فصلنامه علمی - ترویجی
سال چهارم، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۳، بهار ۱۳۹۸
Vol. 4, No. 1, Issue No. 13
Spring 2019, Quarterly
صفحه ۳۳ - ۲۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

چاپگرهای سه بعدی با فناوری ساخت رشته‌های مذاب

امیر شمس[1*]، حامد قمی[2]

۱ نجف آباد، دانشگاه آزاداسلامی، دانشکده مهندسی مواد، مرکزتحقیقات مواد پیشرفته، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی پزشکی

۲ نجف آباد، دانشگاه آزاداسلامی، دانشکده مهندسی مواد، استادیار مرکز تحقیقات مواد پیشرفته

چکیده ...

امروزه مدل‌سازی سه‌بعدی در رشته‌های گوناگونی همچون قطعه‌سازی، معماری، طراحی صنعتی، روباتیک، صنایع هوافضا و پزشکی رایج است. چاپ سه‌بعدی یا تولید افزاینده جسم سه‌بعدی قابل لمس از فایلی دیجیتالی گفته می‌شود. به این ترتیب که جسم از پایین شروع به شکل گرفتن می‌کند و هرچه پیش می‌رود، لایه‌های بیشتری بر روی لایه‌های زیرین قرار می‌گیرد تا در نهایت، جسم چاپ‌شده کامل شود. جنس این لایه‌ها از مواد مختلفی از جمله پلیمر و فلزات است. امروزه چاپگرهای سه‌بعدی توانایی تولید هر نوع قطعه‌ای با هر شکل و هر زاویه‌ای را دارند. انواع مختلفی از چاپ سه‌بعدی تاکنون ساخته شده است که انقلابی در صنعت، پزشکی، آموزشی، خودروسازی و نظامی ایجاد کرده است. دقت و سرعت فوق‌العاده چاپگرهای سه‌بعدی، آن‌ها را به محبوب‌ترین روش تولید، مبدل کرده است. در این مطالعه، چاپگر سه‌بعدی با فناوری FFF مورد بررسی قرار گرفته و اصول کلی کارکرد آن‌ها به‌طور کامل شرح داده می‌شود. محدویت‌ها و مزایای فناوری FFF نیز بررسی شده و روش‌هایی برای چاپ بهینه نمونه‌های سه‌بعدی با این روش ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

چاپگرهای سه‌بعدی
مدل‌سازی سه‌بعدی
مدل‌سازی رایانه‌ای سه‌بعدی
ساخت رشته‌های مذاب
مدل‌سازی رسوب مذاب

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
amirshams.ir@gmail.com

۱ مقدمه

چاپگرهای سه‌بعدی دارای فناوری‌های متعددی هستند. این فناوری‌ها، عمدتاً از لحاظ شیوه ساخت لایه‌ها به‌منظور ساخت قطعه نهایی باهم تفاوت دارند. بعضی از روش‌ها از مواد مذاب یا نرم‌شده برای تولید لایه‌ها استفاده می‌کنند. در برخی از روش‌ها از لیزر برای ساخت لایه‌ها استفاده می‌شود. پخت لیزری انتخابی (Selective Laser Sintering)SLS جزءاین دسته است. یکی دیگر از روش‌های چاپ، قرار دادن مواد مایعی است که با فناوری‌های مختلف، فراوری شده‌اند. معمول‌ترین فناوری با استفاده از این روش، استریولیتوگرافی (Stereo Lithography Apparatus) SLA نامیده می‌شود. مدل‌سازی رسوب مذاب FDM(Fused Deposition Modeling)معمول‌ترین فناوری چاپ سه‌بعدی است که در آن از شیوه حرارتی و لایه‌گذاری مواد مذاب استفاده می‌شود [۱].

فناوری مدل‌سازی رسوب ذوب شده FDM با استفاده از رشته پلیمری یا فلزی کار می‌کند. در این فناوری ماده اولیه به‌صورت رشته است و با اعمال حرارت به ماده مذاب تبدیل می‌شود؛ سپس ماده مذاب به صورت لایه‌به‌لایه روی هم قرار می‌گیرد و سرد می‌شود تا مدل نهایی شکل گیرد. FDM توسط اسکات کرامپ (Scott Crump) در اواخر دهه ۸۰ اختراع شد. بعد از اخذ مجوز برای این فناوری، او شرکت Stratasys را در سال ۱۹۸۸ تأسیس کرد. شرکت Stratasys اصطلاح مدل‌سازی رسوب ذوب شده یا FDM را به‌عنوان علامت تجاری اختصاصی خود به ثبت رساند. واژه معادل آن، ساخت با رشته ذوب شده (FFF) توسط اعضای پروژه RepRap برای رفع مشکل قانونی علامت اختصاصی، مطرح شد که از لحاظ حقوقی و قانونی کاربرد نامحدودی دارد و از قانون علائم تجاری پیروی نمی‌کند. این امر باعث شد تا محققان و مولفان در متون علمی خود از عبارت FFF به جای FDM استفاده کنند [۱و۲].

