ساخت افزودنی:
چالش‌های علمی و تکنولوژیکی، اوجگیری بازار و فرصت‌ها[1]

ترجمه: محمدحسین نشاطی

ساخت افزودنی (AM) اساساً متفاوت از ساخت شکل‌دهنده یا کاهنده سنتی است از این لحاظ که این نزدیک‌ترین نوع آن به ساخت "از پایین به بالا" است که در آن یک ساخته می‌تواند با استفاده از یک رویکرد "لایه به لایه" به جای ریخته‌گری یا شکل‌دادن توسط تکنولوژی‌هائی همانند آهنگری یا ماشینکاری به شکل طراحی شده خود تولید شود. ساخت افزودنی تنوع‌پذیر، انعطاف‌پذیر، بسیار قابل سفارشی‌سازی است و به این ترتیب می‌تواند مناسب بیشتر بخش‌های تولید صنعتی باشد. مواد برای ساخت این قطعات /اشیاء می‌توانند از مواد بسیار متنوعی شامل فلزی، سرامیکی و پلیمری به همراه ترکیباتی به صورت کامپوزیت، هیبریدی (ترکیبی) یا مواد درجه‌بندی شده کارکردی (FGM) باشند. اما، هنوز چالش تبدیل این "ساخت" شکل‌ها و سازه‌ها به اشیائی کارکردی برجاست. کار زیادی در AM برای رفع چالش‌های مربوط به دو تکنولوژی توانمندساز اصلی آن یعنی "مواد" و "روش سنجش" برای دستیابی به این کارکرد به روش‌هائی پیش‌بینی‌کننده و تکثیرپذیر مورد نیاز است. خبر خوب این است که علاقه زیادی در صنعت برای گرفتن AM به عنوان یکی از مسیرهای اصلی مهندسی تولید وجود دارد. به نظر ما، ساخت افزودنی یقینا در تقاطعی قرار دارد که از آنجا باید این فرآیند تولید جدید، بسیار فعال اما تا حدودی تثبیت نشده، به سمت تکنولوژی‌ای برود که بتواند توانایی تولید محصولات واقعی، نوآورانه، پیچیده و قوی را نشان دهد.

مقدمه

ساخت افزودنی "اشیاء" را از مدل "دیجیتال" با رسوب دادن ماده/مواد تشکیل‌دهنده آن به صورت لایه به لایه با استفاده از ابزارهای کنترل شده و عملیات دیجیتالی لایه‌گذاری تولید می‌کند. این تعریف گسترده از ساخت افزودنی اساساً چهار مؤلفه اصلی را نمایان می‌سازد:

- یک مدل دیجیتالی از شئ، که می‌تواند از یک برش پیتزا تا بال هواپیما متفاوت باشد
- ماده/موادی که از کوچکترین شکل ممکن برای مثال قطرات مایع، سیم، پودر برای ساخت آن به هم می‌پیوندند
- یک ابزار برای لایه‌گذاری مواد و
- یک سیستم کنترل دیجیتالی برای ابزار لایه‌گذاری لایه به لایه ماده/مواد برای ایجاد شکل شئ.

بنابراین، AM اساساً متفاوت از ساخت شکل‌دهنده یا کاهنده سنتی است، زیرا نزدیکترین نوع به ساخت "از پایین به بالا" است که در آن می‌توانیم یک سازه را به شکل طراحی شده آن با استفاده از یک رویکرد "لایه به لایه" بسازیم. این ساخت لایه به لایه امکان آزادی بی‌نظیری را در ساخت سازه‌های پیچیده، کامپوزیتی و ترکیبی (هیبریدی) با دقت و کنترلی می‌دهد که از طریق مسیرهای تولید سنتی قابل انجام نیست [1،2]. یک مثال خوب آن می‌تواند یک داربست مهندسی بافت استخوان، با هدف تامین

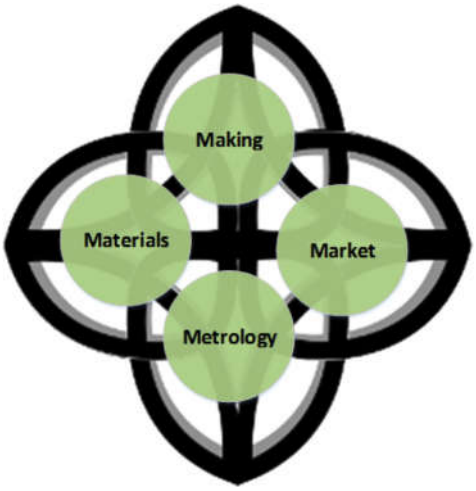
[1]- Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, Materials Today, Volume 21, Number 1, January/February 2018.

پشتیبان بافت در داخل بدن موجود زنده در عین حال تقلید از معماری سلسله مراتبی متخلخل و نفوذپذیر استخوان باشد. ثابت شده است که روشهای سنتی بازسازی داربست استخوانی در تقلید از ساختار شبکه متخلخل به هم پیوسته دشوار بوده است اما با استفاده از تصویر توموگرافی میکرو–محاسباتی اشعه ایکس (X-ray μCT) همراه با طراحی به کمک کامپیوتر (CAD) می‌توان فایل‌های طراحی را ایجاد کرد که با استفاده از AM می‌توانند به صورت قابل اطمینانی فرآوری شوند [3].

برخی از مزایای بالقوه ساخت افزودنی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد [4،5]:

1. تبدیل مستقیم طراحی به اجزا [قطعات]
2. تولید قطعات با سفارشی‌سازی بیشتر و بدون ابزار یا هزینه ساخت اضافی
3. طراحی کارکردی که امکان تولید ویژگی‌های پیچیده داخلی را فراهم می‌آورد
4. ساخت قطعات کاملاً انعطاف‌پذیر و سبک با ساختارهای توخالی یا مشبک
5. توانائی تولید مستقیم قطعات به شکل نهایی (اصلی) یا نزدیک به شکل نهایی (نزدیک به اصلی) آنها با حداقل فرآوری اضافی تا بدون فرآوری اضافی
6. قابلیت دستیابی به تولید با ضایعات صفر با حداکثرسازی استفاده از مواد
7. کاهش بسیار زیاد زمان کلی توسعه و تولید محصول به انتقال سریعتر به بازار منتج می‌شود
8. اثرات برجامانده [منفی] عملیاتی کوچکتر برای ساخت انواع زیادی از قطعات
9. تولید به محض تقاضا، دوری از تولید بر اساس پیش تصور و
10. مقیاس‌پذیری عالی.

اما، موفقیت ساخت افزودنی، در این است که شئ ساخته شده به چه میزان به استفاده در نظر گرفته شده برای آن در بازار خدمت می‌کند. تبدیل برتری و راحتی AM در ایجاد اشکال و سازه‌ها به محصولات مفید برای پذیرش آن در صنعت بسیار مهم است. موفقیت تجاری همچنین به این بستگی دارد که چقدر محکم می‌توان اطمینان داد که خواص مواد (materials) در شکل یا سازه مورد نظر در واقع برخی از استانداردهای پذیرفته‌شده از پیش تعریف‌شده را تامین می‌کنند [6] در عین حالی که هزینه تولید همچنان رقابتی باقی می‌ماند. به عبارت دیگر، اوجگیری بازار (market) محصولات ساخته شده از طریق AM (ساخت (making)) هنگامی اتفاق می افتد که خواص مورد نظر قطعات تولید شده با AM از طریق اندازه‌گیری یا سنجش (metrology) مناسب تأیید شوند. این رابطه درهم تنیده بین بازار، ساخت، مواد و روش سنجش در **شکل 1** در پس زمینه نماد سلتیک برای نقاط قوت نشان داده شده است و هنگامی که با هم در نظر گرفته شوند، چنین چیزی تحقق پیدا می‌کند.



شکل 1– 4M ساخت افزودنی: مواد، ساخت، سنجش و بازار.

در این مقاله به چالش‌های علمی و فنی مرتبط با ساخت، مواد و روش سنجش محصولات AM که میزان اوجگیری بازار آن و تحقق فرصت تجاری آن را تعیین می‌کنند می‌پردازیم. با توجه به زمینه چند مقاله مروری و کتاب عالی در مورد AM که در دسترس هستند [7–10]، تأکید می‌کنیم که اشتیاق فعلی به فرصت بازار و توانایی ساخت از طریق مسیرهای ساخت افزودنی باید با حل چالش‌های مرتبط با مواد و اتخاذ روش سنجش مناسب کاملا مطابقت داشته باشد. بنابراین، مواد و روش سنجش دو تکنولوژی توانمندساز هستند که باید فراتر از حالت مدرن فعلی خود پیشرفت کنند تا AM را از وظیفه نمونه‌سازی سریع به تولید صنعتی واقعی تبدیل نمایند.

ساخت

AM از تکنولوژی ساخت لایه به لایه سازه‌های سه بعدی (3D) به طور مستقیم از مدل CAD سرچشمه گرفته است. AM اکنون به یک ابزار و تکنولوژی ساخت سریع توسعه یافته است و به درستی در موقعیت ارائه انقلاب موسوم به چهارمین انقلاب صنعتی قرار دارد. رویکرد AM در ساخت به صورت تنوع‌پذیر، انعطاف‌پذیر، بسیار قابل‌سفارشی‌سازی است و به این ترتیب، برای اکثر بخش‌های تولید صنعتی بسیار مناسب است. تمرکز اصلی AM بر سفارشی‌سازی محصولات کم حجم و با ارزش افزوده بالا که می‌توانند به سرعت تولید شوند می‌باشد. تولیدکنندگان پیشروی خودرو اکنون در حال ساخت قطعات موتور با AM که می‌توانند در جاده رانده شوند هستند؛ سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA) آمریکا استفاده از دستگاه‌های تولیدشده از طریق AM برای مصارف انسانی را تأیید کرده است؛ ایستگاه فضایی بین‌المللی دارای یک دستگاه AM برای ساخت قطعات و اجزا در فضا است [11].

AM قادر به تولید قطعات کاملاً کاربردی در طیف گسترده‌ای از مواد شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و ترکیبی از آنها به صورت کامپوزیت، مواد ترکیبی (هیبرید) یا مواد درجه بندی شده کارکردی (FGM) است. در بین این مواد، پلیمرها شاید به دلیل کاربرد گسترده آنها در ماشین‌های نسل 1 که اصولا برای نمونه‌سازی سریع طراحی شده‌اند، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما این تکنولوژی فقط به پلیمرها یا سایر مواد پلیمری محدود نمی‌شود. تمام انواع مواد شامل فلزات [15–18]، سرامیک‌ها [19–22]، نانومواد [23]، داروها و مواد با منشا بیولوژیکی [24] را می‌توان با استفاده از AM به شکل‌ها و سازه‌های سه بعدی تبدیل کرد.

سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)/انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM) در استاندارد شماره 52900: 2015 فرآیندهای استاندارد AM را به هفت دسته طبقه‌بندی کرده‌اند:

(1) جت کردن چسب (BJ)؛

(2) رسوبگذاری با انرژی هدایت شده (DED)؛

(3) اکستروژن مواد (ME)؛

(4) جت کردن مواد (MJ)؛

(5) ذوب در بستر پودر (PBF)؛

(6) لایه‌گذاری ورقه‌ای (SL)؛ و

(7) فتوپلیمریزاسیون خمره‌ای (VP).

در **جدول1** اصول اساسی، مثال مواد تولیدی، مزایا و معایب هر یک از این هفت سیستم خلاصه شده است. این جدول همچنین سازندگان اصلی ابزار برای تکنولوژی AM مربوطه را ارائه می‌دهد.

در AM، لایه ماده رسوب داده می‌شود یا به بهترین وجه جهت داده (هدایت) می‌شود در حالی که در حالت سیال قرار دارد. بدیهی است، پلیمرها و محصولات بر پایه پلیمر مانند کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، ترکیبی (هیبریدی) و FGMها معمولاً تسهیلاتی را فراهم می‌کنند که به دمای فرآوری نسبتاً کم و ساخت در شرایط محیط، بدون هیچ‌گونه خلا و محیط گاز بی‌اثر، نیاز دارند. پلیمرها دمای ذوب و انتقال شیشه‌ای نسبتاً کمی دارند، که باعث تسهیل سیلان در دمای نسبتاً کمتری نسبت به سرامیک‌ها و فلزات می‌شود. دستیابی به پخت (عمل‌آوری) و اتصال به محض خنک‌کاری در پلیمرها نیز آسانتر است. اتصال فلزات و سرامیک‌ها به دلیل دمای بالای ذوب آنها به راحتی قابل‌دستیابی نیست. مزیت فرآیند زینتر کردن حالت جامد که شامل ذوب سطحی ذرات فلزات یا سرامیکی و به دنبال آن رشد دانه است، اغلب مسیر ارجح برای حصول یک ساختار یا شکل جامد یکپارچه برای مواد سخت است. اما، نشان داده شده که ذوب مستقیم لیزری سرامیک‌ها [25] یا فلزات [26،27] نیز کار می‌کند.

جدول 1- اصول اساسی، مواد، مزایا، معایب، حجم ساخت معمول و تولیدکننده ابزار هفت دسته ASTM برای AM: جت کردن چسب (BJ)؛ رسوبگذاری با انرژی هدایت شده (DED)؛ اکستروژن مواد (ME)؛ جت کردن مواد (MJ)؛ ذوب در بستر پودر (PBF)؛ لایه‌گذاری ورقه‌ای (SL)؛ و فتوپلیمریزاسیون خمره‌ای (VP). حجم ساخت برای راحتی به نزدیکترین عدد گرد شده است. انواع مواد به ترتیب مناسب بودن و مصارف رایج رتبه‌بندی شده‌اند. اقتباس از مراجع [32-30].

