا به کار گرفته می شوند و امکان تولید قطعاتی نظیر اجزای موتور، ساختارهای سبک هواپیما، کانال های خنک کاری پیچیده و قطعات ماهواره ای را فراهم ساخته اند. با وجود این قابلیت ها، محدودیت هایی همچون نوع مواد اولیه در دسترس، افت رفتار خستگی، ناهمگنی ریزساختاری، چالش های کیفیت سطح، محدودیت اندازه قطعه و نیاز به عملیات پس پردازش همواره مورد توجه محققان قرار دارد. استفاده از شبیه سازی های عددی، بهینه سازی توپولوژی و کنترل دقیق پارامترهای فرایند در جهت بهبود کیفیت و تکرارپذیری قطعات تولیدی نقش مهمی ایفا می کند. با توسعه مواد جدید، اتوماسیون پیشرفته و ادغام هوش مصنوعی در طراحی و کنترل فرایند، آینده ای روشن برای گسترش کاربرد ساخت افزایشی در هوافضا پیش بینی می شود. در این مقاله به ارزیابی روش های اصلی ساخت افزایشی برای کاربردهای آن در صنعت هوافضا، چالش های فنی و محدودیت های موجود، انواع مواد قابل استفاده، نقش شبیه سازی و بهینه سازی، و همچنین روندهای آینده این فناوری پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی، صنعت هوافضا، بهینه سازی، روش ساخت و طراحی

مقدمه

ساخت افزایشی (Additive Manufacturing) یا AM که به چاپ سه بعدی نیز شناخته می شود، فرآیندی است که در آن مواد به صورت لایه لایه و با کنترل نرم افزاری روی هم قرار می گیرند تا طرح دیجیتالی به یک جسم فیزیکی تبدیل شود. این فرآیند معمولاً توسط چاپگرهای سه بعدی و با استفاده از نرم افزارهای طراحی به کمک رایانه (CAD) انجام می شود و مزایایی چون سرعت بالا، سهولت در اجرا و صرفه جویی در مصرف مواد دارد. از مهم ترین ویژگی های آن، امکان تولید سریع قطعات پیچیده و پیشرفته است؛ بنابراین این فناوری به عنوان روش نمونه سازی سریع نیز شناخته می شود [۷-۱]. برخلاف روش های سنتی تولید که با برداشتن مواد از قطعات بزرگ تر یا ورق های فلزی کار می کنند، چاپ سه بعدی با افزودن مواد و شکل دهی مستقیم، امکان استفاده بهینه از مواد و دستیابی به دقت بالا را فراهم می کند. امروزه، در بسیاری از صنایع، ساخت افزایشی در کنار روش های سنتی مانند ساخت کاهشی به کار گرفته می شود که به ظهور شرکت های تخصصی قطعه سازی منجر شده است. ویژگی های منحصر به فرد ساخت افزایشی، از جمله ساخت سریع و قابل تنظیم، سبب شده است این فناوری در حوزه های متنوعی مانند پزشکی، الکترونیک، هوافضا و خودروسازی به کار گرفته شود. به ویژه در صنعت هوافضا، ساخت افزایشی برای ساخت قطعات مختلف و سبک سازی ساختارها با حفظ خواص مکانیکی اهمیت ویژه ای یافته است. فرآیندهای رایج در این صنعت شامل ذوب انتخابی لیزری (SLM)، تفجوشی انتخابی لیزری (SLS)، ذوب پرتو الکترونی (EBM) و مدل سازی رسوب ذوبی (FDM) هستند. قابلیت کنترل ریزساختار و تولید ساختارهای سبک و پیچیده، این فناوری را از مرحله نمونه سازی سریع به یک روش تولید مستقیم محصولات با کیفیت بالا و تقریباً نهایی تبدیل کرده است [۸-۱۲].

با وجود این پیشرفت‌ها، چاپ سه‌بعدی هنوز یک فناوری در حال توسعه به خصوص در صنعت هوافضا می‌باشد. تا قبل از سال ۲۰۱۴ فرایند ساخت افزودنی بیشتر برای تولید قطعات پلیمری در این صنایع مورد استفاده قرار می‌گرفت. در سال ۲۰۱۴ شرکت SpaceX در موشک Falcon 9 بدنه والو اکسدایزر یکی از ۹ موتور Merlin را با استفاده از تکنولوژی ساخت افزودنی تولید نمود که نتایج آزمایشات مؤید خواص مکانیکی بالاتر این قطعه در مقایسه با سایر قطعات مشابه تولید شده با روش‌های سنتی بودند. نکته جالب‌تر این بود که این قطعه در کمتر از دو روز ساخته شد درحالی‌که استفاده از روش‌های سنتی نیاز به زمانی در حدود چندین ماه داشت. پس از آن شرکت Aerojet Rocketdyne یک موتور کامل موشک را با استفاده از روش ساخت افزودنی تولید نمود که همچنان در حال استفاده است. همزمان، این فناوری با چالش‌های فنی پیچیده‌ای روبه‌روست که نیازمند تحقیقات علمی و توسعه مداوم است. امروزه بسیاری از شرکت‌های بزرگ و پیشرو در زمینه ساخت تجهیزات هوافضا در حال بررسی امکان جایگزینی تولید به روش ساخت افزودنی با روش‌های قدیمی‌تر تولید قطعات و تجهیزات می‌باشند. به‌عنوان مثال شرکت Thales Alenia Space که یک شرکت پیشرو در زمینه ساخت تجهیزات فضایی می‌باشد در حال مطالعه بر روی جایگزینی تجهیزات مختلف در دو ماهواره با وزن، اندازه و طراحی مختلف (Sentinel 3 و Euclid) با تجهیزات مشابه ساخته شده توسط فرایند چاپ سه‌بعدی می‌باشد. این تجهیزات از جنس تیتانیوم، آلومینیوم و Invar می‌باشند. تحقیقات اولیه نشان می‌دهد که استفاده از تکنولوژی چاپ سه‌بعدی موجب کاهش وزن، کاهش زیاده‌های تولید شده و کاهش نسبی هزینه تولید گردیده است. به طور خلاصه می‌توان بیان کرد که در حال حاضر تکنولوژی ساخت افزودنی در حال گذر از ساخت قطعات ساده‌تر با حساسیت کمتر به ساخت قطعات پیچیده‌تر با حساسیت بیشتر می‌باشد. سازنده‌های بزرگ و پیشرو در ساخت تجهیزات فضایی در جهان امروزه توجه خاصی به این تکنولوژی در تولید قطعات و تجهیزات فضایی نموده‌اند [۱۶-۱۳].