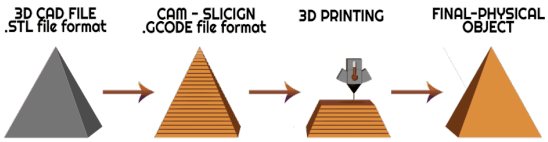
تولید افزودنی یا چاپ سه‌بعدی، برای ایجاد نمونه‌های اولیه از سال ۱۹۸۰ برای تولید اولیه محصول، معرفی شد و خیلی زود به سریع‌ترین و ارزان‌ترین روش برای تولید اولیه محصولات صنعتی و دیگر صنایع تبدیل شد. FDM محبوب‌ترین روش چاپ سه‌بعدی است که در سال ۱۹۹۲ توسط اسکات کرامپ اختراع شد واز آن زمان تاکنون برای تولید نمونه‌های اولیه با استفاده از چاپ سه‌بعدی استفاده می‌شود. سیر و تحول این روش به‌گونه‌ای بود که به‌سرعت به ارزان‌ترین و سریع‌ترین روش برای تولید کالاهای سفارشی تبدیل شد. چاپگرهایی که با این فرایند کار می‌کنند از رشته گرمانرم، مانند ABS (AcrylonitrileButadiene Styrene) و PLA (Poly-Lactic Acid) تغذیه می‌کنند که با ذوب کردن این رشته و سپس روزن‌رانی آن، جسم سه‌بعدی به صورت لایه‌به‌لایه تشکیل می‌شود [۳].

۲ فرایندچاپ سه‌بعدی

ابتدا فایل سه‌بعدی جسم مورد نظر از طریق رایانه و نرم‌افزارهای سه‌بعدی طراحی می‌شود و با فرمت قابل شناسایی برای چاپگرهای سه‌بعدی ذخیره می‌شود. در حال حاضر مناسب‌ترین فرمت، STL است. نرم‌افزارهای مخصوصی فایل را به زبان برنامه‌نویسی به نام جی‌کُد تبدیل کرده، کدهای هر لایه را به دستگاه چاپگر سه‌بعدی ارسال می‌کند. مرکز فرمان دستگاه، جی‌کدها را پردازش کرده، فرمان‌های لازم را برایچاپ به اجزای مختلف دستگاه، ارسال می‌کند. در ابتدا رشته پلیمری در داخل چاپگر قرار داده می‌شود. هنگامی که افشانه به دمای مطلوب رسید، یعنی رشته به حالت مذاب درآمد. مواد ذوب شده از سر افشانه بیرون آمده، به‌صورت لایه‌به‌لایه در مکان‌های از پیش تعیین شده ریخته شده خنک می‌شوند. گاهی عمل خنک کردن مواد از طریق به کار بردن پنکه متصل به سر دستگاه انجام می‌گیرد. هنگامی که یک لایه به پایان رسید، سطح ساخته‌شده به پایین حرکت خواهد کرد (یا در بعضی از ماشین‌ها با تنظیمات متفاوت، سر اکسترودر به سمت بالا حرکت می‌کند) و لایه جدید ریخته می‌شود و این روند تا زمانی که شکل جسم کامل شود، تکرار می‌شود (شکل ۱) [٤].

۳ نحوه کاردستگاه‌های FFF

برای ساخت لایه‌ها، رشته‌های پلیمری از طریق استپر موتور به افشانه هدایت شده، افشانه با ذوب کردن مواد اولیه، آن‌ها را بر روی صفحه ساخت دستگاه قرار می‌دهد. سه استپر موتور دیگر برای محورهای مختصات x,y,z وجود دارد که موقعیت صفحه و افشانه را هماهنگ می‌کنند. در این روش، افشانه در محورهای مختصات x,y حرکتی افقی و عمودی را برای ساخت