دسته ASTM	اصل پایه	تکنولوژی نمونه	مزایا	معایب	مواد	حجم ساخت (mm*mm*mm)	سازنده ابزار/ کشور
BJ	جت چسب/چسب‌های مایع که روی لایه های نازک پودری چاپ می‌شود. قطعه لایه به لایه با چسباندن ذرات بهم ساخته می‌شود.	_ تکنولوژی جوهر افشان 3D	_ بدون تکیه‌گاه/ زیرلایه (سوبسترا) _ آزادی طراحی _حجم ساخت زیاد، سرعت چاپ بالا _ نسبتاً کم هزینه	_ قطعات شکننده با خواص مکانیکی محدود _احتمال نیاز به پس-فرآوری	_ پلیمرها _ سرامیک‌ها _کامپوزیت‌ها _ فلزات _ هیبرید	تنوع‌پذیری (کوچک تا بزرگ) X = <4000 Y = <2000 Z = <1000	ExOne, USA PolyPico, Ireland
DED	انرژی حرارتی متمرکز مواد در طی رسوبگذاری مواد را ذوب می‌کند	_ رسوبگذاری لیزری (LD) _ شکل دادن بصورت نهائی با لیزر مهندسی شده (LENS) _ پرتو الکترونی _ ذوب قوس پلاسما	_ درجه بالائی از کنترل ساختار دانه _ قطعات با کیفیت بالا _عالی برای کاربردهای تعمیراتی	_ نیاز به تعادل کیفیت سطح و سرعت دارد _ محدود به هیبریدهای پایه فلزی/فلزی	_ فلزات _ هیبرید	تنوع‌پذیری X = 600-3000 Y = 500-3500 Z = 350-5000	Optomec, USA InssTek, USA Sciaky, USA Irepa Laser, France Trumpf, Germany
ME	مواد بصورت انتخابی از طریق نازل یا روزنه بیرون رانده می‌شوند	_ مدلسازی رسوبگذاری ذوب شده (FDM) ساخت رشته ذوب شده (FFF)، مدلسازی لایه ذوب شده (FLM)	_ استفاده گسترده _ ارزان _ مقیاس پذیر _توانائی ساخت قطعات کاملاً کاربردی	_ناهمسانگردی عمودی _سطح ساختار-پله‌ای _جوابگوی جزئیات دقیق نیست	_ پلیمرها _ کامپوزیت	کوچک تا متوسط X = <900 Y = <600 Z = <900	Stratasys, USA
MJ	قطرات مواد ساخت رسوبگذاری می‌شوند	_ تکنولوژی جوهر افشان سه بعدی _ نوشتن مستقیم جوهر	_ دقت بالای رسوبگذاری قطره _ ضایعات کم _ قطعات چندماده _ چند رنگ	_ مواد پشتیبان اغلب مورد نیاز است _ عمدتا می توان از فوتوپلیمرها و رزین‌های ترموست استفاده کرد	_ پلیمرها _ سرامیک‌ها _کامپوزیت‌ها _ هیبرید _بیولوژیکی	کوچک X = <300 Y = <200 Z = <200	Stratasys, USA 3D Systems, USA PolyPico, Ireland 3Dinks, USA WASP, Italy
PBF	انرژی حرارتی منطقه کوچکی از بستر پودر مواد ساخت را ذوب می‌کند	_ ذوب پرتو الکترونی (EBM) _ زینتر کردن لیزری مستقیم فلز (DMLS) _ زینتر کردن/ذوب کردن لیزری انتخابی (SLS/SLM)	_ نسبتا ارزان _ اثرات مضر کوچک _ بستر پودر به صورت یک ساختار تکیه گاه یکپارچه عمل می‌کند _ طیف گسترده‌ای از گزینه‌های مواد	_ نسبتاً کند _ عدم یکپارچگی ساختاری _ محدودیت اندازه _ نیازمند قدرت بالا _ وابستگی سطح نهائی به اندازه پودر ماده متشکله جسم	_ فلزات _ سرامیک‌ها _ پلیمرها _کامپوزیت‌ها _ هیبرید	کوچک X = 200-300 Y = 200-300 Z = 200-350	ARCAM, Sweden; EOS, Germany; Concept Laser Cusing, Germany; MTT, Germany; Phoenix System Group, France; Renishaw, UK;Realizer, Germany; Matsuura, Japan, Voxeljet, 3Dsystems, USA
SL	اتصال ورق‌ها/ فویل‌های مواد	_ ساخت شئ لایه‌ای (LOM) _ تحکیم التراسوند/ ساخت افزودنی التراسوند (UC/UAM)	_ سرعت بالا، _ کم هزینه، _ سهولت جابجائی مواد	_ وابستگی استحکام و یکپارچگی قطعات به چسب استفاده شده _ احتمال نیاز به پس-فرآوری برای تکمیل _ محدودیت مواد مورد استفاده	_ پلیمرها _ فلزات _ سرامیک‌ها _ هیبرید	کوچک X = 150–250 Y = 200 Z = 100-150	3D systems, USA MCor, Ireland
VP	پلیمر مایع در خمره با نور عمل آوری می شود	_ استریو لیتوگرافی (SLA) _ فرآوری نوری دیجیتالی (DLP)	_ قطعات بزرگ _ دقت عالی _ سطح نهائی و جزئیات عالی	_ فقط به فوتوپلیمرها محدود می شوند _ مدت نگهداری کم، خواص مکانیکی ضعیف فوتوپلیمرها _ مواد متشکله گران/ فرآیند ساخت آهسته	_ پلیمرها _ سرامیک‌ها	متوسط X <2100 Y <700 Z <800	Lithoz, Austria 3D Ceram, France

از میان منابع حرارت، لیزرهای پرقدرت بخصوص برای فلزات برای تشکیل فلزات مایع زودگداز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [28]. از منابع دیگر همانند مشعل پلاسما یا پرتو الکترونی نیز می‌توان استفاده کرد. ساخته‌های سرامیکی را نیز می‌توان با کمک چسب‌ها و سیال‌کننده ساخت [29]. در صورت لزوم ممکن است فرآوری بعدی در دمای بالا برای تراکم بیشتر و سوزاندن هرگونه چسب لازم باشد. لیزرها به ویژه در ساخت افزودنی فلزی به عنوان منبع ذوب کردن و ابزار برشکاری برای زائده‌بری اشکال و تکمیل سطح از مزیت خاصی برخوردارند. در حالی که لیزر به عنوان منبع گرمای ترجیحی در هر دو فرآیند بستر پودر و تغذیه پودر غالب است، از منبع پرتو الکترونی نیز به ویژه در ساخت قطعات با حجم نسبتاً کم استفاده می‌شود. به طور کلی، روش‌های تغذیه پودر و سیم می‌توانند شکل‌های آزاد متوسط تا بزرگ را ایجاد کنند (لطفاً به جدول 1 مراجعه کنید).

چالش‌های عمومی تولید برای AM در توسعه سیستم خودگردان، قوی، کاربرپسند، ایمن، یکپارچه برای تأمین حرکت و سرعت مورد نیاز اسکن رسوبگذاری، ویژگی وضوح حجمی بالا با انرژی همراه برای ساخت و کنترل ابعادی قطعه نهفته است. سایر چالش-های مربوط به محصولات AM عبارتند از: تکمیل سطح، اندازه قطعه، تغییرات در کیفیت محصول از یک دستگاه به دستگاه دیگر، و بین دسته‌های تولیدات و عدم شناخت اساسی تأثیر متغیرهای عملیاتی بر کیفیت قطعه.

برای فلزات، باید محافظت کافی از اکسید شدن که می‌تواند به میزان قابل‌ملاحظه ای کیفیت و سودمندی محصول نهایی را به خطر بیاندازد وجود داشته باشد. در حال حاضر، محافظت با گاز بی‌اثر نسبتا متداول است. در موارد بسیاری، به خصوص برای ساخت اشیاء با فلزات غیرآهنی، خلاء به اندازه 10^{-3} تا 10^{-4} یا حتی محیط احیائی ممکن است مورد نیاز باشد. دامنه قدرت، سرعت تکرار، طول موج لیزر و انعطاف‌پذیری نقطه لیزر برای توانائی ایجاد یک شئ سه بعدی مهم هستند. در حالی که برای پلیمرها، یک منبع حرارت کم قدرت، نور یا التراسوند (امواج فراصوت) می‌تواند کافی باشد، برای فلزات لیزر پرقدرت لازم است. از آنجا که مواد سرامیکی رسانای حرارتی ضعیفی هستند، می‌توان از لیزر با قدرت نسبتاً کم استفاده کرد اما برای جلوگیری از شوک حرارتی باید دقت کرد. قدرت لیزرها به طور کلی از 0.1 W تا 10 kW متغیر است. طول موج لیزر بسته به نوع ماده، فرآیند و نوع محصول در محدوده ماوراء بنفش (UV) تا میان مادون قرمز (IR) قابل انتخاب است.

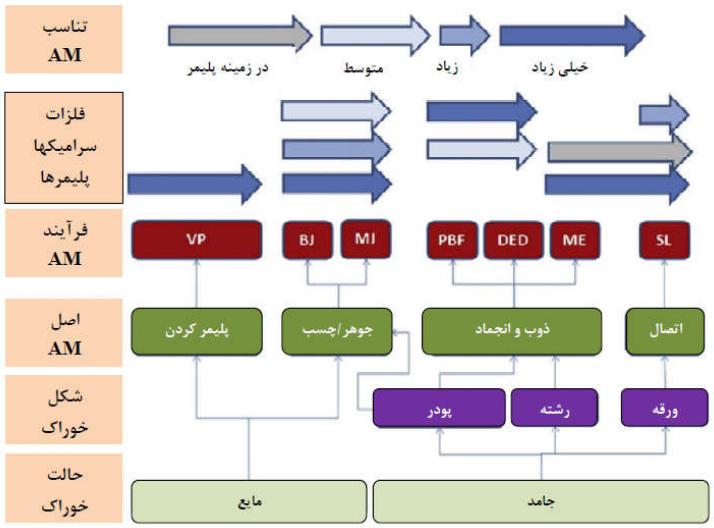
لیزرها را می‌توان با استفاده از طیف وسیعی از منابع از جمله لیزرهای دیودی تا لیزرهای فیبری (رشته‌ای) تولید کرد. استفاده از فیبرهای نوری می‌تواند انعطاف‌پذیری در انتقال قدرت لیزر به نوک ماشینکاری با سطح بسیار بالایی از کنترل و دقت ایجاد کند. فیبرهای نوری ریز با قطرهایی در محدوده زیرمیکرون و طول چند کیلومتر به طور گسترده‌ای در دسترس هستند. از فیبرهای نوری برای انتقال UV و دامنه قابل‌مشاهده نور استفاده می‌شود. در حال حاضر کمبود قابل‌توجه فیبر نوری برای انتقال IR، به ویژه میان مادون قرمز (MIR)، در اندازه نوک به اندازه کافی کوچک و مسافت طولانی وجود دارد. تکنولوژی فیبرهای نوری MIR عمدتا به دلیل تمرکز فعلی آن بر کاربردهای نظامی و فضایی محدود شده است. مواد مناسب برای انتقال MIR در کل دامنه طول موج آن (2–20μm) کمیاب بوده، و تخصص آن نیز محدود است. این فعالیت باید گسترش یابد زیرا لیزرهای MIR همراه با اپتیک و انتقال فیبر نوری مناسب می‌توانند منبع حرارت‌دهی بسیار قوی را برای طیف وسیعی از مواد به دلیل جذب زیاد و انتخابی مواد، در گستره‌ای از پلیمرها تا فلزات و سرامیک‌ها فراهم کنند. MIR همچنین می‌تواند برای فرآوری بعدی انتخابی اجزای چند موادی و اهداف سنجشی استفاده شود.

منبع حرارتی جالب دیگر برای AM می‌تواند اشعه مایکروویو با فرکانس‌های بین 300 MHz و 300 GHz باشد. گرمایش مایکروویو به آرامی جلب توجه می‌کند و اکنون برای زینتر کردن سرامیک‌ها کاملا شناخته شده است. در حالی که فلزات به صورت حجمی مایکروویو را منعکس می‌کنند، پودر فلزات مایکروویوها را در دمای اتاق جذب می‌کنند. از این روش می‌توان برای گرمایش انتخابی، مؤثر، موضعی و سریع فلزات استفاده کرد [33]. یک پروب یا یک سوزن مایکروویو می‌تواند برای ذوب موضعی به روشی مشابه با هر نوع رسوبگذاری با انرژی هدایت شده به کار رود. اما، برخلاف رویکرد میدان دور در گرمایش لیزری، مایکروویو از اثر

میدان نزدیک استفاده می‌کند که نیاز به مجاورت یا تماس نزدیک منبع مایکروویو و شئ مورد فرآوری دارد. گرمایش مایکروویو، یک گرمایش حجمی، سریع و بسیار کارآمد است. این واقعیت که مکانیزم گرمایش و زینتر کردن اساساً با گرمایش تابشی/مقاومتی در زینتر کردن معمولی متفاوت است می‌تواند به جلوگیری از بسیاری از مشکلات مرتبط با انتقال حرارت تابشی کمک کند. درجه جذب مایکروویو با دما تغییر می‌کند بنابراین کل فرآیند را غیرخطی اما بسیار کنترل‌پذیر و تکثیرپذیر برای یک سیستم معین می‌سازد. مایکروویو همچنین می‌تواند برای روش سنجش درجا استفاده شود [34،35] این ناحیه همچنان در مراحل ابتدایی رشد خود در رابطه با پیاده‌سازی عملیات AM تجاری است و شایستگی انجام تحقیقات زیاد در آینده را دارد.

مواد: به سوی "مواد طراح"

بحث در مورد AM اغلب می‌تواند گرفتار جزئیات تکنولوژی‌های تولید، ارتباطات داده‌ها و تغییرات سیستم با تمایل شدید به پیشبرد پارادایم انقلابی صنعت 4.0 یا ساخت 4.0 شود. این بحث‌ها غالباً با آگاهی از این واقعیت است که ساخت مواد را به قطعه یا محصول تبدیل می‌کند. بنابراین مواد نقش بسیار قابل‌توجهی در AM ایفا می‌کنند به ویژه به این دلیل که نحوه رفتار AM با مواد با نحوه رفتار ساخت سنتی با مواد بسیار متفاوت است. ماشین‌آلات و تکنولوژی‌های خاص AM با انواع، اشکال و حالت‌های خاص مواد مرتبط هستند (**شکل 2**). دستگاه و تکنیک AM که برای مثال می‌توانند یک قطعه آلیاژ تیتانیوم برای کاربرد پزشکی تولید کنند، ممکن است نه مناسب برای تولید آلیاژ آلومینیوم و نه قادر به تولید قطعات پلاستیکی باشد. بنابراین ساخت افزودنی (AM) قطعات با ترکیب مواد پیچیده و شیب خواص نیاز به ملاحظات کامل موادی دارد که باید در ساخت شئ نهایی بکار روند [36].



شکل 2- نمودار شماتیک تناسب نسبی ساخت افزودنی سه نوع اصلی مواد (پلیمرها، سرامیک‌ها و فلزات) در انواع مختلف شکل و حالت خوراک مورد استفاده در فرآیندهای دسته‌بندی شده ASTM: جت کردن چسب (BJ)؛ رسوبگذاری با انرژی هدایت شده (DED)؛ اکستروژن مواد (ME)؛ جت کردن مواد (MJ)؛ ذوب در بستر پودر (PBF)؛ لایه‌گذاری ورقه‌ای (SL)؛ و فتوپلیمریزاسیون خمره‌ای (VP).