هدف از فرآیندهای ساخت افزایشی، ساخت و ادغام لایه‌ها با روش‌های مختلف است. بسته به مکانیزم شکل‌گیری هر لایه، این فرآیندها را می‌توان به هفت دسته شامل اسپری چسب، اکستروژن مواد، رسوب انرژی‌دار، اسپری مواد، همجوشی بستر پودر، ورقه‌ورقه کردن صفحات نازک و فوتوپلیمریزاسیون تقسیم کرد. همچنین، چاپ سه‌بعدی از دو منظر قابل دسته‌بندی است: (i) بر اساس حالت فیزیکی ماده اولیه (جامد، مایع یا پودر) و (ii) بر اساس روش ذوب یا پخت مواد، مانند گرما، نور فرابنفش، لیزر یا پرتو الکترونی [۱۹-۱۷]. از میان این روش‌ها، چند فناوری اصلی در صنعت هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارند که در ادامه به اختصار معرفی می‌شوند:

• مدل سازی رسوب ذوبی (Fused Deposition Modeling (FDM)

مدل‌سازی رسوب ذوبی یکی از متداول‌ترین روش‌های ساخت افزایشی است که با رسوب لایه‌به‌لایه مواد ترموپلاستیکی، قطعات سه‌بعدی تولید می‌کند. فرآیند FDM شامل طراحی مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار CAD، تبدیل آن به فرمت STL، برش لایه‌ای مدل توسط نرم‌افزار Slice و چاپ لایه‌به‌لایه قطعه با استفاده از چاپگر سه‌بعدی است. پس از چاپ، عملیات پس‌پردازش بر روی قطعه انجام می‌شود تا خواص نهایی و دقت ابعادی بهبود یابد. در کاربردهای پیشرفته، به ویژه در صنعت هوافضا، مواد تقویت‌کننده مانند الیاف کربن یا نخ‌های طبیعی به ماده پایه اضافه می‌شوند تا استحکام کششی و مقاومت مکانیکی قطعات افزایش یابد. این رویکرد امکان تولید قطعات سبک و پیچیده بدون نیاز به قالب‌گیری را فراهم می‌کند و موجب صرفه‌جویی در زمان و مواد می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که پارامترهای فرآیند FDM، از جمله ضخامت لایه، تعداد پوسته، روش پر کردن و درصد پر شدن، نقش حیاتی در تعیین مقاومت مکانیکی قطعات دارند. درصد پر شدن به‌ویژه بر مقاومت فشاری و خمشی تأثیرگذار است و سایر پارامترها نقش ثانویه دارند. علاوه بر این، ترکیب بهینه پارامترها امکان دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب برای کاربردهای هوافضا را فراهم می‌کند، جایی که قطعات باید همزمان سبک و مقاوم باشند. با توجه به این ویژگی‌ها، FDM به عنوان یک روش سریع، اقتصادی و انعطاف‌پذیر برای تولید قطعات پلیمری و کامپوزیتی، به‌ویژه در صنایع حساس مانند هوافضا، شناخته می‌شود و قابلیت تولید اجزای پیچیده با خواص مکانیکی قابل قبول را دارد [۲۰-۲۲].

• ذوب لیزری انتخابی (Selective Laser Melting (SLM)

ذوب لیزری انتخابی یکی از فناوری‌های پیشرفته و آینده‌دار در حوزه ساخت افزایشی به‌شمار می‌رود که در دسته فرآیندهای همجوشی بستر پودر قرار دارد. این فناوری با حذف یا کاهش نیاز به عملیات پس از تولید، امکان ساخت مستقیم قطعات سه‌بعدی را فراهم می‌کند. فرآیند SLM عمدتاً شامل آماده‌سازی مواد و چاپ سه‌بعدی است؛ به‌طوری‌که ابتدا مدل سه‌بعدی توسط نرم‌افزارهای CAD طراحی و پس از تبدیل به فرمت STL برش داده می‌شود. سپس لیزر پرنانه‌ای به‌صورت لایه‌به‌لایه پودر فلزی را ذوب کرده و با تکرار فرآیند پخش و ذوب، قطعه نهایی شکل می‌گیرد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پارامترهای فرآیند SLM تأثیر متفاوتی بر خواص قطعات تولیدی دارند. برای مثال، توان و سرعت اسکن لیزر اثر قابل‌توجهی بر دقت ابعادی داشته، اما تأثیر آن‌ها بر خواص الاستیک محدود است، در حالی که نوع سلول واحد و ابعاد ساختار نقش تعیین‌کننده‌ای

در خواص مکانیکی ایفا می‌کنند. همچنین، آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم تولیدشده به روش SLM به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای هوافضا محسوب می‌شوند. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عملیات حرارتی در برخی آلیاژها، مانند Scalmalloy®، تأثیر محدودی بر خواص مکانیکی دارد، در حالی که در آلیاژ Ti-6Al-4V، فرآیندهای پس‌پردازش می‌توانند نقایص و تنش‌های پسماند را کاهش دهند. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به دلیل خواصی نظیر سختی ویژه بالا و ضریب انبساط حرارتی نزدیک به صفر، توجه زیادی را در صنایع پیشرفته به‌ویژه هوافضا به خود جلب کرده‌اند. با وجود محدودیت‌های تولید و هزینه، فناوری SLM به‌عنوان رویکردی نویدبخش، پتانسیل بالایی برای غلبه بر چالش‌های ساخت و توسعه این مواد پیشرفته نشان می‌دهد [۲۳-۲۷].

مواد و روش پژوهش

این پژوهش از نوع مروری نظام‌مند است و با هدف جمع‌بندی، طبقه‌بندی و مقایسه دانش موجود درباره مواد قابل استفاده و رویکردهای بهینه‌سازی طراحی قطعات هوافضا در فناوری ساخت افزایشی با توجه به نیاز پژوهشکده مواد و انرژی انجام شده است. رویکرد تحلیل در این مقاله کیفی - توصیفی و تطبیقی بوده و تمرکز آن بر استخراج روندها، چالش‌ها، راهکارهای فنی، و شکاف‌های پژوهشی است.

نتایج و بحث

الف - ملاحظات مواد در صنایع هوافضا

مواد سازه‌ای هوانوردی به موادی اطلاق می‌شود که در اجزای اصلی هواپیما، به‌ویژه بدنه و موتور، مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این میان، مواد موتور از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم، فولادهای با استحکام بالا و سایر فلزات سنتی سهم عمده‌ای از این مواد را تشکیل می‌دهند، هرچند امروزه با رقابت فزاینده‌ای از سوی کامپوزیت‌های پلیمری، کامپوزیت‌های زمینه فلزی و مواد غیرفلزی مواجه هستند [۲۸]. به طور کلی، مواد مورد استفاده در هواپیما به مواد بدنه، مواد موتور و پوشش‌ها تقسیم می‌شوند که مهم‌ترین آن‌ها مواد سازه‌ای بدنه و مواد موتور هستند. مواد غیرسازه‌ای شامل موادی نظیر اجزای شفاف، تجهیزات کابین، مواد تزئینی و قطعات جانبی سیستم‌های هیدرولیک و تهویه مطبوع بوده و اگرچه از تنوع بالایی برخوردارند، سهم کمتری در جرم کلی هواپیما دارند. الزامات عملکردی اجزای سازه‌ای هوافضا عمدتاً بر کاهش وزن، استحکام مکانیکی بالا و مقاومت مطلوب در برابر ضربه متمرکز است. در این راستا، مواد اولیه سازگار با فناوری‌های ساخت افزایشی در صنعت هوافضا شامل فلزات و آلیاژها، سرامیک‌ها، پلیمرها و انواع مواد کامپوزیتی هستند که امکان پاسخ‌گویی همزمان به این الزامات را فراهم می‌کنند که در ادامه به بررسی هر کدام از این موضوعات پرداخته می‌شود.