شکل ۱فرایندچاپ سه‌بعدی

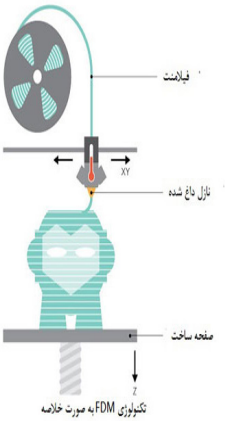
یک لایه از نمونه مورد نظر بر روی صفحه ساخت طی می‌کند؛ ولی صفحه ساخت در محور مختصات z فقط حرکتی افقی دارد. از افشانه، پلیمری مذاب به‌صورت لایه‌ای خارج می‌شود. این لایه نازک مذاب، بلافاصله به لایه زیر چسبیده، هنگامی که لایه کامل می‌شود افشانه با دقتی معادل ۱۰۰ میکرومتر برای ساخت لایه بعدی به سمت بالا حرکت می‌کند و تمامی فرایندهای بالا برای لایه بعدی انجام می‌شود. زمان چاپ و تولید نمونه بستگی به ابعاد نمونه‌ای دارد که در حال تولید است. قطعات کوچک‌تر و قطعات با طول بیشتر و ضخامت کم به سرعت چاپ می‌شود. ولی قطعاتی که دارای پیچیدگی‌های بالا و ابعادی بزرگ‌تر هستند سرعت دستگاه را نسبت به حجم کار کاهش می‌دهند (شکل ۲)[۵].

۴ رشته‌ها در روش FFF

ماده خام و در حقیقت مواد ورودی در دستگاه FFF، رشته‌ای از مواد خام است که بر روی قرقره‌ای پیچیده شده، به‌منظور ایجاد لایه‌ها استفاده می‌شوند. رشته‌ها معمولاً از جنس پلیمر هستند. البته رشته‌های فلزی نیز وجود دارد که کاربرد کم‌تری در چاپگرهای سه بعدی FFF دارند. هر رشته بسته به جنس پلیمر به‌کار رفته دمای ذوب مخصوصی دارد. دمای ذوب رشته‌ها از ۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. استحکام ماده پلیمری به‌کار رفته در رشته‌ها مهم‌ترین ویژگی هر رشته است. استحکام رشته‌ها از ۱۰۰ پاسکال تا ۸۰ مگاپاسکال متغیر است. رشته‌ها دارای رنگ‌های مختلفی نیز هستند که بسته به نوع و شکل جسم مورد نظر، نوع رشته انتخاب می‌شود (شکل ۳) [۶].

۵ موارد استفاده ازروش FFF

۱. این روش برای مدل‌سازی و ساخت قطعاتی که نیاز به دقت بالایی در تولید آن‌ها وجود دارد، مناسب است.



شکل ۲ اجزای دستگاه چاپ سه‌بعدی FFF

۲. این روش برای مدل‌های مفهومی، سنجش نمونه و برقراری ارتباط بین طراحی و نمونه‌سازی بسیار مناسب است.
۳. نمونه‌هایی که تولید می‌شود می‌تواند نمونه‌های اولیه کاربردی باشد که در سنجش عملکرد نمونه نهایی به‌کار می‌رود.
٤. این روش برای تولید قطعات پایانی بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای ساخت قالب، به‌کار می‌رود.
۵. ساخت ابزارها را بسیار سریع‌تر از دستگاه‌های تولید و قالب‌سازی انجام می‌دهد و نیاز به تراشکاری یا پرداخت دوباره ندارد.

۶ صنایع پرکاربردچاپگرهای FFF

۱. هوا فضا و مکانیک
۲. پزشکی و آزمایشگاهی
۳. مهندسی پزشکی
٤. دندان پزشکی
۵. خودروسازی

شکل ۳ انواع رشته‌های تجاری

٦. هنری و طلاسازی
۷. صنعتی و تجاری
۸. معماری و مدل‌سازی
۹. مصرف‌کنندگان خانگی

۷ خصوصیات چاپگرهای FFF

آزادی در طراحی: آرزوی دیرینه طراحان این بوده است که هر چه می‌خواهند طراحی کنند را بدون کم‌وکاست بتوانند بسازند. با استفاده از FFF و چاپ سه‌بعدی این آرزوی دست‌نیافتنی محقق شده است. از زمانی که این فناوری ساخت روی کار آمده است، نمونه‌های پیچیده با جزئیات جانبی و نمونه‌هایی با ویژگی‌های درونی برای ساخت و تولید قطعات و نمونه‌های اولیه بسیار آسان شده و برای تولیدات طراحی شده سه‌بعدی بسیار کارآمد است [۷].

تولید قطعات: فناوری FFF این امکان را به ما می‌دهد که با استفاده از مواد پلیمری یا گرمانرم، قطعات و مدل‌های مورد نظر خود را به راحتی و به سرعت تولید کنیم. مزیت این فناوری در توانایی تولید سریع قطعات سفارشی با عملکرد و مقاومت بالا است. قطعات تولید شده با دوام و مستحکم بوده، در مقابل حرارت و مواد شیمیایی مقاوم هستند و در طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

اختراع مجازی: با دستگاه چاپگر سه‌بعدی FFF اختراعات مجازی دیگر خارج از تصور نبوده، امکان ساخت و لمس تخیلات طراح، وجود دارد. برای ساخت نمونه‌های موردنظر، تنها نیاز به طراحی سه‌بعدی وجود دارد و پس از آن می‌توان تغییراتی را در طراحی بدون نیاز به قالب‌سازی دوباره و صرف زمان‌های طولانی و هزینه‌های بالا ایجاد کرد.