حتی برای ساخت افزودنی تنها با یک ماده، ملاحظات مواد مهم است. برای مثال، تغییر ساده از پرینتر سه بعدی پلیمری به پرینتر سه بعدی فلزی برای ایجاد شکل و سازه مورد نظر ممکن است به نتایج نهایی فاجعه باری منجر شود. ساخت سنتی در طی گستره چند قرن بر علم و مهندسی مواد مسلط شده است تا اطمینان حاصل کند که شئ تولید شده در حد مطلوبی برای کاربرد در نظر گرفته شده برای طول عمر مورد نظر/نیاز مفید است. با این وجود، اغلب در ساخت سنتی پیاده‌سازی خواص فوق معمول مواد کاربردی پیشرفته دشوار است، به خصوص هنگامی که این خواص از اندازه و شکل مواد منشأ می‌گیرند. برای مثال، جامعه نانومواد با این ریسک روبرو شده است که تحقیقات جالب دانشگاهی غالباً در توسعه تکنولوژی‌ها و محصولات آینده بی‌ربط است [37]. در حالی که AM می‌تواند در حل بسیاری از مسائل مقیاس‌پذیری در ساخت محصول فراهم شده با نانو کمک کند، هیچ نوع راه‌حل "یک اندازه متناسب برای همه انواع" در AM وجود ندارد. مواد تشکیل‌دهنده بار تغذیه (feedstock) جسم جدید باید با دقت طراحی شوند تا متناسب با یک فرآیند AM خاص باشند. شئ ساخته شده باید عمر مفید خود را حفظ کند خبر خوب این است که تحقیقات در مورد توسعه مواد تشکیل‌دهنده بار تغذیه جسم جدید طراحی شده به صورت ویژه، با قابلیت افزایش مقیاس در حال مهم شدن است. اکنون تلاش‌هایی برای درک و غلبه بر چالش‌های مربوط به مواد مرتبط با کاربرد خاص AM وجود دارد.

ساخت سنتی از مواد پیش‌ساخته یا پیش–شکل‌داده شده‌ای استفاده می‌کند که در برخی از اندازه‌ها و اشکال استاندارد تهیه می-شوند که نقطه شروع تولید بعدی را تشکیل می‌دهند استفاده می‌کند. برای مثال، برای ساخت تور سیمی، می‌توان سیم‌های فولادی با اندازه قطر معین و طول کافی را سفارش داد که سپس برشکاری شده و به صورت محصول نهایی بافته می‌شوند. تأمین‌کننده سیم فلزی آن را موجود دارد یا تدارک می‌کند، از چند لایه فروشنده که در نهایت به یک فروشنده کشش سیم منتهی می‌شود که شمش فولادی را از یک کارخانه نورد و یا کارخانه نورد مجدد خریداری کرده است. یک کارخانه ذوب باید ذوب فولاد را طبق ترکیب استاندارد از مواد اولیه یعنی چدن خام، مواد افزودنی (برای مثال فروسیلیسیم) و روانسازها (مثلا آهک) تولید کرده باشد. فولاد مذاب باید ریخته‌گری شود، برای شکستن ساختار ریخته‌گری شده کار گرم بر روی آن انجام گرفته و به صورت بیلت شکل داده شود، که سپس تحت نورد سرد و نورد گرم با عملیات حرارتی میانی برای حذف تنش‌های داخلی قرار می‌گیرد. خواص کشش، خستگی و خزش مطلوب یک سیم فولادی در نتیجه مقدار قابل‌توجهی عملیات حرارتی و مکانیکی در هر حالت فرآوری حاصل می‌شود. هر مرحله از این فرآیندها بر چگالی و نواقصی نظیر نابجایی‌ها در ساختار تأثیر دارد که می‌تواند نقش اساسی در کارکرد ایمن و مطمئن کاربرد مصرف نهایی سیم در تور سیمی ایفا کند. اکستروژن ساده مذاب پودر یا رشته‌های فولاد در تور سیمی ساخته شده با AM ممکن است لزوما همان نتیجه نهایی حاصل از ساخت سنتی را ایجاد نکند. با این حال، AM با موفقیت برای فلزات به کار گرفته شده است. **جدول2** منابع و مشخصات تکنولوژی AM فلزات را به همراه کشور سازنده ارائه می‌دهد [38].

جدول 2– مشخصات عمومی AM فلزات و سازندگان دستگاههای AM (اقتباس از مرجع [38]).

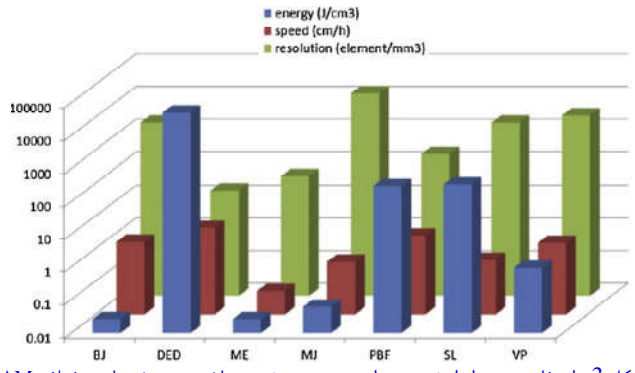
	سیستم و سازنده AM	حجم ساخت (mm*mm*mm)	منبع حرارت و فرآیند	کشور سازنده
بستر پودر	ARCAM (A2)	X = 200-300 Y = 200-300 Z = 200-350	ذوب پرتو الکترونی (EBM)	سوئد
	EOS (M280)		زینتر کردن لیزری مستقیم فلز (DMLS)	آلمان
	Concept Laser Cusing (M3)		زینتر کردن/ذوب کردن لیزری انتخابی (SLS/SLM)	آلمان
	MTT (SLM 250)			آلمان
	Phoenix system group (PXL)			فرانسه
	Renishaw (AM 250)			UK
	Realizer (SLM 250)			آلمان
	Matsuura (Lunnex Advanced 25)			ژاپن
تغذیه پودر	Optomec (LENS 850-R)	X = 600-3200 Y = 1500-3500 Z = 350-1000	شکل دادن بصورت نهائی با لیزر مهندسی شده (LENS)	آمریکا
	POM DMD (66R)		رسوبگذاری مستقیم فلز (DMD)	آمریکا
	Accufusion Laser consolidation		تحکیم لیزری (LC)	کانادا
	Irepa Laser (LF 6000)		رسوبگذاری لیزری (LD)	فرانسه
	Trumpf			آلمان
	Huffman (HC-205)			آمریکا
تغذیه سیم	Sciaky (NG1)	X = 600-750 Y = 500-600 Z = 500-5000	ذوب کردن با پرتو الکترونی (EBM)	آمریکا
	MER plasma FFF		ذوب کردن با قوس پلاسما	آمریکا
	Honeywell ion fusion formation		ذوب کردن با قوس پلاسما	آمریکا

اگر زنجیره‌ای از وقایع در ساخت سنتی را با مورد AM مقایسه کنیم، AM با بار تغذیه خود شروع می‌شود، که می‌تواند پودر جامد، رشته/سیم، ورقه یا حتی یک ماده متشکله جدید مایع یا گازی (برای مثال در رسوبگذاری شیمیایی بخار جت لیزری) باشد. پودرهای فولاد مورد استفاده برای AM از طریق فروشنده‌ای تهیه می‌شوند، برای مثال، یا از ذوب مجدد دمیده شده فولاد که ابتدا از کارخانه ذوب یا کارخانه نورد تهیه شده بود، یا از طریق یک روش کاهنده همانند استفاده از پودرسازی یک میله یا سیم نورد شده "نهائی" یا " نیمه تمام". مطالب منتشره با مثال‌هایی مبنی بر لزوم مراقبت‌های ویژه در این مرحله، فراوان است زیرا این پودرها از بار تغذیه فولادی نهائی/نیمه تمام در واقع مواد خام ثانویه برای AM هستند، که آنها را به محصولی تقریباً نهائی تبدیل می‌کنند.

در حال حاضر، طراحی بار تغذیه AM از طریق روش‌های سعی‌وخطا در آزمایش‌ها انجام می‌شود، که خاص سیستم، گران و زمانبر است. اولین اصل طراحی مواد می‌تواند به میزان قابل‌توجهی تعداد آزمایش‌ها را با استفاده از هدفگیری آزموده خواص اصلی موجود در بار تغذیه، کاهش دهد. مدل‌سازی که امکان بهینه‌سازی محاسباتی را برای حل به اصطلاح "مسئله معکوس" را فراهم کرده قابلیت دستیابی به کنترل ووکسل به ووکسل در ساخت افزودنی را ایجاد می‌کند. هزینه محاسبه مدلسازی فرآیند می‌تواند قابل‌توجه باشد و ممکن است نیاز به محاسبات با عملکرد سطح بالا داشته باشد [18]. ممکن است یک چارچوب یا پلتفرم مدل‌سازی تعمیم-یافته، تولید مواد مقیاس متوسط، که از آن دانش خاص محصول به راحتی قابل استخراج باشد، مورد نیاز باشد.

آماده‌سازی بار تغذیه نیاز به سفارشی سازی برای متناسب‌سازی تکنولوژی AM در نظر گرفته شده دارد زیرا تغییر اندک در خواص بار تغذیه می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر محکمی شئ در حال تولید (انجام کار) و عملکرد محصول نهایی داشته باشد. در بسیاری از موارد، یکنواختی خاصیت ممکن است در طول انجام کار برای اطمینان از تراکم و انسجام کافی بار تغذیه در محصول AM مورد نیاز باشد. خواص سطحی، به ویژه ترکیب شیمیائی و ترکنندگی سطح، نقش مهمی در چسبندگی ذرات درون جسم متراکم خام بازی می‌کنند، که سپس از طریق اتصال یا ذوب می‌توانند به یک ساختار منسجم منتج شوند. با حرکت منبع گرمایش به طول موج بلندتر، منابعی همانند میان و دور IR و منابع مایکروویو، فرآیند انتخابی‌تر می‌شوند زیرا جذب این پرتوهای موج بلندتر به میزان زیادی به ترکیب شیمیایی مواد تشکیل دهنده وابسته است.

از آنجا که AM بر گرفتن شکل و ساختار نهایی تا حد ممکن نزدیک به محصولات نهایی تمرکز می‌کند، ممکن است میزان پس–فرآوری را کاهش دهد. اما، بسیاری از تکنیک‌های سنتی پس–فرآوری می‌توانند به سرعت آماده شوند و به طور بالقوه می-توانند در رشته AM یکپارچه شوند. هنوز هم ممکن است که استراتژی انتخاب مواد فعلی ناکافی باشد و باید استراتژی‌های انتخاب مواد جدید یا جایگزین برای متناسب‌سازی AM یک محصول خاص جستجو شوند. برای مثال، یک جزء فلزی یکپارچه مورد استفاده در ساخت یک محصول، لزوماً به معنای عدم استفاده از این جزء در محصول نیست اگر از یک کامپوزیت زمینه فلزی ساخته شود که ممکن است مشخصات لازم برای هدف مورد نظر محصول را برآورده کند. باید بر الزامات کاربرد تأکید شود و ممکن است نیاز به طراحی مواد انتخابی برای AM وجود داشته باشد.



شکل 3– استفاده نسبی از انرژی در برابر سرعت و وضوح ساخت در روش‌های مختلف AM. اقتباس از مرجع [30]. جت کردن چسب (BJ)؛ رسوبگذاری با انرژی هدایت شده (DED)؛ اکستروژن مواد (ME)؛ جت کردن مواد (MJ)؛ ذوب در بستر پودر (PBF)؛ لایه‌گذاری ورقه‌ای (SL)؛ و فتوپلیمریزاسیون خمره‌ای (VP).

گرمایش و سرمایش گام‌های ضروری در بسیاری از فرآیندهای AM است. **شکل3** انرژی ویژه مورد نیاز در دسته‌بندی فرآیند AM به طور معمول همراه با سرعت و وضوح ساخت قابل حاصل آنها را مقایسه می‌کند. بسیاری از رویکردهای AM همانند BJ از چسبها برای تولید با حرارت نسبتاً کم استفاده می‌کنند. این یک حرکت خوب است اما انتخاب، کاربرد و دوام چسب ممکن است بسیار مهم باشد.

در واقع، بسیاری از چسب‌ها می‌توانند برای تهیه یک محصول کامپوزیت، ترکیبی (هیبریدی) یا FGM که بالقوه می‌توانند جایگزین همتای یکپارچه (مونولیتیک) خود شوند کافی باشند. مجدداً بر حرکت به سوی "مواد طراح" تأکید می‌شود تا با مفهوم معروف "جامد طراح" "ریچارد فینمن" تفسیر شود. اهمیت انجام کار گرم و سرد، عملیات حرارتی و تکمیل سطح می‌تواند برای قطعات فلزی بسیار مهم باشد و در کاربردهای چرخه‌ای بارگذاری و/یا تکرار زیاد یک نگرانی اساسی است. AM فرآیندی است که بر انجماد غیرتعادلی متکی است. بیشتر رویکردهای فرآوری سنتی بر پایه انجماد تعادلی است. بنابراین، شناخت تناسب یک ماده برای

فرآیند تحت محدودیت شرایط کاری AM مهم است. علیرغم استفاده از حرارت و جرم ورودی مشابه، تفاوت‌های ریزساختاری می‌تواند به دلیل انتقال حرارت غیرتعادلی در طی خنک‌کاری باشد [39].

به طور کلی در AM انتظار می‌رود که منطقه تحت تأثیر حرارت به دلیل گرمایش موضعی‌تر و سریع محدود شود. اغلب اعتقاد بر این است که خنک‌کاری سریع و غیرخطی ساختار دانه‌ریز هم محور ایجاد می‌کند، که به طور کلی، حساسیت به ترک خوردن در طی رسوبگذاری را به دلیل توانایی بهتر در جلوگیری از اشاعه ترک، کاهش می‌دهد. همچنین ساختار دانه‌ریز برای بهبود نرمی و چقرمگی شکست نیز شناخته شده است. چنین تعمیم‌هایی باید با احتیاط انجام شود زیرا نمونه‌های فراوانی وجود دارد که خنک‌کاری سریع می‌تواند با این انتظارات مقابله کند، برای مثال با تشکیل یک فاز مارتنزنی سخت و شکننده در هنگامی که فولاد کوانچ می‌شود. هنگام استفاده از تولید در دمای بالا و به دنبال آن خنک‌کاری سریع باید یک رویکرد بیشتر موردی اتخاذ شود.

سرامیک‌ها، به ویژه سرامیک‌های بر پایه اکسید، عموماً کمتر به اکسید شدن حساس هستند و ترکیب شیمیائی پودر آنها حساسیت کمتری به ازهم‌پاشیدگی در طی زمان در مدت ذخیره‌سازی و حمل‌ونقل دارد. اما، کنترل استوکیومتری سرامیک‌های غیراکسیدی در یک تلرانس بسته می‌تواند برای خواص کارکردی بسیار مهم باشد. فرآوری سرامیک‌ها یک تکنیک رشد کرده بالغ است و AM از دانش عظیم تولید و فرآوری پودر سرامیک بهره می‌برد. در واقع، سرامیک‌ها را می‌توان با هر یک از هفت فرآیند طبقه‌بندی شده ASTM و همچنین سایر روش‌های طبقه‌بندی نشده تاکنون همانند الکتروفورز و چاپ الکتروفوتوگرافی در یک مرحله یا فرآیند مستقیم یا یک فرآیند غیرمستقیم چند مرحله‌ای تولید کرد [40]. در فرآیند مستقیم، هم شکل و هم خاصیت کارکردی همزمان حاصل می‌شوند. فرآیندهای یک مرحله‌ای برای شکل دادن سرامیک‌ها شامل رسوبگذاری انرژی هدایت شده و ذوب بستر پودری یک مرحله‌ای همانند فرآیندهای ذوب لیزری انتخابی (SLM) و زینتر کردن لیزری انتخابی (SLS) است. اتصال بین ذرات سرامیک از طریق اتصال شیمیایی، زینتر کردن حالت جامد، ذوب جزئی و کامل ذرات حاصل می‌شود.