• فلزات و آلیاژها

ساخت افزایشی به طیف گسترده‌ای از مواد نیاز دارد و با گسترش کاربردها و پیشرفت فناوری، مواد جدید به‌طور مستمر معرفی می‌شوند. پژوهش‌های متعددی بر استفاده از آلیاژهای مختلف در فرآیندهای ساخت افزایشی متمرکز شده‌اند. حداقل ضخامت لایه در این فناوری، بسته به نوع فرآیند و خواص فیزیکی ماده، معمولاً در بازه ۲۰ تا ۱۰۰ میکرومتر قرار دارد. در ساخت قطعات هوافضایی، فلزاتی نظیر فولادهای ابزار و ضدزنگ، آلیاژهای تیتانیوم، نیکل و آلومینیوم بیشترین کاربرد را دارند، هرچند فلزات گران‌بها مانند طلا، پلاتین و نقره نیز برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. جدول ۱ برخی از مواد معمول فلزی مورد استفاده در صنعت هوافضا را نشان می‌دهد.

در میان این مواد، آلیاژهای پایه تیتانیوم و پایه نیکل از اهمیت ویژه‌ای در صنعت هوافضا برخوردارند. سوپرآلیاژهای پایه نیکل به دلیل عملکرد عالی در دماهای بالا و مقاومت مناسب در محیط‌های خورنده و اکسیدکننده، گزینه‌ای ایده‌آل برای اجزای در معرض شرایط کاری شدید محسوب می‌شوند. با وجود تمایل این آلیاژها به ترک‌خوردگی در فرآیند ساخت افزایشی، استفاده از روش‌هایی مانند پرس ایزواستاتیک گرم می‌تواند خواص مکانیکی آن‌ها را بهبود بخشد [۲۹-۳۳]. از سوی دیگر، توسعه ساختارهای دوفلزی و چندماده‌ای با ترکیب آلیاژهای مختلف هوافضایی، امکان ارتقای قابل‌توجه خواص ترموفیزیکی و مکانیکی را فراهم کرده است. به‌ویژه آلیاژهای NiTi به دلیل برخورداری از اثر حافظه شکلی و فوق‌الاستیسیته، کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند. با توجه به حساسیت بالای خواص این آلیاژها به پارامترهای فرآیند، به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشینی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی شرایط ساخت افزایشی، نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده است [۳۴]. قابل ذکر است که آلیاژ Ti-6Al-4V به دلیل استحکام بالا، چقرمگی شکست مناسب، چگالی کم و مقاومت مطلوب در برابر خوردگی، توجه ویژه‌ای در صنعت هوافضا به خود جلب کرده است. با این حال، علی‌رغم مزایای قابل‌توجه ساخت افزایشی این آلیاژ، چالش‌هایی نظیر بهبود خواص خستگی همچنان باقی است. مطالعات نشان می‌دهد که زبری

سطح نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار خستگی دارد و به‌کارگیری فرآیندهای تکمیلی سطحی و عملیات پس‌پردازش می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد خستگی قطعات تولیدشده با روش‌های SLM و EBM را ارتقا دهد [۳۸-۳۵].

جدول ۱: مواد فلزی مورد استفاده در ساخت افزایشی در صنعت هوافضا [۳۸-۲۸].

کاربرد در صنعت هوا فضا	سیستم‌های ساخت افزایشی	نقطه ذوب (°C)	ماده اولیه فلزی
قطعات موتور، سازه بدنه، اجزای توربین، اتصالات سبک‌وزن	PBF (SLM/EBM), DED	1660	Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)
محفظه احتراق، نازل راکت، قطعات مقاوم به حرارت بالا	PBF, DED	1336-1600	Inconel 718 (Superalloy)
نازل‌ها، آگزوز موتور جت، اجزای مقاوم به خوردگی	PBF, DED	1290-1350	Inconel 625
قطعات سبک، براکت‌ها، اجزای ساختاری کم‌بار	PBF (SLM), Binder Jetting	570	Aluminum Alloy (AlSi10Mg)
قطعات با استحکام بالا، ابزار دقیق، چاهک‌های بارگذاری	SLM, DED	1400-1500	Maraging Steel (18Ni300)
سردکننده‌های راکت، انتقال حرارت، اجزای هدایت حرارتی بالا	SLM, DED	1085	Copper Alloy (CuCrZr)
موتور جت، سامانه‌های پیش‌رانه، اجزای مقاوم اکسایش	PBF, DED	1300-1500	Nickel-based Superalloys (Rene, Hastelloy)

• پلیمرها و کامپوزیت‌ها

پلیمرها و کامپوزیت‌ها از پرکاربردترین مواد در فناوری‌های ساخت افزایشی به‌شمار می‌روند و نخستین روش‌های چاپ سه‌بعدی عمدتاً بر پایه پلیمرهای خالص توسعه یافته‌اند. در میان این فناوری‌ها، مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده (FDM) به دلیل هزینه پایین، سادگی فرآیند و ضایعات کم، کاربرد گسترده‌ای دارد. با این حال، محدودیت خواص مکانیکی پلیمرهای خالص، توجه پژوهش‌ها را به سمت کامپوزیت‌های پلیمری با عملکرد مکانیکی بالاتر سوق داده است. مطالعات نشان می‌دهد که افزودن الیاف تقویت‌کننده، به‌ویژه الیاف کربن، می‌تواند به‌طور چشمگیری استحکام کششی و مقاومت خمشی پلیمرها را افزایش دهد. کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پیوسته معمولاً خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های دارای الیاف کوتاه از خود نشان می‌دهند و برای کاربردهای مهندسی پیشرفته مناسب‌تر هستند. در این راستا، فرآیندهایی نظیر ساخت رشته‌های ذوب‌شده (FFF) به‌عنوان رویکردی نوآورانه برای نمونه‌سازی سریع و تولید قطعات سفارشی مطرح شده‌اند. خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها به‌طور قابل‌توجهی به کیفیت سطح مشترک میان الیاف و ماتریس پلیمری وابسته است. بهبود این سطح مشترک از طریق روش‌هایی مانند عملیات فراصوت مورد توجه قرار گرفته است که عمدتاً باعث اصلاح فیزیکی ناحیه اتصال و افزایش استحکام کششی و خمشی می‌شود. علاوه بر این، استفاده از پلیمرهای مهندسی پیشرفته نظیر پلی‌اتر اتر کتون (PEEK) در ترکیب با الیاف کربن، به دلیل مقاومت حرارتی بالا و پایداری شیمیایی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در صنعت هوافضا یافته است. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عملیات ترکیبی پلاسما و لیزر می‌تواند پیوند سطح مشترک را در مقیاس‌های ماکرو و میکرو بهبود داده و نقش اصلاحات میکروساختاری ناشی از پلاسما در ارتقای عملکرد مکانیکی برجسته‌تر است [۴۱-۳۹]. در نهایت، با توجه به نیاز فزاینده به سازه‌های فوق‌سبک و پایدار در شرایط شدید فضایی، توسعه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن که دارای ضریب انبساط حرارتی نزدیک به صفر هستند، اهمیت ویژه‌ای یافته است. این مواد با تضمین پایداری ابعادی و استحکام بالا، گزینه‌ای کلیدی برای کاربردهای پیشرفته در اکتشافات فضایی و سامانه‌های هوافضایی محسوب می‌شوند [۴۳-۴۱]. جدول ۲ مواد پایه پلیمری مرسوم مورد استفاده در صنعت هوافضا را نشان می‌دهد.