گرچه تکنیک‌های تک مرحله‌ای گردش سریع سرمایه در تولید قطعات سرامیکی را ارائه می‌دهند، بخش قابل‌توجهی از فرآیندهای AM مورد استفاده برای سرامیک‌ها فرآیندهای چند مرحله‌ای (غیرمستقیم) است، که در آنها مرحله شکل‌دهی با یک یا چند مرحله تحکیم شکل و کارکرد دنبال می‌شود. چسب معمولاً برای حفظ تحکیم پودر در یک شکل به کار می‌رود. سپس چسب از طریق یک یا چند مرحله "چسب‌زدائی" زدوده می‌شود [41،42]. انتخاب چسب در این فرآیندها برای هر سیلان و بهم پیوستگی ذرات (اگلومراسیون) در طی فرآیند AM مهم است. اگر پارامترهای فرآیند AM بهینه شوند، می‌توان از ترک‌ها و تخلخل بزرگ در ساخت اجزای سرامیکی جلوگیری کرد. این امر به خواص مکانیکی سرامیک‌های تولید شده با AM قابل مقایسه با سرامیک‌های معمولی منتج می‌شود. در بسیاری از موارد ممکن است برای دستیابی به خواص مکانیکی رضایت‌بخش، مراحل تراکم‌دهی اضافی ضرورت داشته باشند. انقباض ناهمسانگرد (انیزوتروپیک) در طی تحکیم پس از AM باید کنترل شود تا از تأثیر منفی بر دقت ابعادی قطعات نهایی جلوگیری شود [43].

پلیمرها به عنوان موادی برای ساخت افزودنی پلاستیک‌ها، کامپوزیت‌های زمینه پلیمر و مواد درجه‌بندی شده کارکردی (FGM) با هدف تنوعی از کاربردها بسیار محبوب بوده‌اند [46–44]. این امر به دلیل دمای نسبتاً پایین ذوب و پخت، قابلیت عالی سیلان در هنگام ذوب شدن یا نرم شدن و پایداری شیمیایی پلیمرها است. آنها می‌توانند با تغذیه به صورت مایع، پودر، رشته یا ورق مورد فرآوری AM قرار گیرند. تکنیک‌های جت کردن مواد و فوتوپلیمرزاسیون متداولتر هستند [47] گرچه تمام فرآیندهای شناخته شده AM در صورت وجود فرمول‌های مناسب پلیمرها یا قابلیت توسعه امکان استفاده را دارند. این می‌تواند یک عامل محدودکننده برای فرآیند AM بر پایه زینتر کردن لیزری باشد، که برای آن در حال حاضر، فقط پلی آمید (PA) بر پایه فرمولاسیون‌های PA12 و PA11 استفاده شده‌اند [48]. به دلیل نیاز به داشتن قطعات و نمونه‌های اولیه‌ای که بتوانند پایداری مکانیکی، ابعادی و شیمیایی قابل‌توجه در دما و فشار بالا حتی بعد از قرار گرفتن در معرض شرایط بسیار سخت از جمله مواردی که

برای مثال در فرآیندهای AM با آن روبرو هستند، حرکت به سمت استفاده از پلیمرهای با عملکرد بالا است. چنین پلیمرهائی می-توانند آمورف (برای مثال پلی سولفون، پلی اتر ایمید) یا پلیمرهای نیمه کریستالی (پلی فنیلن سولفید، پلی اتر ترکتون) باشند. پلیمرهای کریستال مایع مختلف نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در بسیاری موارد، عملکرد پلیمرهای معمولی برای ساخت افزودنی با اضافه کردن پرکننده‌های خاص همانند گرافن، نانولوله‌های کربن، نانو سلولز، نانوکلی و نانوسیلیکا می‌تواند ارتقا یابد.

گستره اندازه مواد بار تغذیه می‌تواند از نانومتر تا میکرومتر تا میلیمتر باشد. اما، خواص کلوئیدی و رئولوژیکی ذرات، قطرات، افزودنی‌ها، پرکننده‌ها و چسب‌ها در بار تغذیه باید به دقت مورد توجه قرار گیرد. ذرات فلزی حساسترین مورد به از هم‌پاشیدگی محیطی برای مثال به دلیل رطوبت و اکسیژن هستند. آنها می‌توانند آتش‌زا نیز باشند و نیاز به مراقبت ویژه در انبارش و حمل‌ونقل دارند. فرآیند ساخت پودر فلز ممکن است سبب تغییرشکل پلاستیک و کرنش داخلی شدید شود، که می‌تواند باعث پیرسازی گردد. زمان از تولید این پودرها تا استفاده از آنها می‌تواند بر فرآیند AM و خواص نهایی محصول AM تأثیر بگذارد. باید توجه ویژه‌ای در هنگام بازیافت مواد بی‌استفاده صرفنظر از اینکه آنها فلز، سرامیک یا پلیمر هستند معطوف شود. تاریخچه حرارتی ممکن است سبب از هم‌پاشیدگی [تجزیه] مواد خوراک به ویژه هنگامی شوند که این مواد به طور خاص برای یک فرآیند AM هدف تهیه شده تا خاصیت کارکردی مورد نظر را دارا باشند.

بنابراین، بار تغذیه در AM به تفکر طراحی بسیار شدیدتری نسبت به ساخت سنتی نیاز دارند. مواد خام مورد استفاده در AM [مواد خام] ثانویه محسوب می‌شوند زیرا معمولاً قبل از استفاده در تولید صنعتی نیاز به پیش–فرآوری دقیق دارند. علاوه بر ترکیب شیمیایی ذاتی، خواص حرارتی (گرمای ویژه، تبلور و تبلور مجدد، ذوب سطحی و حجمی، انجماد تعادلی و غیرتعادلی، انحلال و رسوب فاز، گرمای نهان، انبساط و هدایت حرارتی، انتقال شیشه‌ای در مورد پلیمرها)، نوری/الکترونیکی (جذب، بازتاب، انتقال در صورت استفاده از فرآیند فوتون یا تابش) و خواص رئولوژیکی (ویسکوزیته ذوب، کشش سطحی) این مواد خام ثانویه نیز از ملاحظات ذاتی هستند. خواص عارض شده از بیرون که نیاز به ملاحظات ویژه دارند عبارتند از: فرآیند ساخت خوراک (رسوب کردن، فرسایش، اچ کاری، خرد کردن/آسیاب گلوله‌ای، آسیاب کردن در دمای زیر صفر درجه، ذوب با تخلیه الکتریکی)، شکل و سطح خوراک (نامنظمی، گوشه‌های تیز، صاف، کروی، مسطح، زبر، بافت دار، پوشش شده)، خواص کلوئیدی (اندازه، توزیع، پراکندگی، بهم پیوستگی (آگلومره شدن)) و جریان از طریق سیستم تغذیه (برای مثال نازل) در شرایط تغذیه. جدول 3 موارد مرتبط با مواد را که باید در AM بررسی شود، خلاصه می کند.

اندازه گیری‌ها: به سمت زمان واقعی، درون خطی (اینلاین)، تضمین کیفیت

در حالی که بازرسی و تضمین کیفیت اساس ساخت قدیمی و مدرن بوده‌اند، این موضوع برای AM نسبتاً جدید است. اما، این زمینه به سرعت در حال رشد می‌باشد زیرا موفقیت AM به شدت به تضمین کیفیت قوی وابسته است. در یک بررسی pwc [شرکت بین المللی مشاوره مدیریت، امور مالی و حسابداری] تقریبا نیمی از تولیدکنندگان مورد بررسی نشان دادند که کیفیت نامشخص محصول نهایی مانعی برای پذیرش AM است [49]. اندازه‌گیری‌ها زیربنای بهینه‌سازی فرآیند، بازرسی و نظارت و تضمین کیفیت محصول هستند. در حالی‌که ما می‌توانیم برخی شکل‌ها و سازه‌های بسیار پیچیده و غیرمتعارف را با ساخت افزودنی بسازیم، ولی هنوز در حال برقرار کردن یک برنامه تضمین کیفیت قوی عمدتاً به دلیل عدم وجود ابزارها و روش‌های سنجش مناسب و کافی برای روش‌های مختلف AM هستیم.

سنجش، علم و عمل اندازه گیری، برای AM نه تنها از نظر اعتماد به تکنولوژی بلکه همچنین به دلیل کسب حمایت بازار با عملکرد یکنواخت و قابل اعتماد قطعات ساخته شده توسط AM، ضروری است. این موضوع به زودی به یک الزام قانونی و مالی برای محصولات AM که در بازار به فروش می‌رسند تبدیل می‌شود. مشابه شناخت ریسک مربوط به نانومواد [50،51]، متعهد کردن جامعه به اقدامات کافی و استاندارد شده برای تعیین خواص کارکردی، شکل و تلرانس ابعادی و عملکرد محصولات AM

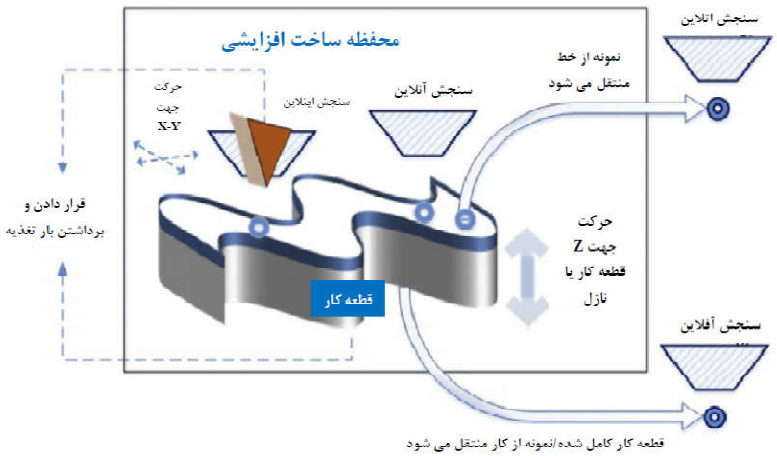
برای بیمه، نیاز دارد. از سوی دیگر، سنجش از اهمیت یکسانی برای کنترل و بهینه سازی AM برخوردار است به طوری که تولید با استفاده بهتر از مواد خوراک گران قیمت، افزایش بهره‌دهی تولید، کاهش قطعات رد شده، افزایش بازدهی انرژی و کاهش الزام فرآوری پس از تولید در هزینه کم باقی می‌ماند.

جدول 3- خواص ذاتی و بیرونی مواد بار تغذیه، رویکرد و تکنیک‌های سنجشی مربوط به AM. XPS: طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس؛ ToF-SIMS: زمان پرواز طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه. PSA: آنالایزر اندازه ذرات؛ DSC: کالریمتر اسکن کردن افتراقی؛ DTA: آنالیز حرارتی افتراقی؛ TGA: آنالیز ترموگراویمتری؛ DMA: آنالایزر مکانیکی دینامیک؛ SEM: میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ TEM: میکروسکوپ الکترونی عبوری؛ EDX: طیف‌سنجی اشعه ایکس پراکنش انرژی؛ FT-IR: طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه؛ Raman: طیف‌سنجی Raman؛ IR-M: میکروسکوپ مادون قرمز؛ CARS: طیف‌سنجی منسجم آنتی استوکس Raman؛ c-OBF: Confocal Optical Birefringence؛ TSDC: جریان دپلاریزاسیون تحریک شده حرارتی؛ XRD: پراش اشعه ایکس؛ EBSD: پراش افترافی الکترون برگشتی؛ LM: میکروسکوپ نوری قابل مشاهده؛ PM: میکروسکوپ پلاریزاسیونی؛ X-CT: توموگرافی محاسباتی با اشعه ایکس؛ IR-T: ترموگرافی مادون قرمز؛ ZP: اندازه گیری پتانسیل زتا؛ EK: اندازه‌گیری الکتروکینتیکی؛ DLS: پراکنش دینامیک نور؛ AAS: طیف-سنجی جذب اتمی؛ UV-Vis: طیف‌سنجی جذب نور ماوراء بنفش قابل مشاهده؛ IR: مادون قرمز؛ GM: گراویمتری؛ MW: مایکروویو؛ CA: اندازه‌گیری زاویه تماس؛ AFM: میکروسکوپ نیروی اتمی؛ SFG: طیف‌سنجی/میکروسکوپی تولید فرکانس جمع.

خاصیت	عوامل مواد	خاصیت خاص مورد علاقه	رویکرد سنجش	روش خاص/بالقوه سنجش
ذاتی	ترکیب شیمیائی حجمی	عنصری	آفلاین / اتلاین	AAS, UV-Vis, IR, EDX, GM, ToF-SIMS
		اتصال مولکولی	آفلاین / اتلاین	Raman, FTIR, CD
	ترکیب شیمیائی سطحی	عنصری	آفلاین / اتلاین	XPS, AAS, UV-Vis, FTIR, EDX
		اتصال مولکولی	آفلاین / اتلاین	XPS, ToF-SIMS, Raman, FTIR, SFG
	اندازه	متوسط اندازه و توزیع اندازه	آفلاین / اتلاین	
	حرارتی	گرمای ویژه، گرمای نهان،	آفلاین / اتلاین	DSC, DTA, TGA,
		دماهای ذوب / انجماد، تبلور (مجدد)، نرم شدن، انتقال شیشه ای	آنلاین / اینلاین	Optical pyrometry IR thermography
		انبساط	آفلاین	Dilatometry
		حلالیت، رسوب کردن فاز	آفلاین / اتلاین	TGA, FTIR, Raman
			آنلاین / اینلاین	LM, IRM
		انجماد تعادلی و غیر تعادلی	آفلاین	DTA
	نوری	جذب / انعکاس نوری / انتقال / پلاریزاسیون / birefringence	آفلاین / اتلاین / آنلاین / اینلاین	UV-Vis, IR, MW
	رئولوژیکی	ویسکوزیته مذاب	آفلاین	Rheometry
		کشش سطحی	آفلاین	CA
		ناکشسانی (ویسکوالاستسیته)	آفلاین	DMA
بیرونی	تاریخچه فرآیند	رسوب کردن، فرسایش، اچ کاری، خردکردن،آسیاب گلوله ای،آسیاب در دمای زیر صفر، EDM	آفلاین	مشخصات و داده های ارائه دهنده
	شکل/سطح/مورفولوژی	بی نظمی، گوشه تیز، شکل کروی / مسطح، پوشش	آفلاین	LM, PM, SEM, TEM, Raman, IRM
		زبری یا صافی	آفلاین / اتلاین	AFM, profilometry
			آنلاین / اینلاین	Optical profilometry
		بافت	آفلاین / اتلاین	XRD, EBSD, SEM, TEM, LM, PM, IRM
			آنلاین / اینلاین	xCT, IRT
	کلوئیدی	اندازه، توزیع، پراکندگی، تجمع	آفلاین / اتلاین	ZP, EK, DLS