• سرامیک‌ها

سرامیک‌ها در مقایسه با فلزات و پلیمرها دارای خواصی ممتاز همچون نقطه ذوب بسیار بالا، استحکام مکانیکی قابل توجه و پایداری حرارتی برجسته هستند و به همین دلیل در کاربردهای هوافضایی اهمیت ویژه‌ای دارند. آلومینا (Al_2O_3) و زیرکونیا (ZrO_2) از جمله سرامیک‌های پرکاربرد در این

حوزه هستند که به واسطه چقرمگی، مقاومت شیمیایی و عملکرد حرارتی برتر، گزینه‌های ایده‌آلی برای محیط‌های سخت به‌شمار می‌روند [۴۴-۴۵].
جدول ۳ مواد پایه سرامیک معمول مورد استفاده در صنعت هوافضا را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مواد پلیمری مورد استفاده در ساخت افزایشی در صنعت هوافضا [۳۹-۴۳].

کاربرد در صنعت هوا فضا	سیستم‌های ساخت افزایشی	نقطه ذوب (°C)	ماده پلیمری
اجزای موتور، قطعات مقاوم حرارت، اتصالات ساختاری، قطعات کابین	FFF/FGF, SLS, FDM	343	PEEK (Poly-Ether-Ether-Ketone)
قطعات سبک‌وزن ساختاری، عایق‌های حرارتی، اجزای مقاوم خوردگی	FDM/FFF, SLS	305-335	PEKK (Poly-Ether-Ketone-Ketone)
بدنه داخلی هواپیما، کانال‌ها، نگهدارنده‌ها، قطعات بادوام سبک	FDM	217	ULTEM 9085 (PEI – Polyetherimide)
قطعات سبک، پوشش‌ها، براکت‌ها، کانال‌های جریان	SLS, MJF	178-182	Nylon 12 (PA12)
اجزای نیمه‌ساختاری، محفظه‌ها، نگهدارنده‌های سبک	FDM, SLS	220-230	Nylon 6 (PA6)
قطعات شفاف، محفظه‌ها، بخش‌های مقاوم ضربه	FDM, FFF	155	Polycarbonate (PC)
نمونه‌سازی سریع، مدل‌های عملکردی، قطعات داخلی	FDM	105	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)
مدل‌سازی اولیه، نمونه‌سازی سریع	FDM	150-160	PLA (Polylactic Acid)
قطعات نیمه‌شفاف، بخش‌های مقاوم ضربه	FDM	230	PETG
قطعات سبک با استحکام بالا، براکت‌ها، سازه‌های مقاوم	FDM, SLS	180-200	Carbon-Fiber Reinforced Nylon (CF-PA)

جدول ۳: مواد سرامیکی مورد استفاده در ساخت افزایشی در صنعت هوافضا [۴۴-۴۸].

کاربرد در صنعت هوا فضا	سیستم‌های ساخت افزایشی مورد استفاده	نقطه ذوب (°C)	ماده سرامیکی
عایق حرارتی، قطعات مقاوم به سایش، نازل‌ها، اجزای حفاظ گرمایی، نمونه‌سازی	SLA/Photopolymerization, DIW, Binder Jetting, PBF	2070	Alumina (Al ₂ O ₃)
قطعات مقاوم به دما، نازل موتور، کامپوزیت‌های تقویت‌کننده، اجزای پایداری حرارتی	SLA/Photopolymerization, DIW, Binder Jetting	2715	Zirconia (ZrO ₂)
سپر حرارتی، قطعات مقاوم به شوک حرارتی، آستر محفظه احتراق، اجزای موتورهای جت	Extrusion, Binder Jetting, SLS/PBF	2730	Silicon Carbide (SiC)
یاتاقان‌ها، پره‌های مقاوم به حرارت، اجزای ساختاری با استحکام بالا	SLS/SLA/DIW	~1900	Silicon Nitride (Si ₃ N ₄)
اجزای با هدایت حرارتی بالا، قطعات الکترونیکی هوافضا، ساب‌استرهای حرارتی	SLA/DIW	2200	Aluminum Nitride (AlN)
قطعات مقاوم به ضربه، قطعات ساختاری سبک با مقاومت حرارتی	SLA/Photopolymerization	~1900-2000	Zirconia Toughened Alumina (ZTA)
صفحات محافظ حرارتی، اجزای موتور، ساختارهای مقاوم به اکسایش	PBF, Extrusion	متغیر (تا +۲۵۰۰)	Ceramic Matrix Composite (CMC) پایه زیکنیا
بازرسی حرارتی، عایق‌های سبک برای مأموریت‌های فضایی	Direct Ink Writing (DIW)	1200-1500	Aerogel-based Ceramics

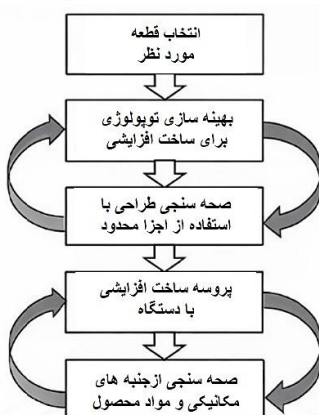
در برنامه‌های فضایی سرنشین‌دار و تلاش برای ایجاد ایستگاه‌های فضایی مستقل، فناوری ساخت افزایشی به‌عنوان ابزاری کلیدی مطرح شده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فرآیند ذوب بستر پودر (PBF) می‌تواند برای شبیه‌سازی و ساخت مواد چندجزئی مشابه رگولیت ماه و مریخ به‌کار گرفته شود. مطالعات نشان می‌دهد که رگولیت مصنوعی تولید شده از طریق PBF شباهت بیشتری به نمونه ماه دارد، در حالی که برای مریخ، استفاده از منابع درجا مانند آب برای فرآیندهای قالب‌گیری، راهکاری مناسب برای تولید قطعات سرامیکی با خواص مکانیکی پایدار ارائه می‌دهد. این دستاورد می‌تواند قدمی اولیه در مسیر سکونت انسان در مریخ باشد. سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با سرامیک به دلیل مقاومت دمایی و شیمیایی استثنایی، به‌طور گسترده در محیط‌های عملیاتی بسیار دشوار مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرامیک‌های مهندسی در ساخت افزایشی، به‌ویژه در کاربردهای هوافضایی، جذابیت زیادی دارند زیرا می‌توانند در دماهای بسیار بالا، خواص مکانیکی خود را حفظ کنند. زیرکونیا، به‌طور خاص، به دلیل چقرمگی بالا، خاصیت عایق حرارتی و رسانایی یونی مورد توجه است. با این حال، پردازش سرامیک‌ها با چالش‌های قابل توجهی روبه‌رو است. به‌منظور رفع این چالش‌ها، روش‌های نوآورانه‌ای برای ساخت افزایشی قطعات سرامیکی معرفی شده‌اند که ترکیبی از اکستروژن سرنگی و پخت UV را به‌کار می‌گیرند. این رویکرد امکان ساخت قطعات سرامیکی چندماده‌ای با هندسه‌های پیچیده و کیفیت بالا را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، انتخاب مناسب‌ترین فناوری ساخت افزایشی برای کاربردهای مختلف به ویژگی‌های ماده، روش پردازش و الزامات عملکردی بستگی دارد [۴۶-۴۸].

ب- جنبه‌های طراحی مکانیکی محصولات هوافضا با استفاده از فناوری ساخت افزایشی

در سال‌های اخیر، فناوری ساخت افزایشی به‌عنوان یک رویکرد تحول‌آفرین در طراحی و تولید قطعات هوافضا مطرح شده است. این فناوری با فراهم کردن آزادی بیشتر در هندسه‌سازی، امکان تولید ساختارهای پیچیده و سبک‌وزن را فراهم می‌سازد که دستیابی به آن‌ها با روش‌های ساخت سنتی دشوار یا حتی غیرممکن است. با این حال، بهره‌گیری مؤثر از ظرفیت‌های ساخت افزایشی نیازمند یک فرآیند طراحی مهندسی‌شده و مرحله‌به‌مرحله است که در آن ویژگی‌های مکانیکی، الزامات عملکردی و محدودیت‌های تولید هم‌زمان در نظر گرفته شوند. شکل ۱، چارچوبی کلی از جریان طراحی هوافضا برای ساخت افزایشی را نمایش می‌دهد. این فرآیند با انتخاب قطعه مناسب آغاز می‌شود، جایی که تصمیم‌گیری درباره اینکه کدام بخش از سامانه می‌تواند بیشترین مزیت را از ساخت افزایشی کسب کند صورت می‌گیرد. در مرحله بعد، بهینه‌سازی توپولوژی با توجه به محدودیت‌ها و قابلیت‌های فناوری ساخت افزایشی انجام می‌شود تا ساختاری سبک‌تر اما مقاوم‌تر حاصل گردد. خروجی این مرحله برای ارزیابی دقیق‌تر وارد تحلیل‌های عددی و تأیید طراحی با روش اجزاء محدود (FEM) می‌شود تا اطمینان حاصل گردد که طرح نهایی قادر به تحمل بارهای عملیاتی خواهد بود.



جنبه‌های طراحی مکانیکی محصولات فضایی با استفاده از تکنولوژی ساخت افزایشی



شکل ۱: دیاگرام پروژه طراحی ساخت افزایشی در محصولات ساخت افزایشی [نویسنده].

پس از تأیید طراحی، مدل نهایی در مرحله ساخت افزایشی تولید می‌شود. اما این پایان کار نیست؛ زیرا ویژگی‌های مکانیکی و کیفیت ساخت قطعه تولیدشده باید در مرحله تأیید مکانیکی و مواد بررسی و با نتایج طراحی تطبیق داده شوند. در صورت عدم انطباق، چرخه‌ی بازخورد فعال شده و طرح برای اصلاحات لازم مجدداً به مراحل قبلی بازگردانده می‌شود. این رویکرد یکپارچه، نه تنها به دستیابی به طراحی‌های سبک‌وزن و مستحکم کمک می‌کند، بلکه ریسک‌های مرتبط با عملکرد قطعات حیاتی هوافضا را نیز کاهش می‌دهد. چنین فرآیند سیستماتیک، پایه‌ای ضروری برای توسعه محصولات نوآورانه و قابل اعتماد با بهره‌گیری از فناوری ساخت افزایشی در صنایع هوافضا به شمار می‌رود. در ادامه این بخش به سه رکن اصلی در مبحث طراحی برای ساخت افزایشی محصولات هوافضا پرداخته می‌شود [۴۹-۵۱].

• بهینه سازی توپولوژی

طراحی بهینه با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی Topology Optimization به کاهش وزن، صرفه‌جویی در مواد و کاهش هزینه‌های انرژی و حمل‌ونقل کمک می‌کند. ساخت افزایشی نیز برای کاهش وزن و زمان توسعه محصول کاربرد دارد. بهینه‌سازی توپولوژی یکی از ابزارهای قوی در مهندسی هوافضا برای کاهش وزن و بهبود عملکرد است و طراحی مولد به مهندسين امکان می‌دهد چندین هدف طراحی مانند کاهش وزن، کاهش هزینه، افزایش سختی و استفاده بهینه از مواد را دنبال کنند. بهینه‌سازی توپولوژی به‌طور مؤثر در طراحی سازه‌های هواپیما، تقویت‌کننده‌ها، سیستم‌های چندجزئی هوافضا و طراحی اتصالات چندگانه استفاده می‌شود. این روش در فرآیند ساخت افزایشی برای کاهش مواد پشتیبان و زمان ساخت کاربرد دارد [۵۲-۵۴]. فرآیند بهینه‌سازی توپولوژی برای ساخت افزایشی شامل انتخاب قطعه، طراحی توپولوژی، تحلیل اجزای محدود، ساخت افزایشی و تأیید نهایی عملکرد مکانیکی و مواد است و با حلقه‌های بازخورد اطمینان از عملکرد واقعی قطعات بهینه‌شده را تضمین می‌کند. بهینه‌سازی طراحی با بهینه‌سازی توپولوژی نقش مهمی در کاهش وزن، صرفه‌جویی در مواد و افزایش کارایی هواپیما از طریق کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های حمل‌ونقل دارد. بهینه‌سازی توپولوژی، که ساختار قطعات را بهینه‌سازی می‌کند، به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای طراحی در مهندسی هوانوردی و هوافضا شناخته می‌شود و طراحی مولد به مهندسين امکان می‌دهد چندین هدف طراحی از جمله کاهش وزن، کاهش هزینه، افزایش سختی و استفاده بهینه از مواد را هم‌زمان دنبال کنند. مطالعات موردی نشان داده‌اند که با استفاده ترکیبی از بهینه‌سازی توپولوژی و اندازه، می‌توان قطعات هوافضایی مانند پراکت‌ها را مجدداً مدل‌سازی و طراحی کرد، به‌طوری که کاهش وزن ۱۸٪ حاصل شود. همچنین، طراحی سازه‌های تحت بارگذاری حرارتی-مکانیکی می‌تواند با ادغام بهینه‌سازی توپولوژی ترموالاستیک با فناوری‌های ساخت افزایشی به‌طور مؤثر انجام شود. مطالعات دیگر با ترکیب بهینه‌سازی توپولوژی، شکل و استفاده از مواد شبکه‌ای روش‌هایی برای طراحی سازه‌های سبک و ایمن ارائه کرده‌اند. در این روش، ابتدا طرح مفهومی با بهینه‌سازی توپولوژی ایجاد می‌شود و سپس بهینه‌سازی اندازه و شکل برای کاهش تمرکز تنش و توزیع یکنواخت انرژی کرنش اعمال می‌شود. در مرحله نهایی، بهینه‌سازی چندمقیاسی با استفاده از مواد شبکه‌ای انجام می‌شود. یک مطالعه موردی از لولای درب هواپیما نشان داد که با استفاده از آلایژ تیتانیوم Ti6Al4V و طراحی مواد شبکه‌ای می‌توان وزن قطعه را تا حدود ۴۴٪ کاهش داد. با این حال، محدودیت مدل‌های بهینه‌سازی شبکه‌ای این است که در صورت تغییر طراحی، کل فرآیند بهینه‌سازی باید دوباره تکرار شود، زیرا مدل‌های بهینه‌شده قبلی ممکن است دیگر مفید نباشند. این مطالعات همچنین بر اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های مواد، عملکرد قطعه، عملیات پس از پردازش و عوامل هزینه در فرآیند طراحی و ساخت قطعات تأکید دارند. مطالعات نشان داده‌اند که بهینه‌سازی توپولوژی می‌تواند وزن قطعات هوافضایی را به‌طور چشمگیری کاهش دهد: برای مثال، تکیه‌گاه رابط پرتابگر VEGA تا ۶۳٪ و اهرم تا ۳۲٪ کاهش وزن داشته‌اند، در حالی که محفظه سازه‌ای تا ۱۹٪ سبک‌تر شده است. کاهش رابط‌های اتصال نیز می‌تواند به کاهش وزن بیشتر منجر شود. روش تولید ترکیبی افزایشی-کاهشی Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing (HASM)، که مزایای ساخت افزایشی و ماشینکاری دقیق را ترکیب می‌کند، به بهبود دقت ابعادی و کیفیت سطح کمک می‌کند، اما تحقیقات کمی درباره بهینه‌سازی توپولوژی برای HASM انجام شده است [۵۴-۵۸].