سنجش در AM می‌تواند در داخل محفظه ساخت (درجا) یا خارج از محفظه (خارج از محل یا آفلاین) انجام شود. طرح **شکل 4** این رویکردها را در آنالیز سنجش توضیح می‌دهد. در رویکرد درجا، ابزارهای سنجش یکپارچه شده با نازل متحرک یا منبع گرمایشی AM می‌توانند روش راحتی را برای انجام بررسی در زمان واقعی رسوب کردن، ذوب کردن، انجماد و تحکیم در همان نقطه فراهم کنند (علامت حلقوی در شکل 4). استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری سریع برای مثال نوری، اشعه X، پرتوی الکترونی، پروب التراسوند یا اسکن‌کننده می‌تواند برای چنین اندازه گیری‌هایی انجام شود. رویکرد پرتو از راه دور با اسکن کردن یک نقطه کانونی که همراه با نازل رسوب‌دهنده/منبع گرما به صورت متوالی حرکت می‌کند نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

رویکرد آخری در AM فلز استفاده شده است که در آن یک دوربین همراه با شارژ با نور مرئی (CCD) یا یک دوربین مادون قرمز (IR) نصب‌شده در بیرون، آنالیز درجا، بدون تماس، غیرمخرب از آنالیز حوضچه مذاب مونتاژ گردیده است [52]. قطعه ساخته‌شده را نیز می‌توان درجا، اما در حالی که کار هنوز در خط تولید (سنجش آنلاین در شکل 4) در یک نقطه نمونه که قبلاً رسوبگذاری شده و یا ذوب کردن، سرد شدن و انجماد آن در جریان می‌باشد یا تکمیل شده است مورد آنالیز قرار داد. این رویکرد به راحتی امکان تعیین محل نقطه نمونه به میزان کافی دور از محل رسوب را در حالی که هنوز اطلاعات درجا را ارائه می‌دهد فراهم می‌کند. هر دو رویکرد بر پایه پرتو و پروب می‌توانند برای چنین آنالیزهایی مناسب باشند. در رویکرد سنجش خارج از محل، یک نمونه را می‌توان از یک نقطه انتخاب شده دلخواه خارج کرد (علامت حلقوی در شکل 4). سپس نمونه خارج شده می‌تواند برای سنجش و آنالیز به خارج از محفظه منتقل شود. این تکنیک به حداقل میزان مخرب است زیرا آسیب نمونه‌برداری در قطعه را می‌توان در رسوبگذاری متوالی لایه بعدی ترمیم کرد. سرانجام، کار تکمیل‌شده یا قطعه‌ای از کار را می‌توان برای آنالیز سنجش خارج از محل به صورت آفلاین، ارسال کرد. این رویکرد اطلاعات فرآیند زمان واقعی را فراهم نمی‌کند و ممکن است در آماده‌سازی نمونه به فرآیند مخربی احتیاج داشته باشد، اما اطلاعات ارزشمندی را از نظر متغیرهای فرآیند که ممکن است مانع عملکرد مطلوب یا کیفیت مکفی باشند فراهم می‌کند. تکنیک‌های خارج از کارخانه نیز امکان مباحث جدلی بسیار مفصل‌تر مسائل مواد را که می‌توانند با عملکرد قطعه ساخته‌شده با AM مرتبط باشند فراهم می‌سازند.



شکل 4- طرحی از روش‌های سنجش در AM.

صرف‌نظر از فرآیند یا تکنولوژی AM خاص مورد استفاده، قطعات AM عموماً چالش‌ها و مسائل مشابه مربوط به سنجش را ارائه می‌دهند [53]. این موضوع امکان انجام یک بحث کلی در مورد مسائل سنجش مربوط به AM بدون کاوش در جزئیات خاص فرآیند و مشکلات مربوط به تکنیک را فراهم می‌کند. برای مثال فرآیندهای بازرسی قطعات ساخته‌شده از متالورژی پودر می‌توانند در شناخت قطعات شکل داده شده با استفاده از AM فلز آموزنده باشند [54-56]. در حال حاضر آزمایش‌های غیرمخرب (NDT) موجود می‌توانند نقطه شروع خوبی برای تشخیص و توصیف نواقص ملاحظه‌شده قابل‌توجه باشند، اگرچه تعریف یک نقص و اندازه آن بستگی به نوع مواد خوراک (فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها، ترکیبی (هیبریدی))، فرآیند و تکنیک AM مربوطه، کاربرد مورد نظر و علم پایه مواد رابطه ساختار–خاصیت دارد. **جدول 4** تعدادی از مسائل کلی مربوط به AM را ذکر کرده و رویکردهای سنجش را که می‌توانند برای مقابله با این مسائل اتخاذ شوند پیشنهاد می‌دهد.

اکنون، تولیدکنندگان ابزار AM بر روش‌های درجای سنجش ابعاد کار در حال ساخت (سنجش ابعادی) تأکید می‌کنند. تلرانس‌های ابعادی قطعه AM مهم هستند اما به دلیل تأکید AM بر توانایی آن در ایجاد اشکال و ویژگی‌ها در قطعه، حائز اهمیت است که تعیین کرد این موارد نیز درون محدوده تلرانس ابعاد مورد نظر و اشکال طراحی شده باشند. این امر به نوبه خود امکان مونتاژ کردن اجزای مرکب (پیچیده) را می‌دهد اگر همه آنها درون محدوده تلرانس‌های معین مورد انتظار و توافق شده ساخته شوند. چنین

رویکردی باعث می‌شود اعتماد بالایی نسبت به محصول، بهبود بازدهی انرژی و کاهش مواد ضایعات، کاهش زمان فرآوری اضافی و کاهش هزینه فراهم شود.

جدول 4- مسائل مواد عمومی و روش سنجش مناسب برای AM. XPS: طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس؛ ToF-SIMS: زمان پرواز طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه. PSA: آنالایزر اندازه ذرات؛ DSC: کالریمتر اسکن کردن افتراقی؛ DTA: آنالیز حرارتی افتراقی؛ TGA: آنالیز ترموگراویمتری؛ DMA: آنالایزر مکانیکی دینامیک؛ SEM: میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ TEM: میکروسکوپ الکترونی عبوری؛ EDX: طیف‌سنجی اشعه ایکس پراکنش انرژی؛ FT-IR: طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه؛ Raman: طیف‌سنجی Raman؛ IR-M: میکروسکوپ مادون قرمز؛ CARS: طیف‌سنجی منسجم آنتی استوکس Raman؛ c-OBF: Confocal Optical Birefringence؛ TSDC: جریان دپلاریزاسیون تحریک شده حرارتی؛ XRD: پراش اشعه ایکس؛ EBSD: پراش افتراقی الکترون برگشتی؛ LM: میکروسکوپ نوری قابل مشاهده؛ PM: میکروسکوپ پلاریزاسیونی؛ X-CT: توموگرافی محاسباتی با اشعه ایکس؛ IR-T: ترموگرافی مادون قرمز؛ ZP: اندازه‌گیری پتانسیل زتا؛ EK: اندازه‌گیری الکتروکینتیکی؛ DLS: پراکنش دینامیک نور؛ AAS: طیف‌سنجی جذب اتمی؛ UV-Vis: طیف-سنجی جذب نور ماوراء بنفش قابل مشاهده؛ IR: مادون قرمز؛ GM: گراویمتری؛ MW: مایکروویو؛ CA: اندازه‌گیری زاویه تماس؛ AFM: میکروسکوپ نیروی اتمی؛ SFG: طیف-سنجی/میکروسکوپی تولید فرکانس جمع.

عوامل مواد	خاصیت خاص مورد علاقه	رویکرد سنجش	روش خاص/بالقوه سنجش
جامد (پودر، سیم، ورق) یا آماده سازی/ مهندسی / اصلاح بار تغذیه مایع			
ترکیب شیمیائی سطحی/ ترکیب شیمیائی چسب، پرکننده، متصل کننده و فلاکسها	عنصری	آفلاین/ اتلاین	XPS, AAS, UV-Vis, IR, EDX
	اتصال مولکولی	آفلاین/ اتلاین	XPS, ToF-SIMS, Raman, FTIR, SFG
ترشوندگی	انرژی سطحی	آفلاین/ اتلاین	CA
	بار سطحی		
تکمیل	زبری سطح	آفلاین/ اتلاین	AFM, Profilometry
ناهمسانگردی	بافت	آفلاین/ اتلاین	XRD, EM, LM, PM
نظارت بر ساخت قطعه			
شکل، اندازه و حجم ساخت	ابعاد	آنلاین/ اینلاین	سنجش تماسی
			سنجش نوری
ترکیب شیمیائی سطحی	اتصال مولکولی	آنلاین/ اینلاین	Raman, FTIR, SFG
ریزساختار و تخلخل	اندازه قطره / حوضچه مذاب	آنلاین/ اینلاین	IR-T, LM, PM, EM
ریزساختار	دانه ها، مرزدانه ها، ترک‌ها و نواقص	آنلاین/ اینلاین/ اتلاین/آفلاین	IR-M, Raman, PM, LM, EM. Raman, FTIR, IRM, SFG
مدیریت حرارتی	توزیع و پراکندگی حرارت، تنش حرارتی	آنلاین/ اینلاین	IR-T
فرآوری پس از ساخت			
حرارتی	تنش داخلی	آفلاین	XRD
انجام کار گرم و سرد	دانه‌ها،مرزدانه‌ها،ترک‌ها و نواقص شامل نابجائی‌ها	آفلاین	EM, LM, PM
عملیات حرارتی	تنش زدائی، اصلاح دانه (ریز کردن)	آفلاین	XRD, EM, LM, PM
تکمیل سطح	زبری	آفلاین	AFM, Profilometry

در AM استفاده از ساخت لایه به لایه یک فضای مفروش سه بعدی به یک استراتژی ساخت دو بعدی ختم می‌شود که ممکن است به ناپیوستگی‌ها در همه جهات ساخت منجر شود. در نتیجه، محصولات AM اغلب از عدم دقت ابعادی، حالت نهائی سطح غیرقابل قبول، ناهمسانگردی (ان ایزوتروپی) ساختاری و مکانیکی رنج می‌برند. [57-61]. وضوح ابعادی AM با ابزارهای موجود که ابعاد آنها متناهی است محدود می‌شود. این می‌تواند به تفاوت‌های بین طراحی مجازی و واقعی در AM منجر شود [62]. در نتیجه، ویژگی‌های ساختاری داخلی ممکن است در طی فرآیند AM به خوبی عاید نشوند؛ ناپیوستگی‌های داخلی (تخلخلها) ممکن است ظاهر شوند؛ و حالت تکمیل سطح ممکن است به دلیل تغییرات زبری محدود نباشد. علاوه بر این نواقص، در محصول AM می‌توانند مواد ناخواسته‌ای گیر افتاده باشند که تراکم موضعی ساختار و نیز توزیع موضعی تنش را تغییر می‌دهند و به عنوان یک آغازگر ترک داخلی عمل می‌کنند و بنابراین بر عملکرد مورد انتظار از طراحی مجازی تأثیر می‌گذارند. استراتژی‌هایی برای غلبه بر این نواقص در طی فرآیند AM وجود دارد اما تعیین ویژگی‌های چنین نواقصی مکمل بهینه‌سازی این فرآیند AM است [63]. از تعدادی تکنیک تعیین ویژگی‌ها برای کنترل در زمان واقعی نواقص ساختاری و ریزساختاری در قطعات AM استفاده

شده است تا اطلاعاتی در مورد شبکه منافذ داخلی ایجاد شده از فرآیند، زبری سطح، حجم قطعه و میزان مواد پشتیبان گیر افتاده ارائه شود. این تکنیک‌ها شامل توموگرافی نوری، توموگرافی اشعه x، آنالیز توموگرافی یا پایش التراسونیک می‌باشند.

بیشتر ساخت بر نوعی از روش سنجش ابعادی برای مثال اندازه‌گیری‌های مختصات تماسی/نوری به هنگام ساخت شئ متکی است. تکنیک‌های تماسی آهسته هستند، ولی برای اشیاء منظم هندسی دقیق می‌باشند. اما، این تکنیک‌ها به میزان زیادی برای محصولات AM که اشکال آنها انحراف قابل‌توجهی از اشکال ساده هندسی دارند ناکارآمد هستند. علاوه بر این، بسیاری از فرآیندهای AM ساختارهای سه بعدی ایجاد می‌کنند، که قسمت داخلی آنها با سیستم‌های سنجش تماسی قابل اندازه‌گیری نیست. اندازه‌گیری بافت و نواقص فرآیندی به میزان زیادی به هر دو تکنیک آفلاین مخرب و غیرمخرب تعیین ویژگی‌ها همانند توموگرافی محاسباتی اشعه X (X-CT) و میکروسکوپ الکترونی (EM) بستگی دارد. تکنیک‌های غیرمخرب همانند تصویربرداری حرارتی IR، در حالی که برای نظارت بر مدیریت حرارتی بسیار عالی هستند، تنها اطلاعات تلرانسی محدودی را می‌تواند تامین نمایند. X-CT و برخی میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) با فشار نسبتاً بالا می‌توانند در محفظه ساخت برای سنجش اینلاین و آنلاین یکپارچه شوند.

ساخت افزودنی آزادی طراحی بی‌نهایتی را برای ایجاد سازه‌ها، شکل‌ها و صورت‌های پیچیده بغرنج طیف عظیمی از مواد فراهم می‌کند – همه با سرعت بسیار بالایی تولید می‌شوند. این موضوع پیدا کردن یک ابزار سنجش اینلاین از مجموعه تکنیک‌های فعلی بسیار دشوار می‌کند. اندازه‌گیری تماسی به دلیل وجود مقدار زیادی از سطوح در یک ساخته سه بعدی که اکثر آنها با پروب تماسی غیرقابل دسترس هستند، ناکارآمد می‌شود. تغییر به روش غیرتماسی همچون روش‌هایی که بر اساس روش‌های سنجش نوری، الکتریکی یا مغناطیسی انجام می‌شوند، لازم خواهد بود. به ویژه، دامنه سنجش نوری برای سنجش اینلاین و آنلاین نسبتا وسیع است [70]. یکی از عوامل سهیم در این قابلیت سنجش نوری این است که تکنیک‌های نوری از قبل جزئی از دقت مهندسی در لیتوگرافی نوری و ماشینکاری لیزری بوده‌اند. تصویربرداری نور مرئی معمولاً کنتراست (تضاد نوری) تصویر ضعیفی در پلیمرها، مواد بیولوژیکی و سرامیک‌های شفاف ایجاد می‌کند. این امر می‌تواند با تغییر به اپتیک غیرخطی که در آن کنتراست از خواص ذاتی شیمیایی و ساختاری مواد حاصل می‌شود بهبود یابد. مثال‌ها شامل استفاده از میکروسکوپ پلاریزاسیون، اسپکترومیکروسکوپ Raman و مادون قرمز است [71].

اکنون بسیاری از تولیدکنندگان برجسته دستگاه‌های AM مدول‌های پایش درجا و بازخورد حلقه بسته را ارائه می‌دهند که می‌توان آنها را به دستگاه اصلی AM مورد استفاده در روش ذوب در بستر پودر و رسوبگذاری انرژی هدایت شده اضافه کرد. بیشتر این مدول‌ها بجای هرگونه آنالیز قابل‌توجه نقص شامل دوربین پایش حوضچه مذاب بر پایه تصویر هستند. اما، در بسیاری از موارد، داده‌های تولید شده ذخیره می‌شوند اما در زمان واقعی برای بازخورد حلقه بسته آنالیز نمی‌شوند [72]. سنجش در AM هنوز یک مسئله چالش‌برانگیز است، زیرا به نظر می‌رسد که تکنیک‌های غیرمخرب کارآمدی برای ارزیابی صحیح عملکرد قطعه AM هنوز کاملاً در دسترس نیستند [73]. اندازه‌گیری‌های درجای فرآیندهای AM، همانند فرآیندهای ذوب بستر پودر بر پایه فلزات، نیاز به اندازه‌گیری‌های سرعت بالای ذوب و خنک‌کاری سریع موضعی دارد. حرکت منبع گرما با سرعت و شتاب بالا چالش دیگری از تمرکز مجدد ثابت دستگاه تصویربرداری به صورت متوالی با حرکت را مطرح می‌کند. محل قرارگیری سیستم سنسور تصویربرداری در محفظه AM نباید با عملیات عادی دستگاه (مثلاً پخش یا تنظیم پودرها، ذوب کردن، خنک کردن)، شرایط محیطی (برای مثال اتمسفر خنثی یا خلاء) و سیستم‌های ایمنی (مثلاً محافظت از لیزر) تداخل داشته باشند. مهمتر از همه، سیستم سنسور باید از آلودگی ناشی از خرده‌های باقیمانده و محصولات فرعی مصون باشد.

ویژگی‌های مواد قطعات AM نیز توسط دستگاه AM به چالش کشیده می‌شود و تغییرپذیری فرآیند نیاز به سطح بالایی از سفارشی‌سازی تکنیک‌های اندازه‌گیری درجا دارد. استفاده از تصویربرداری بر پایه لیزر می‌تواند در رفع نیازهای سنجش AM بسیار

مفید باشد. تصویربرداری سریع در زمان واقعی با اسکن کردن لیزری سطوح واقعی در آنالیز بافت سطح نشان داده شده است [74]. تکنیک‌های تصویربرداری همانند تصویربرداری کانفوکال (هم کانون)، توموگرافی منسجم نوری (OCT) و توموگرافی IR می‌توانند اطلاعات زیرسطحی را ارائه دهند. در بسیاری موارد، تصویربرداری طیف‌سنجی (اسپکتروسکوپی) بر پایه لیزر نیز می‌تواند ترکیب شیمیائی سطح و داخل سازه را نشان دهد. یکی از بزرگترین چالش‌های رویکردهای بر پایه تصویر این است که داده‌های بزرگی را نیز تولید می‌کند که از طریق آن باید تصمیم‌گیری سریع و آنلاین با استفاده از پردازش تصویر، تشخیص الگو و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری اتوماتیک، با توجه به بهینه‌کاوی مناسب انجام شود. آنگاه رویای ساخت دیجیتال از راه دور (DDM) یک قدم نزدیکتر از طریق انتقال و به اشتراک‌گذاری این داده‌ها با کاربر نهایی می‌شود، کسی که بعدا می‌تواند از محل کار خود تولید محصول خود در یک کارخانه ریخته‌گری در دور دست را سفارشی‌سازی کند.

رویکردهای کاملاً جدید به طراحی ابزار بر پایه ترکیبی از تخصص و نوآوری به غلبه بر موانع نیازهای ابزار دقیق فعلی برای دقت و سرعت اندازه‌گیری مورد نیاز برای عملیات AM کمک خواهد کرد. تحقیقات بنیادی برای توسعه نسل بعدی تکنیک‌های اندازه‌گیری ابعادی، بافت، مکانیکی و شیمیایی قطعات ساخته شده از ساخت افزودنی مورد نیاز خواهد بود. این تکنیک‌های جدید باید دقت بالاتر و سرعت اندازه‌گیری سریعتری را در یک محیط عملیاتی AM ارائه دهند. روش‌های غیرتماسی همچون تکنیک-های نوری و اشعه X باید سفارشی‌سازی شوند تا توانائی اندازه‌گیری در محیط به صورت سریع و در زمان واقعی انجام شود. این اندازه‌گیری‌ها باید با توجه به تکنیک‌های آفلاین، که از دقت بالاتری برخوردار هستند، اما کند بوده و گنجاندن آنها در محیط ساخت دشوار است، به صورتی مناسب بهینه‌کاوی شوند. روش‌ها و نمونه‌های کالیبراسیون [75] برای این رویکردها، تکنیک‌ها و روش‌های جدید سنجش باید تهیه شوند.

بازار: محرک از "آزمایشگاه" تا "کارخانه"

بازار صنعت AM از اولین ثبت اختراع مربوطه در سال 1986 [76] و اولین دستگاه چاپ سه بعدی (بر پایه استریو-لیتوگرافی) ساخته‌شده توسط شرکت 3D Systems در اواخر دهه 1980، در اولین دهه به میزان قابل‌توجهی رشد کرد (تقریبا 1 میلیارد دلار – سال 1997). به طور همزمان، AM از نمونه‌سازی سریع به نمونه‌سازی کارکردی منتقل شده است. امروزه AM در کلیه بخش‌های صنایع از فضا گرفته تا اسباب بازی و مواد غذایی استفاده می‌شود و نمایانگر یک صنعت چند میلیارد دلاری است. امروزه ماشین‌آلات ارزان AM را قابل‌دسترس‌تر از هر زمانی تاکنون می‌کند، تا حدودی به دلیل اختراع FFF. امروزه یک ماشین AM جدید با قیمت 500 دلار در مقایسه با بیش از 100 هزار دلار در دهه 1990 قابل خریداری است. آینده AM بیشتر به سمت نوآوری طراحی و مواد جهت تولید محصولات واقعی کشیده خواهد شد. برخی از کاربردهای اصلی AM در زیر ذکر شده است:

صنعت خودرو	• ادغام تعداد زیادی از قطعات در یک قطعه مرکب یکپارچه • ساخت وسایل تولید • تولید قطعات یدکی و لوازم جانبی • استانداردسازی سریع
هوافضا/هوانوردی	• تولید لوازم جانبی با شکل هندسی پیچیده • کنترل تراکم، خواص مکانیکی • تولید لوازم جانبی سبک‌تر
پزشکی/صنعت داروسازی	• برنامه‌ریزی عمل جراحی با استفاده از مدل‌های دقیق آناتومیک که براساس توموگرافی محاسباتی (CT) یا تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI) انجام می‌شوند. • توسعه ایمپلنت‌ها و پروتزهای قابل تنظیم ارتوپدی

صنعت ورزشی	• استفاده از جسد شبیه‌سازی شده چاپ شده برای آموزش پزشکی در آناتومی • چاپ بافت‌های زنده زیست تخریب‌پذیر برای آزمایشات در طی مرحله توسعه محصول دارویی • تولید لوازم جانبی با شکل هندسی پیچیده • ایجاد تجهیزات محافظ تنظیم شده جهت کارکرد و استفاده بهتر • ایجاد نمونه‌های اولیه از چندین رنگ و ماده کامپوزیت برای آزمایش محصولات
صنعت ساخت‌وساز	• ساخت افزودنی بتن برای ساختمان‌های معمولی • طراحی جدید بتن‌های کاربردی مانند بتن تمیزکننده، بتن با کارایی بالا • ساخت‌وساز ساختمان با استفاده از مصالح موجود در مجاورت • ساختمان‌سازی بدون سیمان • ساختمان‌سازی کم هزینه، کم انرژی

در حال حاضر، AM برای محصولات کم حجم و ارزش بالا مناسب‌تر است زیرا توجهی به هزینه نیروی کار یک واحد کالا یا اقتصاد مقیاس سنتی نمی‌کند. این تکنولوژی، تولید انعطاف‌پذیر و سفارشی‌سازی انبوه را امکان‌پذیر می‌کند زیرا طرح‌ها می‌توانند به سرعت تغییر داده شوند. وجوه سرمایه‌گذاری شده در AM حتی برای ساخت یک شئ به اندازه یک قایق کوچک نیز نسبتا بالا است [77،78]. علاوه بر این، چندگانگی مهارت‌های لازم یک اپراتور برای کار با AM به نیروی کار با مهارت بالا در یک محل ساخت نیاز دارد. همچنین مدتی طول خواهد کشید تا اینکه تصمیم‌گیری بتواند با اتوماسیون کامل از طریق تصمیم‌گیری دیجیتال کاملا جایگزین شود. این باعث این انتظار واقع‌بینانه می‌شود که AM در صدد جایگزینی تولید انبوه معمول، که می‌تواند در صورت لزوم هزاران قطعه یکسان را با هزینه کم تولید کند نیست. این روش درصدد ساخت شکل‌ها و محصولاتی است که ساخت آنها از طریق ساخت معمولی یا امکان‌پذیر نمی‌باشد یا مقرون به صرفه نیست. اینجاست که AM انتظارات بزرگی را نشان می‌دهد و تو.سط برخی از بزرگترین تولیدکنندگان جهان همچون ایرباس، بوئینگ، GE، فورد و زیمنس [79] در تلاش برای جهش به سمت ساخت نسل 4.0 مشتاقانه مورد استقبال قرار گرفته است.

ساخت افزودنی اساس تحقق کارخانه نسل 4.0 یا ساخت نسل 4.0 است و رقابت‌پذیری ساخت و بهره‌وری بالاتر را در دستور کار ملی و فراملی در سراسر جهان قرار داده است. کشورهای صنعتی و تازه صنعتی هر دو در این پیگیری شرکت می‌کنند. برای مثال، ساخت در اتحادیه اروپا به ایجاد 30 میلیون شغل به طور مستقیم و بیش از دو برابر آن به طور غیرمستقیم کمک می‌کند [80]. این بخش در 80 درصد از کل صادرات و 80 درصد از هزینه‌های تحقیق‌وتوسعه خصوصی اتحادیه اروپا سهم دارد. تولید پیشرفته در حال حاضر به ایجاد 1.6 میلیون شغل و 11 درصد از کل تولید اتحادیه اروپا نقش دارد. تقریبا نیمی از شرکت‌های تولیدی در اروپا در گذشته از تکنولوژی‌های پیشرفته تولید استفاده نکرده و قصد استفاده از آنها در سال‌های آینده را ندارند. AM به عنوان کلیدی برای تامین پایه صنعتی قوی با ایجاد ارزش 1.6 میلیون شغل و مقدار 11 درصد از کل تولید اتحادیه اروپا در نظر گرفته می‌شود [80]. محرک قوی برای تغییر این وضع وجود دارد. در اروپا، "مراکز (هاب) نوآوری دیجیتال" در هر منطقه که بر اساس مرکز صلاحیت مهارت‌های تخصصی کلاس جهانی است، امکان دسترسی صنعت به دانش، راه‌های توسعه تکنولوژی و امکانات آزمایش را فراهم می‌سازد. این به سطح سرمایه‌گذاری 12 میلیارد یورد در 7 سال آینده خواهد رسید.

در آمریکا، جایی که در آن طرح مفهومی AM از حدود سه دهه قبل آغاز شد، اکنون AM در تقریباً همه بخش‌های ساخت توسط صنایع پیشرو از جمله بخش‌هایی همچون فضا، خودرو، نیمه هادی، هوافضا و زیست‌پزشکی (بیومدیکال) استفاده می‌شود. صنعت ساخت آمریکا مشابه با همتای اروپایی خود از نظر رقابت‌پذیری تحت فشار آسیا به ویژه چین قرار داشته است. AM فرصت قابل‌توجهی را برای تولید نوظهور در آمریکا و در عین حفظ و پیشرفت نوآوری آمریکا فراهم کرده است. اکنون آمریکا یکی از تولیدکنندگان اصلی سیستم‌های AM (به جداول 1 و 2 مراجعه کنید) و یکی از استفاده‌کنندگان اصلی تکنولوژی AM است

[81،82]. اما، در دنیای فزاینده رقابتی، ممکن است اثبات شود استفاده از فرصت‌هایی که AM ارائه می‌دهد دشوار است. برخی می‌ترسند که AM ممکن است آمریکا را به محل رقابتی‌تر برای تولید تبدیل کند که منجر به تولید کالاهای بیشتری در آنجا و در عین حال کاهش همزمان اشتغال تولید شود [83]. حتی اگر AM به افزایش قابل‌توجه بهره‌وری منتج شود که ممکن است مشاغل خارج از آن کشور را جذب کند و افزایش خالص اشتغال از طریق محصولات جدید را تسهیل کند، ممکن است به دلیل انتقال شغل به سایر بخش‌های اشتغال، افزایش خالص اشتغال تولیدی را با خود نیاورد [84].

در سطح جهان، مقدار برآورد شده 642.6 میلیون دلار درآمد برای کالاهای ساخت افزودنی ثبت شده و برای آمریکا این حدود 246.1 میلیون دلار یا 38.3 درصد از تولید جهانی در سال 2011 محاسبه شده است [75]. تقریبا 62.8 درصد از کل واحدهای تجاری/صنعتی فروخته شده در سال 2011 توسط سه شرکت تولیدکننده برتر سیستم‌های AM: Stratasys، Z Corporation و 3D Systems ساخته شده‌اند. تقریبا 64.4 درصد کل سیستم‌ها توسط شرکت‌های مستقر در آمریکا ساخته شده اند. بین سال‌های 2031 تا 2038، انتظار می‌رود AM به 50 درصد از قابلیت بازار خود دست پیدا کند، و در عین حال بین سال-های 2058 و 2065 به 100 درصد از قابلیت بازار خود برسد [85]. از نظر پولی، این برآورد نشان می‌دهد که این صنعت بین سال‌های 2029 تا 2031 به اندازه 50 میلیارد دلار و بین سال‌های 2031 تا 2044 به 100 میلیارد دلار خواهد رسید [78].

با 70 درصد سهم تولید تجارت جهانی و داشتن 5 تا از 10 تولیدکننده برتر جهانی، آسیا از اوایل 2018 بیشتر از طریق سرمایه‌گذاری تحقیقاتی [86–89] با امید به تبدیل به محصولات اصلی در حال آغاز کردن AM است [90]. دلایل اصلی برای افزایش اخیر منقضی شدن اختراعات ثبت شده تکنیک AM و همچنین توسعه روزافزون جهانی به ابزارهای AM توسط تولیدکنندگان فعلی آمریکا، اروپا و کانادا است. حمایت و سرمایه‌گذاری مداوم هر دو بخش خصوصی و دولتی نیز رشد را تسهیل کرده است. قابلیت چاپ سه‌بعدی برای کاهش وابستگی به فرآیندهای تولید سنتی با نیروی کار زیاد، به آن توانائی ایفای نقش قابل‌توجهی در اقتصاد این کشورها خواهد داد. بدون شک چین پیشگام در بکارگیری AM در آسیا است. در سال 2013 ارزش بازار چاپ سه‌بعدی چین 1.72 میلیارد یوان با سهم 9 درصدی از بازار جهانی برآورد شد. از بین 200000 چاپگر سه‌بعدی نصب شده در سال 2013 در سراسر جهان، چین تنها 10 درصد را در مقایسه با 40 درصد در آمریکا تشکیل می‌دهد. در حال حاضر وضعیت تکنولوژی چاپ سه‌بعدی با مورد اقتصادهای پیشرفته مانند آمریکا در یک تراز است ولی چین هنوز هم در توسعه مواد و نرم‌افزار عقب است [91]. اما، این سناریو، با توجه به سابقه چین در پیشی گرفتن از آمریکا در سال 2012 برای تبدیل شدن به تولیدکننده پیشروی جهان، به زودی تغییر خواهد کرد [92]. اگر این اتفاق بیفتد، استفاده‌کنندگان از تکنولوژی، مواد و نرم‌افزار ساخت افزودنی مجبورند این تکنولوژی را از آسیا خریداری کنند و تامین‌کنندگان آنها با بازیگران باتجربه آسیایی رقابت کنند.