• طراحی مولد

در سال‌های اخیر، با ظهور فرآیند طراحی مولد Generative Design (GD) برای ساخت افزایشی، امکان بررسی فضای طراحی برای اهداف چندگانه با در نظر گرفتن الزامات چند رشته‌ای فراهم شده است. طراحی مولد بخشی از خانواده تکنیک‌های طراحی برای ساخت افزایشی است که انبوهی از نتایج طراحی را در چندین زمینه فنی مقایسه و در نظر می‌گیرد. طراحی مولد با تضمین طراحی صحیح در فناوری تولید مناسب، مطلوب‌ترین نتیجه را با افزایش عملکرد و کارایی قطعات، سبک‌تر ارائه می‌دهد. این روش به عنوان روشی مؤثر برای پیش‌بینی، تجزیه و تحلیل و طراحی فرآیندهای AM به کار گرفته شده است. نرم‌افزار پیشرفته GD مهندسان را قادر می‌سازد تا طرح‌های هوافضا را برای بهره‌مندی از

فرآیندهای AM به طور خاص بهینه کنند. این پیشرفت‌ها می‌توانند با افزایش راندمان موتور، کاهش نیروی پسا و کاهش جرم، هزینه چرخه عمر هواپیما را کاهش دهند. ابزارهای GD قطعات یا مجموعه‌های بهینه‌شده را با قدرت محاسباتی و تکنیک‌های بهینه‌سازی ارائه می‌دهند. گروهی از محققان تلاش کردند تا وزن و زمان چرخه را در حین تولید انبوه قطعات هواضا با استفاده از تکنیک‌های طراحی مولد کاهش دهند. بهینه‌سازی توپولوژی و اندازه را برای کاهش جرم یک براکت هوافضای سنگین انجام دادند. تحقیقات آنها کاهش ۳۰ درصدی جرم سازه‌ای براکت هواضا را با رعایت تمام معیارهای عملکرد مکانیکی نشان داد. به عنوان مثال برخی از محققان از روش طراحی مولد برای طراحی براکت کمر بند ایمنی استفاده کردند. مطالعه آنها یک گردش کار طراحی مولد را برای مواجهه با نرم‌افزارها و تکنیک‌های مختلف پیشنهاد کرد. مطالعه آنها به دامنه کار آینده برای بهبود روش پیشنهادی با پیاده‌سازی موارد استفاده جدید اشاره کرد. علاوه بر این، مطالعه آنها بر تحقیقات بیشتر در مورد ادغام نوآوری‌های آینده مربوط به پیشرفت در طراحی مولد و تولید انبوه تأکید کرد. برخی از مطالعات روشی را برای کشف طرح‌های جدید چاپگرهای مصرفی پیشنهاد کردند که می‌توانند به سایر مسائل طراحی عملکردی تعمیم داده شوند. روش پیشنهادی شامل سه جزء است: اول، یک فضای جستجوی مؤثر از طریق یک خودرمزگذار متغیر آموخته می‌شود؛ دوم، یک مدل جایگزین برای طرح‌های عملکردی ساخته می‌شود؛ و سوم، از یک الگوریتم ژنتیک برای به‌روزرسانی همزمان پارامترهای فوق جایگزین و بهینه‌سازی طرح‌ها با استفاده از جایگزین به‌روزرسانی‌شده استفاده می‌شود. از تحقیقات محدود موجود، چنین استنباط می‌شود که طراحی مولد، طیف بسیار بالاتری از گزینه‌های طراحی را در اختیار طراحان و تولیدکنندگان قرار می‌دهد تا با توجه به محدودیت‌های کلیدی طراحی، بهترین گزینه طراحی مناسب را انتخاب کنند. علاوه بر این، در GD، قابلیت‌ها و محدودیت‌های فرآیند تولید هنگام توسعه مفهوم در نظر گرفته می‌شوند، نه اینکه پس از توسعه مفهوم، روی آنها کار شود. طراحی با استفاده از روش‌های مولد، طرح نهایی را به صورت خودکار تولید می‌کند. GD برای تولید سریع مفاهیم طراحی و دستیابی به راه‌حل‌های متعدد برای این مفاهیم در حال ظهور است. با این حال، پیاده‌سازی موفقیت‌آمیز آن برای فرآیندهای مختلف AM نیاز به توجه فوری به هزینه محاسباتی آن و نیاز به پس‌پردازش در مراحل مختلف فرآیند دارد. مطالعات نشان می‌دهد که چشم‌اندازهای ارائه شده توسط GD به اندازه کافی بررسی نشده‌اند. برخی مطالعات به طراحی اجزای کوچک پرداخته‌اند، اما موارد بسیار کمی از آن در حوزه هوانوردی گزارش شده است [۶۱-۵۹].

• مدل سازی و شبیه سازی

در ساخت افزایشی فلزی، قطعات به دلیل رسوب مخلوط‌های گرم شده از مواد بعضاً ذره‌ای روی سطوح و سپس اتصال و خنک شدن بعدی، مستعد ایجاد ریزساختارهای پیچیده و تنش‌های پسماند هستند. خواص اجزای ساخته شده با فرآیند ساخت افزایشی به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری ماده قرار می‌گیرند. برای تأیید آنها برای قطعات هواضا، دانستن رفتار و خواص مواد یا قطعات ساخته شده با فرآیند ساخت افزایشی اجتناب‌ناپذیر است. از تکنیک‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی برای درک تأثیر پارامتری بر عملکرد فرآیند ساخت افزایشی و محصول مورد استفاده استفاده می‌شود. مدل‌سازی و شبیه‌سازی ساخت افزایشی با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای فرآیند، به شناخت ریزساختار و تنش‌های پسماند کمک می‌کند. داشتن دانش قبلی از رفتار مواد از طریق شبیه‌سازی و مدل‌سازی، نقش حیاتی در ساخت افزایشی، به ویژه برای کاربردهای هواضا، ایفا می‌کند [۶۲].