AM یک اختلال‌کننده بازار در نظر گرفته شده است. AM به جای تقویت زنجیره‌های فعلی عرضه و ارزش ممکن است بالقوه جایگزین آنها شود. با در نظر گرفتن شبکه و زنجیره تأمین گسترده جهانی موجود فعلی که در آن مواد اولیه در یک کشور یا مکان استخراج شده، تا سطح انبار یا قطعه در یک مکان یا کارخانه دیگری فرآوری شده و به ردیفی از محصولات مختلف مونتاژ می‌شوند که چندین سایت را شامل می‌گردند، امکان شناخت مانع بزرگ ورود AM برای جایگزینی این زنجیره ارزش در کوتاه مدت وجود دارد. تولیدکنندگان محصول نهایی با استفاده از AM باید کل زنجیره ارزش را در نظر بگیرند. این به معنای فشرده-سازی زنجیره ارزش است که به تخصص داخلی در زمینه مواد، روش سنجش، اتصال، مونتاژ، روباتیک، اتوماسیون و طراحی با کمک کامپیوتر نیاز دارد. بنابراین احتمال دارد که بازار AM به توسعه در تولید کم تعداد محصولات با ارزش افزوده بالا ادامه دهد. در طی زمان، بازیگران خاص همراه زنجیره ارزش ممکن است شروع به گنجاندن تکنیک‌های منفرد ساخت افزودنی بر اساس صرفه اقتصادی در زنجیره کنند. این بدان معنی است که بهبودها و نوآوری‌های مداوم در عملکرد و سازگاری دسته‌های مجزای

ساخت افزودنی با سیستم‌های مواد خاص از اهمیت زیادی برای اوجگیری آینده AM برخوردار خواهد بود. سایر محرک‌هائی که بالقوه به عنوان تکنولوژی‌های نوین تولید و پیشرفت نوآوری در بازار اهمیت دارند، شامل شرایط نظارتی و موازین در بازار می‌باشند.

چالش‌های اجرای مقیاس صنعتی و مسیرهای آینده

اکنون AM در صنعت در یک نقطه عطف قرار دارد، زیرا واحدهای صنعتی بیشتر و بیشتری استفاده از آن را هم برای نمونه‌سازی سریع و هم تولید محصول شروع کرده‌اند. امروزه استفاده از چاپگر سه‌بعدی، استانداردسازی و چاپ ابزار و اشیاء کوچک را پشت سر گذاشته است. حدود 11 درصد از 100 شرکت تولیدکننده مشارکت‌کننده در یک نظرسنجی PwC اعلام کردند که از قبل برای تولید انبوه قطعات منفرد یا محصولات یکپارچه شده به چاپ سه‌بعدی منتقل شده‌اند در حالی که حدود 42 درصد از شرکت‌های بزرگ آمریکای شمالی اظهار داشتند که مایلند تا سال 2020 از چاپگرهای سه‌بعدی SLS برای بخش بزرگی از فعالیت‌های خود استفاده کنند [93]. می‌توان انتظار داشت که شرکت‌های بیشتری با گسترش دامنه مواد برای AM، آنرا دنبال خواهند کرد. موفقیت در AM پلیمرهای ترموپلاستیک همانند پلی لاکتیک اسید (PLA) یا آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)، رزینهای حساس به نور، سرامیک‌ها، سیمان، شیشه می‌تواند به بسیاری فلزات دیگر، سرامیک‌ها و کامپوزیت‌های ترموپلاستیک تقویت شده با نانولوله-های کربنی و الیاف بیولوژیکی، غذایی، دارویی و غیره گسترش یابد. بهینه‌سازی فرآیند و انتخاب پارامترهای فرآیند، تعیین‌کننده اصلی موفقیت هستند (**شکل 5**).

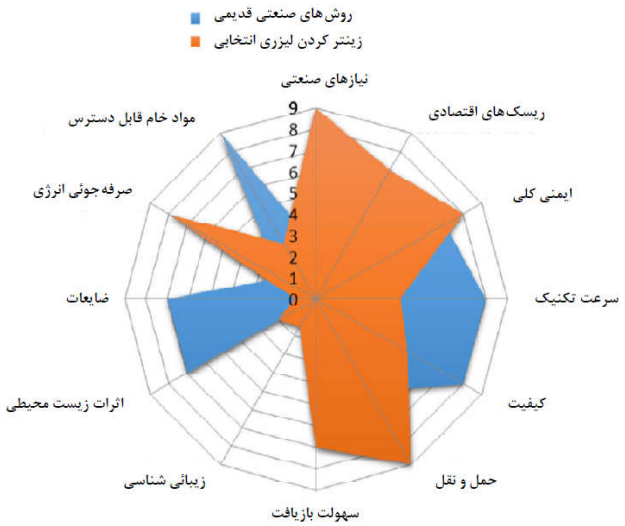
AM می‌تواند جایگزینی قابل اجرا برای ساخت بر پایه پیش–برنامه‌ریزی با استفاده از ساخت طبق تقاضا ارائه دهد. این ساخت طبق تقاضا را شبیه به استراتژی چاپ طبق تقاضا می‌سازد که به طور گسترده‌ای در صنعت چاپ اتخاذ می‌شود که در آن یک کتاب از پیش تهیه شده نهائی از مدرک دیجیتالی آن در هنگام سفارش چاپ توسط مشتری، چاپ می‌شود. این بدان معنی است که انبارش قطعه تولید شده ممکن است لازم یا طولانی نباشد. فقط نسخه دیجیتالی طراحی قطعه ذخیره می‌شود. قطعات از این طرح به صورت افزایشی طبق تقاضا با حمل فوری قطعات نهائی ساخته می‌شوند. به طور مشابه، بسیاری از قطعات فقط زمانی ساخته می‌شوند که مشتری سفارشگذاری در زمان واقعی را انجام دهد.

با وجود این واقعیت که هزینه‌های مستقیم تولید محصولات با روش‌های جدید و مواد فوق معمولاً بیشتر است، انعطاف‌پذیری ارائه شده توسط AM بدان معنی است که ممکن است هزینه کل به طور قابل‌ملاحظه ای پایین باشد. ملاحظات هزینه می‌تواند عامل بزرگی در اجرای صنعتی AM باشد. **شکل 6** یک نمودار راداری را نشان می‌دهد که تأثیرات اقتصادی و غیراقتصادی زینتر کردن لیزری انتخابی (SLS) را با ساخت معمولی (روش صنعتی قدیمی) مقایسه می‌کند. ما SLS را به دلیل آشنایی خود با این عوامل در رابطه با اجرای SLS انتخاب کرده‌ایم، که به اندازه کافی بالغ شده است تا چنین مقایسه‌ای را امکان‌پذیر کند.

ده مزیت بالقوه ساخت افزودنی که در این مقدمه مورد بحث قرار گرفته است، نیازمند غلبه بر برخی از مشکلات فعلی است که باید سریعاً حل شوند. زمان ساخت، هزینه بالای تولید اولیه، فرآیند تولید غیرمتوالی، مواد و خواص مکانیکی و مشخصات استاندارد برخی از مثال‌ها هستند. ساخت یک شئ در ساخت افزودنی نیازمند این است که یک "طرح" دیجیتال به چاپگر ارسال

شکل 5– نمونه‌ای از پروتکل انتخاب مواد و فرآیندهای ساخت افزودنی که برای ساخت رشته‌های پلیمری ذوب شده (FFF) تهیه شده است. ماده رشته، پلی لاکتیک اسید (PLA) است که با لیگنین، برای ایجاد فیبر کربن کم هزینه برای ماده جسم جدید با هم مخلوط شده‌اند [94].

شود. این امر نه تنها درها را برای بازنگری‌ها، تنظیمات مجدد و بهبود نامحدود محصول، بلکه همچنین برای یک استراتژی طراحی و اجرای بسیار پیچیده‌تر محصول نیز می‌گشاید. برای مثال، مسئله بهینه‌سازی و ادغام رویه‌های قدیمی و جدید هنگامی که طرح بهبود یافت، نیاز به رسیدگی به مقرون به صرفه‌ترین روش دارد. ممکن است سرمایه‌گذاری در چاپگر سه‌بعدی جدید در هر بار که طراحی دیجیتال برای بهبود تغییر می‌کند و چاپگر سه‌بعدی سابق برای برآوردن تقاضای طراحی فرآیند جدید مازاد می‌شود خردمندانه نباشد.



شکل 6- نمودار راداری ساخت افزودنی قدیمی در مقابل زینتر کردن لیزری انتخابی (مقیاس 9-0، که 9 مهمترین عامل است).

لازم است ظرفیت بار تغذیه فله، سازگاری اندازه و شکل بار تغذیه فله و انتخاب اهداف متقابل متضاد برای دستیابی به وضوح و سرعت بالاتر در نظر گرفته شوند. مزیت هزینه استفاده از چاپ سه‌بعدی بویژه با توجه به هزینه جایگزینی تکنولوژی معمولی رقیب در ساخت محصول، باید با دقت در نظر گرفته شود. نیاز به متناسب‌سازی مواد برای تطبیق دادن با فرآیند و محصول ویژه ساخت افزودنی ممکن است نیاز به رشد تولیدکننده مواد خام ثانویه همچون ارائه‌دهندگان خدمات فرآیند پودر یا یک واحد فرآوری یکپارچه پودر در کنار تأسیسات ساخت افزودنی داشته باشد. این تلاش‌ها به میزان قابل‌توجهی هزینه‌های بار تغذیه و وجوه سرمایه‌گذاری شده در ساخت افزودنی را بالا می‌برند. تولید صنعتی نیاز به تجهیزات گران قیمت برای جایگزینی خطوط تولید سنتی دارد و مصرف انرژی در مورد اجزای بزرگ فلزی و سرامیک (برای مثال به دلیل استفاده از لیزر) باید با چشم‌انداز صرفه‌جویی مواد و انرژی از طریق ضایعات صفر و تولید خروجی زیاد موازنه شود.

اوجگیری صنعت AM نیاز به تلاش در سه زمینه اصلی دارد: هزینه‌ها، مزایای مقایسه‌ای AM نسبت به ساخت معمولی همان قطعه، و نرخی که در آن چنین مزایایی رخ می‌دهد. هزینه ها به عنوان یکی از مهمترین عوامل گرانی شناخته شده‌اند. دامنه تغییرات هزینه ماشین‌آلات AM بین 50 تا 75 درصد از کل هزینه تولید است در حالی که دامنه تغییرات هزینه مواد بین 20 تا 40 درصد و در مورد نیروی کار بین 5 تا 30 درصد است [95]. کاهش این هزینه‌ها ممکن است تاثیر قابل‌توجهی بر پذیرش تکنولوژی‌های AM از نظر کیفیت، اعتبارسنجی عملکرد و قابلیت‌های گسترش اندازه داشته باشد [96]. انتظار اینکه اشیاء بتوانند در هر کجا و از طریق شخصی‌سازی انبوه مصرف‌کننده-محور در طراحی محصول ساخته شوند، می‌تواند به دلیل محدودیت، اعتبارسنجی و صدور مجوز مواد محدود شوند. این ملاحظات اهمیت عظیمی برای بخش‌های رشد AM نظیر هوافضا، خودرو و صنعت زیست‌پزشکی (بیومدیکال) دارند [98-98]. از آنجا که داده های طراحی از مرزها و مناطق عبور می‌کنند مسئله در مورد مالیات، عوارض بین مرزی و حفاظت از داده‌ها، مالکیت، استفاده و سرنوشت پس از تولید به وجود می‌آید.

رشد انفجاری در زمینه AM فرصت‌های جدید بسیاری را در تولید در طی دو دهه گذشته ایجاد کرده است. اکثر سازمان‌ها در حال در نظر گرفتن رویکردهای بر پایه AM برای قطعات کم حجم و مدل‌های مفهومی هستند. مربیان کالج‌ها و مدارس مختلف از AM استفاده می‌کنند تا ایده‌های خلاقانه مختلف را به مدل‌های فیزیکی تبدیل نمایند تا قابل لمس و محسوس باشند. اما، سطح نهائی و تلرانس ابعادی هنوز مسائل مهمی هستند که نیاز به نوآوری بیشتر در ماشین‌های AM دارند. یک روند اخیر اضافه کردن یک سیستم کاهنده در ترکیب با AM است. هدف از ابزار کاهنده ارتقای سطح نهائی، و به حداقل رساندن نواقص بین لایه‌ها

است. چنین رویکردی می‌تواند قابلیت استفاده قطعات فرآوری شده با AM را به همان صورت فرآوری شده افزایش دهد. مسئله دیگر با AM تکثیرپذیری است. از آنجا که هر قطعه به صورت لایه به لایه ساخته می‌شود، کیفیت قطعه بین دستگاه‌ها یا همان دستگاه در زمان‌های مختلف باید یکسان باشد. در غیر این صورت، قطعات برای کاربردهای مهم ممکن است از طریق AM تولید نشوند. این مشکل با توجه به رویکردهای AM ذاتاً پیچیده است. بیشتر فرآیندهای AM با فلزات پودر شروع می‌شوند، جایی که اندازه و شکل ذرات از دسته‌ای به دسته دیگر متفاوت است. منبع گرما به طور معمول لیزر یا پرتو الکترونی است. شدت و قطر پرتو هر دو می‌توانند با استفاده از دستگاه تغییر کنند. همه این پارامترها باید برای مواد مختلف جهت اطمینان از تکثیرپذیری کیفیت قطعات، که مهم است بهینه شوند. همچنین، AM چند ماده‌ای به آرامی محبوبیت کسب می‌کند. در دنیای AM چند ماده‌ای، شناخت تعامل مواد با مواد و قابلیت فرآوری آنها نیز از مسائل اصلی ساخت موفق قطعات است. از آنجا که AM در حال انجام تغییر انقلابی در جهان ساخت است، ابزاری است که قابلیت ایجاد مراکز (هاب های) ساخت حتی در گوشه‌های دورافتاده جهان، و کمک به تحول سریعتر به سمت "دنیای مسطح" را نیز دارد. این امر می‌تواند با مراقبت از هماهنگی بین 4M مربوط به AM، به صورتی که در **جدول5** خلاصه شده، حاصل شود.