رویکرد مدل‌سازی ساخت افزایشی می‌تواند تحلیلی، عددی یا تجربی باشد. توزیع دما در طول فرآیند به طور قابل توجهی بر ریزساختار، اعوجاج ناشی از تنش‌های پسماند و خواص خستگی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال محققان یک مطالعه امکان‌سنجی از تحلیل تنش ترموالاستیک بر روی یک براکت فضایی آلایژ پایه تیتانیوم ساخته شده با روش ذوب پرتو الکترونی انجام دادند. مطالعه آنها نیاز به توجه بیشتر برای محاسبه تنش‌های پسماند در اجزای ساخت افزایشی دارد. در برخی از تحقیقات، کیفیت محصول را با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی چند فیزیکی در طول رسوب مستقیم لیزر فولاد کربنی ارزیابی کردند. مطالعه آنها تنش حرارتی، تغییر شکل و توپولوژی دانه آستنیت را با تغییر سرعت اسکن، توان لیزر و نرخ تزریق پودرهای فلزی شبیه‌سازی کرد. مطالعه آنها نشان داد که تنش فون میزس و تاریخچه حرارتی به طور قابل توجهی تحت تأثیر نرخ تزریق پودرهای فلزی، توان لیزر و سرعت اسکن قرار می‌گیرد. افزایش تنش فون میزس با افزایش سرعت اسکن و توان لیزر مشاهده شد. مطالعه آنها عدم یکنواختی در ریزساختار قطعه چاپ شده و تغییر در اندازه منطقه تحت تأثیر حرارت با سرعت اسکن بالاتر را مشاهده کرد [۶۴-۶۳]. در تحقیقی دیگر یک مدل ترموپلاستیسیته المان محدود در فرآیند AM قوس سیمی در یک دامنه سه‌بعدی توسعه داده شد و رسوب چند لایه روی کرنش‌های پلاستیکی و تنش‌های حرارتی بررسی گردید. مطالعه آنها افزایش تنش‌های حرارتی و کرنش‌های پلاستیکی موضعی را با افزایش سرعت جوشکاری و پارامتر توزیع حرارت مشاهده کرد. با این حال، پارامتر توزیع حرارت در مورد تنش‌های حرارتی قابل توجه‌تر بود. برخی از مطالعات، روش جدیدی را برای پیاده‌سازی مؤثر تحلیل حرارتی برای شبیه‌سازی‌های فرآیندی تکنیک همجوشی بستر پودری لیزری با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS ارائه دادند. در

این مطالعات تحلیل حرارتی برای شبیه‌سازی‌های فرآیند AM انجام شد و اندازه حوضچه مذاب با نتایج آزمایش مقایسه گردید تا صحت شبیه‌سازی تأیید شود [۶۵-۶۶]. اکثر محققان فرآیند انجماد L-PBF را با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) شبیه‌سازی کرده و تنش‌های پسماند حاصل از انجماد را با استفاده از نرم‌افزار FEA محاسبه کرده‌اند. از مطالعات انجام شده، مشخص شده است که عمق ذوب تا حد زیادی تحت تأثیر توان لیزر، سرعت اسکن، اندازه نقطه و تنش‌های پسماند در قطعات قرار دارد که به طور قابل توجهی تحت تأثیر ابعاد حوضچه مذاب قرار دارند. علاوه بر این، دقت ابعادی و اعوجاج قطعه را می‌توان با انتخاب صحیح توان لیزر و دمای بستر برای ماده مورد پردازش کنترل کرد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله مروری، فناوری ساخت افزایشی در حوزه هوافضا به طور خلاصه ارائه شده است و از انتخاب مواد اولیه، پردازش و تولید گرفته تا کاربرد و روش‌های متنوع بررسی شد. فناوری ساخت افزایشی باعث توسعه شدید صنعت هوافضا شده است. مواد جدید، مانند مواد هوشمند، نانوکامپوزیت‌ها و سایر مواد برای برآوردن نیازهای توسعه این صنعت مورد بررسی شد. کار حاضر به طور جامع تحقیقات موجود در مورد فرآیندهای ساخت افزایشی برای کاربردهای هوافضا را با در نظر گرفتن تکنیک‌های ساخت افزایشی، بهینه‌سازی توپولوژی، طراحی مولد، برنامه‌ریزی فرآیند مبتنی بر دانش، تجزیه و تحلیل کلان داده، مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند برای اجزای هوافضا بررسی کرده است. فناوری‌های ساخت افزایشی پتانسیل بالایی برای کاهش وزن، افزایش ویژگی‌های طراحی، بهبود بهره‌وری سوخت و کاهش زمان تولید برای کاربردهای هوافضا نشان داده‌اند. با این حال، شکاف قابل توجهی در دانش کاربردی و پیاده‌سازی عملی برای محصولات تجاری مختلف در صنعت وجود دارد. عدم تطابق در خواص مواد، دقت ابعادی و سطح نهایی قطعه چاپ شده از نگرانی‌های اصلی است. این امر برای ساخت افزایشی آلیاژهای تیتانیوم، سرامیک و آلیاژهای نیکل بسیار محتمل است. لذا نیاز به توسعه مدل‌های مبتنی بر فیزیک برای درک اولیه و بهبود خواص مواد (استحکام، خستگی و غیره) در شرایط سخت هوافضا ضروری می‌باشد.

مراجع

- [1]. Duda, T., Raghavan, L.V.: 3D metal printing technology. IFAC-PapersOnLine. 49(29), 103–110, 2016.
- [2]. Joshi, S.C., Sheikh, A.A.: 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. VirtualPhys. Prototyp. 10(4), 175–185, 2015.
- [3]. Oropallo, W., Ten Pieg, L.A.: Challenges in 3D Printing. Springer, Cham, 2016.
- [4]. Liu, Z., et al.: A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 102, 2877–2889, 2019.
- [5]. Frazier, W.E.: Metal additive manufacturing: a review. J. Mater. Eng. Perform. 23(6), 1917–1928, 2014.
- [6]. Tofail, S.A.M., et al.: Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater. Today. 21(1), 22–37, 2017.
- [7]. Erika, F., et al.: 3D printing of conductive complex structures with in situ generation of silver nanoparticles. Adv. Mater. 8(19), 3712–3717, 2016.
- [8]. Dimitrov, D., et al.: Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives. Rapid Prototyp. J. 12(3), 136–147, 2006.
- [9]. Kruth, J.P.: Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. Ann. CIRP. 40(2), 603–614, 1991.
- [10]. Holzmann, P., et al.: User entrepreneur business models in 3D printing. J. Manuf. Technol. Manag. 28(1), 75–94, 2017.
- [11]. Farahani, R.D., et al.: Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites: manufacturing techniques and applications. Adv. Mater. 28(28), 5794–5821, 2016.
- [12]. Keleş, Ö., et al.: Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS. Rapid Prototyp. J. 23(2), 320–328, 2017.
- [13]. None: 3D printed rocket thruster test success. Met. Powder Rep. 69(4), 40, 2014.

- [14]. S. Ridinger, "NASA Advances Additive Manufacturing For Rocket Propulsion | NASA," 2018. [Online]. Available: <http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/nasa-advances-additive-manufacturing-for-rocket-propulsion.html>. [Accessed: 13-Jul-2021].
- [15]. "Additive manufacturing | Thales Group." [Online]. Available: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/additive-manufacturing>. [Accessed: 13-Jul-2021].
- [16]. Jia, Q., Gu, D.: Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties. *J. Alloys Compd.* 585, 713–721, 2014.
- [17]. Singh, T., et al.: 3D printing of engineering materials: a state of the art review. *Mater. Today Proc.* 28, 1927–1931, 2020.
- [18]. Wang, Y., et al.: Selection of additive manufacturing processes. *Rapid Prototyp. J.* 23(2), 434–447, 2017.
- [19]. Feldmann, M., et al.: Electromagnetic micro-actuators, micro-motors, and micro-robots. In: *Microelectronics: Design, Technology, & Packaging III*. Bellingham, Washington, DC, 2007.
- [20]. Gebisa, A.W., Lemu, H.G.: Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment. *Materials*. 11(4), 500, 2018.
- [21]. Matsuzaki, R., et al.: Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Sci. Rep.* 6, 23058, 2016.
- [22]. Zaman, U.K.U., et al.: Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101(5–8), 1215–1226, 2019.
- [23]. Manakari, V., et al.: Selective laser melting of magnesium and magnesium alloy powders: a review. *Metals*. 7(1), 35, 2017.
- [24]. Sing, S.L., et al.: Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method. *Exp. Mech.* 56(5), 735–748, 2016.
- [25]. Spierings, A.B., et al.: SLM-processed Sc- and Zr- modified Al-mg alloy: mechanical properties and microstructural effects of heat treatment. *Mater. Sci. Eng. A.* 701, 264–273, 2017.
- [26]. Shipley, H., et al.: Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: a review. *Int J Mach Tool Manu.* 128, 1–20, 2018.
- [27]. Yu, W.H., et al.: Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting: a state of the art review. *Prog. Mater. Sci.* 104, 330–379, 2019.
- [28]. Yuan, S., et al.: Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: materials and applications. *Prog. Polym. Sci.* 91, 141–168, 2019.
- [29]. Hopkinson, N., et al.: *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Wiley, New York, 2006.
- [30]. Campbell, F.C.: *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [31]. Uriondo, A., et al.: The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: a review of important aspects. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.* 229(11), 0954410014568797, 2015.
- [32]. Jia, Q., Gu, D.: Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties. *J. Alloys Compd.* 585, 713–721, 2014.
- [33]. Murr, L.E., et al.: Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Mater.* 58(5), 1887–1894, 2010.