جدول 5- خلاصه‌ای از مسائل مربوط به 4M ساخت افزودنی.

	مسائل کلیدی
ساخت	– تکامل تکنولوژی ساخت لایه به لایه با تطبیق‌پذیری، انعطاف‌پذیری و سفارشی‌سازی – طیف گسترده‌ای از مواد از جمله فلز، سرامیک، پلیمرها و ترکیب آنها به شکل کامپوزیت، هیبریدی یا مواد درجه‌بندی شده کارکردی (FGM) – توسعه سیستم خودگردان، محکم، کاربرپسند، ایمن، یکپارچه که قدرت، حرکت و سرعت اسکن، و وضوح تصویر بالای مورد نیاز را با انرژی همراه برای ساخت قطعات و کنترل ابعادی فراهم می‌آورد.
مواد	– تکنیک‌های ساخت، ارتباطات داده‌ها و تغییرات سیستم در صنعت 4.0 یا ساخت 4.0 – پیش‌نیاز همگن بودن – خواص اصلی سطح – میزان تکمیل‌کاری مورد نیاز – اندازه مواد بار تغذیه از نانومتر تا میکرومتر
سنجش	– نیاز به تضمین کیفیت زمان واقعی در خط (اینلاین) – نظارت و کنترل به سمت بهینه‌سازی – سطح بالایی از سفارشی‌سازی تکنیک‌های سنجش درجا – الزام دقت و سرعت اندازه‌گیری بالا
بازار	– کارخانه 4.0 یا ساخت 4.0 از مراکز نوآوری دیجیتال بهره‌مند می‌شود – صنایع AM از فضایی تا اسباب‌بازی و مواد غذایی را در بر گرفته و صنعتی چند میلیارد دلاری است – ماشین‌های ارزان‌تر AM را در دسترس‌تر می‌کنند

خلاصه

ساخت افزودنی (AM) یک بازار متمایز با قابلیت رشد عظیم دارد اگر بتوان موانع اصلی اوجگیری را برطرف کرد. واضح و اطمینان بخش است که پیشرفت در تکنولوژی مرتبط با "ساخت" در حال تولید سریعتر اشیاء هستند، و قادر به چاپ این اشیاء با پیچیدگی‌های بسیار بیشتر با ترکیب‌های مختلف از مواد، رنگ‌ها و سطح نهائی می‌باشند. اما، یک چالش باقی مانده است، انتقال این "ساخت" به اشیاء قابل حصولی که کاربردی باشند. برای دستیابی به این کارکرد به طریقی پیش-بینی‌شونده و تکثیرپذیر، کار زیادی برای پرداختن چالش‌های مربوط به دو تکنولوژی توانمندساز اصلی یعنی "مواد" و "سنجش" لازم است. خبر خوب این است که علاقه زیادی در صنعت برای جذب AM به عنوان یکی از مسیرهای اصلی مهندسی تولید برای نسل بعدی وجود دارد. این قدرت "همترازتر" کردن دنیای تولید را دارد. به نظر ما، ساخت افزودنی یقینا در تقاطعی قرار دارد که از آنجا باید این فرآیند تولید جدید و بسیار فعال اما تا حدودی تثبیت نشده به سمت تکنولوژی‌ای حرکت کند که توانایی تولید محصولات واقعی، نوآورانه، پیچیده و قوی را نشان دهد.

مراجع:

[1] A. Bandyopadhyay, S. Bose, Additive Manufacturing, CRC Press, Florida, 2015.
[2] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, Berlin, 2009.
[3] J. Darsell et al., J. Am. Ceram. Soc. 86 (2003) 1076–1080.
[4] Z. Quan et al., Mater. Today Addit. Manuf. Mech. Eng. Annu. Rep. 18 (2016) 503–512.
[5] Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda, http://www.rmplatform. com/linkdoc/AM%20SRA%20-%20February%202014.pdf.
[6] Additive Manufacturing Tackling Standards & Certification, http://knowledge. ulprospector.com/3740/pe-additive-manufacturing-tackling-standardscertification/.
[7] C.K. Chua, K.F. Leong, 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications, World Scientific Publishing Company, Singapore, 2017.
[8] J.-Y. Lee et al., J. Membr. Sci. (2016) 480–490.
[9] W.J. Sames et al., Int. Mater. Rev. 61 (2016) 315–360.
[10] V. Francis, P.K. Jain, Virtual Phys. Prototyp. (2016) 109–121.
[11] A.C. de Leon et al., React. Funct. Polym. 103 (2016) 141–155.
[12] B.N. Turner, R. Strong, S.A. Gold, Rapid Prototyp. J. 20 (3) (2014) 192–204.
[13] B.N. Turner, S.A. Gold, Rapid Prototyp. J. 21 (3) (2015) 250–261.
[14] B. Wendel et al., Macromol. Mater. Eng. 293 (2008) 799–809.
[15] Metal Additive Manufacturing/3D Printing: An Introduction, http://www.metalam. com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/.
[16] D.D. Gu et al., Int. Mater. Rev. 57 (2012) 133.
[17] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve, Mech. Ind. 132 (2012) 89–96.
[18] W.E. King et al., Appl. Phys. Rev. 2 (2015) 041304.
[19] A. Zocca et al., J. Am. Ceram. Soc. 98 (2015) 1983–2001.
[20] N. Travitzky et al., Adv. Eng. Mater. 16 (2014) 729.
[21] T. Muhler et al., Int. J. Appl. Ceram. Technol. 12 (2015) 18–25.
[22] F. Doreau, C. Chaput, T. Chartier, Adv. Eng. Mater. 2 (2000) 493.
[23] O. Ivanova, C. Williams, T. Campbell, Rap. Prototyp. J. 19 (2013) 353–364.
[24] S.C. Cox et al., Mater. Sci. Eng. 64 (2016) 407–415.
[25] V.K. Balla, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J. Appl. Ceram. Technol. 5 (3) (2008) 234–242.
[26] M.W. Khainga, J.Y.H. Fuhb, L. Lub, J. Mater. Process Technol. 113 (1–3) (2001) 269–272.
[27] L.S. Bertol et al., Mater. Des. 31 (8) (2010) 3982–3988.
[28] A.J. Pinkerton, Opt. Laser Technol. 78 (2016) 25–32.
[29] M.K. Agarwala et al., Ceram. Bull. 11 (1996) 60–65.
[30] J.Y. Lee, J. An, C.K. Chua, Appl. Mater. Today 7 (2017) 120–133.
[31] Overview over 3D Printing Technologies, https://www.additively.com/en/learnabout/ 3d-printing-technologies.
[32] Additive Manufacturing Research Group, http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/.
[33] Y. Meir, E. Jerby, The Localized Microwave-Heating (LMH) Paradigm – Theory, Experiments, and Applications, 2012, pp. 131–145.
[34] A. Tselev et al., ACS Nano 10 (2016) 3562–3570.
[35] O. Korostynska et al., Key Eng. Mater. (2013) 26–29.
[36] J.P. Bourell et al., CIRP Ann. Manuf. Technol. (2017).
[37] Editorial, Nat. Nanotechnol. 11 (2016) 733.
[38] W.E. Frazier, Mater. Eng. Perform. 23 (2014) 1917–1928.
[39] M.H. Farshidianfar, A. Khajepour, A.P. Gerlich, J. Mater. Process Technol. 231 (2016) 468–478.
[40] J. Deckers, J. Vleugels, J.-P. Kruth, J. Ceram. Sci. Technol. 5 (2014) 245–260.
[41] H.H. Tang, H.C. Yen, Eur. Ceram. Soc. 35 (3) (2015) 981–987.
[42] S.M. Gaytan et al., Ceram. Int. 41 (5) (2015) 6610–6619.
[43] Y. Hagedorn, Laser Additive Manufacturing, Elsevier, Amsterdam, 2017.
[44] D. Puppi et al., Biomed. Microdevices 14 (6) (2012) 1115–1127.
[45] Z. Quan et al., Mater. Today 18 (2015) 503–512.
[46] D. Ning et al., Compos Part B Eng. 80 (2015) 369–378.
[47] R.C.A.G. Mota et al., Mater. Sci. Appl. 7 (2016) 430–452.
[48] M. Schmid, K. Wegener, Procedia Eng. 149 (2016) 457–464.
[49] PwC, 3D Printing and the New Shape of Industrial Manufacturing, Price Waterhouse Coopers LLP, Delaware, 2014.
[50] M. Mullins et al., Nat. Nanotechnol. 8 (2013) 222–224.

[51] E.M. McAlea et al., J. Risk Res. 19 (2016) 444–460.
[52] G. Tapia, A. Elwany, J. Manuf. Sci. Eng. 136 (2014) 60801–60811.
[53] L. Koester et al., AIP Conf. Proc. 1706 (2016) 130001.
[54] J.A. Slotwinski, S. Moylan, in: NISTIR 8005, 2014.
[55] S. Moylan, J.A. Slotwinski, in: Proceedings of the 2014 ASPE Spring Topical Meeting—Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing (American Society for Precision Engineering, Raleigh, NC), vol. 57, 2014, pp. 82–85.
[56] J.A. Slotwinski, S. Moylan, in: Proceedings of the 2014 ASPE Spring Topical Meeting-Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing, (American Society for Precision Engineering, Raleigh, NC), vol. 57, 2014, pp. 11–12.
[57] S. Guessasma, S. Belhabib, H. Nouri, Polymer 81 (2015) 29–36.
[58] B.N. Turner, S.A. Gold, Rapid Prototyp. 21 (3) (2015) 250–261.
[59] P.H. Lee et al., in: Proceedings of the ASME 9th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Detroit, MI, USA, vol. 1, 2014.
[60] J.M. Pinto et al., Med. Eng. Phys. 37 (3) (2015) 328–334.
[61] B. Rosa, P. Mognol, J.Y. Hascoet, J. Laser Appl. 27 (2015). S29102-1–S29102-7.
[62] S. Nelaturi, W. Kim, T. Kurtoglu, Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME 137 (2) (2015). 021015-1–021015-9.
[63] S. Guessasma et al., Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim. 6 (2015) A9.
[64] G. Zenzinger et al., Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 34 (1650) (2015) 164– 170.
[65] V. Carl, Annu. Rev. Prog. Quant. Non-Destruct. Eval. 34 (1650) (2015) 171–176.
[66] H. Krauss, T. Zeugner, M.F. Zaeh, Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 1650 (2015) 177–183.
[67] H. Rieder et al., Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 34 (2015) 184–191.
[68] S. Everton et al., Proc. SPIE 9353 (2015). 935316-1–935316-8.
[69] K. Raguvarun et al., Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 34 (2015) 146–155.
[70] A. Heinrich et al., Proc. SPIE 9525 (2015).
[71] S.M. Daly et al., in: S.A.M. Tofail, J. Bauer (Eds.), Electrically Active Materials for Medical Devices, 2016.
[72] S.K. Everton et al., Mater. Des. 95 (2016) 431–445.
[73] J.M. Waller et al., Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. 1650 (2015) 51–62.
[74] A. Townsend et al., Precis. Eng. 46 (2016) 34–47.
[75] M.D. Monzon et al., Int. J. Adv. Manuf. Technol. 76 (5–8) (2015) 1111–1121.
[76] C.W. Hull, Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography, United States Patent, US 4575330, 1986.
[77] M. Gebler, A.J.M. Schoot Uiterkamp, C. Visse, Energy Policy 74 (2014) 158–167.
[78] 3D printing: A third-world dimension at The Economist, The Economist Newspaper Limited, http://www.economist.com/news/science-and-technology/ 21565577-new-manufacturing-technique-could-help-poor-countries-well-richones.
[79] 3D printing scales up at The Economist, The Economist Newspaper Limited, http://www.economist.com/news/technology-quarterly/21584447-digitalmanufacturing- there-lot-hype-around-3d-printing-it-fast.
[80] KIC Added-value Manufacturing: Exploiting Synergies and Complementarities with EU Policies and Programmes, Heidi Moens, DG GROW, Neophytos Neophytou, DG RTD, Francesca Flamigni, DG CNECT, EIT Infoday Brussels, 2016.
[81] McKinsey&Company, Manufacturing the Future: The Next Era of Global Growth and Innovation, November, http://www.mckinsey.com/insights/ mgi/research/productivity_competitiveness_and_growth/the_future_of_ manufacturing.
[82] D.S. Thomas, Economics of the U.S. AM Industry, Special Publication (NIST SP) – 1163, 2013.
[83] D.S. Thomas, A.M. Kandaswamy, Tracking Industry Operations Activity: A Case Study of US Automotive Manufacturing, Special Publication (NIST SP) – 1601, 2015.
[84] US manufacturing jobs have declined. This is where they've really gone, https://www.weforum.org/agenda/2017/05/us-manufacturing-jobs-have-declined-thisis- where-theyve-really-gone.
[85] D. Thomas, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 85 (2016) 1857–1876.
[86] http://www.3ders.org/articles/20160815-south-korea-easing-regulations-andtaxes- to-encourage-domestic-additive-manufacturing-growth.html.
[87] Singapore Firms Tapping 3D Printing Tech for New Growth Opportunities, http://www.channelnewsasia.com/news/singapore/singapore-firms-tapping- 3d-printing-tech-for-new-growth-opportun-7576708.
[88] 3D Printing Industry in India: The Current Scenario, https:// 3dprintingindustry.com/news/3d-printing-industry-in-india-the-currentscenario- 79537/.
[89] A Look Inside the Japanese 3D Printing Industry, https://3dprint.com/ 155980/japanese-3d-printing-industry/.
[90] 3D Printer and 3D Printing News. http://www.3ders.org/articles/20170215-3dprinting- to-go-mainstream-in-the-asia-pacific-market-by-2018.html.
[91] E. Anderson, Additive Manufacturing in China: Threats, Opportunities and Developments (Part 1), Institute on Global Conflict and Cooperation, University of California, 2013. escholarship.org/uc/item/9x38n9b3.pdf.

[92] China's Manufacturing Successes and Pitfalls, http://www3.weforum.org/docs/
Manufacturing_Our_Future_2016/Case_Study_4.pdf.
[93] The 3-D Printing Revolution, https://hbr.org/2015/05/the-3-d-printingrevolution.
[94] E. Gkartzou, E.P. Koumoulos, C.A. Charitidis, Manufacturing Rev., 4 (2017) 1,
https://doi.org/10.1051/mfreview/2016020.
[95] N. Hopkinson, in: N. Hopkinson, R. Hague, P. Dickens (Eds.), Rapid Manufacturing, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
[96] S. Ford, J. Int. Commerce Econ. (2014). http://www.usitc.gov/journals.
[97] D. Brasinika, E. Gkartzou, E. Koumoulos, C.A. Charitidis, Pressure-assisted Direct Ink Writing: A promising approach for the fabrication of Personalised Biofunctional Scaffolds, Int J Nanomed Nanosurg 3 (1) (2017).
[98] M. Kalogerini, I.A. Kartsonakis, D. Brasinika, E.P. Koumoulos, C.A. Charitidis, Poly (lactic acid) Microparticles for Drug Carriers in Enhancement of Controlled Release Systems towards 3D Printing, Int J Nanomed Nanosurg 3 (2) (2017).