- [34]. Mehrpouya, M., et al.: A prediction model for finding the optimal laser parameters in additive manufacturing of NiTi shape memory alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 105(11), 4691–4699, 2019.
- [35]. Rawal, S., et al.: Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy components for spacecraft applications. 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2013.
- [36]. Wu, X., et al.: Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V. *Mater. Des.* 25, 137–144, 2004.
- [37]. Vilaro, T., et al.: As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metall. Mater. Trans. A.* 42(10), 3190–3199, 2011.
- [38]. Kahlin, M., et al.: Fatigue behaviour of notched additive manufactured Ti6Al4V with as-built surfaces. *Int. J. Fatigue.* 101, 51–60, 2017.
- [39]. Ning, F.D., et al.: Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Compos. Part B Eng.* 80, 369–378, 2015.
- [40]. Goh, G.D., et al.: Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Mater. Des.* 137, 79–89, 2018.
- [41]. Qiao, J., et al.: Ultrasound-assisted 3D printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic (FRTP) composites. *Addit. Manuf.* 30, 11, 2019.
- [42]. Luo, M., et al.: Bi-scale interfacial bond behaviors of CCF/PEEK composites by plasmalaser cooperatively assisted 3D printing process. *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 131, 105812, 2020.
- [43]. Anguita, J.V., et al.: Dimensionally and environmentally ultra-stable polymer composites reinforced with carbon fibres. *Nat. Mater.* 19(3), 317–322, 2020.
- [44]. Doreau, F., et al.: Stereolithography for manufacturing ceramic parts. *Adv. Eng. Mater.* 2(8), 493–496, 2000.
- [45]. Owen, D., et al.: 3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer. *Prog. Addit. Manuf.* 3(1), 3–9, 2018.
- [46]. Goulas, A., et al.: Additive manufacturing of physical assets by using ceramic multicomponent extra-terrestrial materials. *Addit. Manuf.* 10, 36–42, 2016.
- [47]. Karl, D., et al.: Towards the colonization of Mars by in-situ resource utilization: slip cast ceramics from Martian soil simulant. *PLoS One.* 13(10), 11, 2018.
- [48]. Faes, M., et al.: Extrusion-based additive manufacturing of ZrO₂ using photoinitiated polymerization. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 14, 28–34 2016.
- [49]. A.A. Shapiro, J.P. Borgonia, Q.N. Chen et al., Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications, *J. Spacecraft Rockets*, 53(5), p 952–959, 2016.
- [50]. G. J. Schiller, Additive Manufacturing for Aerospace. In: *2015 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, p 1-8, 2015.
- [51]. F.H. Froes, R. Boyer and B. Dutta, Additive Manufacturing for Aerospace Applications-Part I, *Adv. Mater. Proc.*, 175(5), p 36–41, 2017.
- [52]. J.H. Zhu, W.H. Zhang and L. Xia, Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design, *Arch. Comput. Method E*, 23(4), p 595–622, 2016.
- [53]. M. Orme, I. Madera, M. Gschweilt and M. Ferrari, Topology Optimization for Additive Manufacturing as an Enabler for Light Weight Flight Hardware, *Designs*, 2, p 51, 2018.
- [54]. M. Kamal and G. Rizza, Design for Metal Additive Manufacturing for Aerospace Applications, In *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, Amsterdam, p 67–86, 2019.

- [55]. E. P. Trudel, M. El. Sayed, L. Kok, & E. Provost, Multiscale Design Optimization of Additively Manufactured Aerospace Structures Employing Functionally Graded Lattice Materials, In: AIAA Scitech 2019 Forum, p 0420 2019.
- [56]. L. Berrocal, R. Fernandez, S. Gonzalez et al., Topology Optimization and Additive Manufacturing for Aerospace Components, Prog. Addit. Manuf., p 83–95, 2019.
- [57]. Y.S. Han, B. Xu, L. Zhao and Y.M. Xie, Topology Optimization of Continuum Structures Under Hybrid Additive-Subtractive Manufacturing Constraints, Struct. Multidiscip. Optim., 60(6), p 2571–2595, 2019.
- [58]. Z.H. Jihong, Z.H. Han, W.A. Chuang, Z.H. Lu, Y.U. Shangqin and W. Zhang, A Review Of Topology Optimization for Additive Manufacturing: Status and Challenges, Chin. J. Aeronaut., 34(1), p 91–110, 2021.
- [59]. S. A. Bagassi, F. Lucchi, F. De Crescenzo, & F. Persiani, Generative Design: Advanced Design Optimization Processes for Aeronautical Applications. In: Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Daejeon, Korea, p25-30, 2016.
- [60]. T. Briard, F. Segonds and N. Zamariola, G-DfAM: A Methodological Proposal of Generative Design for Additive Manufacturing in the Automotive Industry, Int. J. Interact. Des. Manuf. (IJIDeM), p 875–886, 2020.
- [61]. C.C. Tutum, S. Chockchowwat, E. Vouga, R. Miiikkulainen, Functional Generative Design: an Evolutionary Approach to 3D-Printing. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, p 1379–1386, 2018.
- [62]. W.E. Frazier, Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Vision and Roadmap. In: 21st, international solid freeform fabrication symposium, University of Texas, Austin, p 717–732, 2010.
- [63]. G. Allevi, M. Cibeca, R. Fioretti, R. Marsili, R. Montanini and G. Rossi, Qualification of Additively Manufactured Aerospace Brackets: A Comparison Between Thermoelastic Stress Analysis and Theoretical Results, Measurement, 126, p 252–258, 2018.
- [64]. H. Hosseinzadeh, Metal Additive Manufacturing of Carbon Steel with Direct Laser Deposition: Computer Simulation, Prog. Addit. Manuf., 6, p 217–229, 2021.
- [65]. E.A. Bonifaz and J.S. Palomeque, A Mechanical Model in Wire + Arc Additive Manufacturing Process, Prog. Addit. Manuf., 5, p163–169, 2020.
- [66]. S.H. Jeong, E.G. Park, J.W. Kang et al., Thermal Analysis for Simulation of Metal Additive Manufacturing Process Considering Temperature-and History-Dependent Material Properties, Int. J. Aeronaut. Space Sci., 22, p 52–63, 2021.