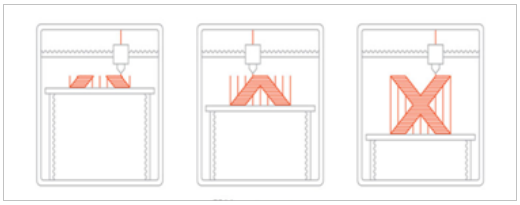
مهندسی پلاستیک: از پلاستیک‌هایی که برای استفاده در این فناوری به‌کار می‌روند می‌توان به ABS و انواع پلیمرها اشاره کرد. نمونه‌هایی که با این مواد ساخته می‌شوند برای تولید با حجم کم و سنجش عملکرد آن‌ها در محیط‌های سخت بسیار مناسب بوده و لایه‌سازی آن‌ها در تولید افزایشی بسیار دقیق است. اخیراً نوآوری‌هایی در زمینه فناوری چاپ سه‌بعدی به روش FFF شکل گرفته است که می‌توان توانایی تولید محصولات نهایی که قطعات مکانیکی و الکتریکی داخل آن سرهم سوار کردن می‌شوند مانند هواپیماهای بدون سرنشین را نام برد. با توجه به بعضی از محدودیت‌ها در طراحی و مواد، چاپگرهای FFF برای طراحی‌های خیلی پیچیده توصیه نمی‌شوند.

۸ مولفه‌های چاپگر در فناوری FFF

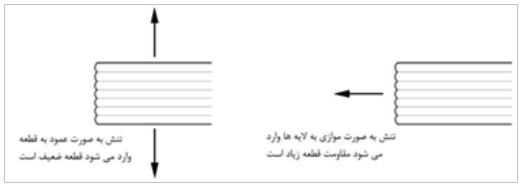
بیشتر دستگاه‌های چاپگر FFF این اجازه را به شما می‌دهد چندین مولفه در فرایند، شامل دمای افشانه، دمای کفه دستگاه، سرعت ساخت، ارتفاع لایه و سرعت خنک‌کاری پنکه را تنظیم و کنترل کنید. این موارد به صورت عمومی توسط کاربر تعیین می‌شود، بنابراین باید نسبت و اندازه قطعه و ارتفاع لایه‌ها به درستی طراحی شود تا کاربر بتواند بهترین حالت ممکن را برای دستگاه تنظیم کند. اندازه ساخت قابل دسترس برای چاپگر سه‌بعدی FFF رومیزی حدودا ۲۰۰ ×۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بوده، در حالی که چاپگرهای صنعتی FFF می‌توانند ابعادی به بزرگی ۱۰۰۰×۱۰۰۰×۱۰۰۰ میلی‌متر تولید کنند. یکی از راهکارهای ساخت نمونه بزرگ این است که آن را به قطعات کوچک‌تر تقسیم کرده، قطعات کوچک را ساخته، سپس سوار کنیم. ارتفاع لایه معمولی مورد استفاده درچاپگر سه‌بعدی FFF با توجه به نوع دستگاه بین ۵۰ تا ٤۰۰ میکرون متغیر است. هرچه ارتفاع لایه‌گذاری کم‌تر باشد ریختن لایه‌های نازک، تولید قطعات نرم‌تر با هندسه و شکل دقیق را ممکن می‌سازد، در حالی که ریختن لایه‌های ضخیم باعث تولید سریع‌تر و ارزان‌تر و البته با دقت کم‌تر قطعات می‌شود. معمولاً ارتفاع لایه‌گذاری ۲۰۰ میکرون بیش‌ترین کاربرد را دارد [٤] .

۹ چسبندگی لایه‌ها در فناوری FFF

چسبندگی خوب بین لایه‌های ریخته شده برای استحکام نهایی قطعه بسیار مهم است. زمانی که پلیمر مذاب از افشانه بیرون می‌آید، بر روی لایه قبلی فشرده می‌شود. دمای بالا و فشار، باعث ذوب مجدد سطح لایه قبلی شده، اتصال لایه جدید با بخش‌هایی که قبلاً چاپ شده را ممکن می‌سازد (شکل ٤). میزان اتصال بین لایه‌های مختلف همیشه کم‌تر از استحکام پایه مواد است و این امر بدان معنی است که قطعات تولیدشده ذاتاً ناهمسان هستند، مقاومت آن‌ها در جهت محور Z همیشه کم‌تر از صفحه X,Y است. به‌همین دلیل، بسیار حائز اهمیت است که هنگام طراحی به جهتی که به قطعات نیرو



شکل ٤ ترتیب قرار گرفتن لایه‌های مذاب



شکل ٥مقایسه مقاومت به تنش در جهت Y و X با جهت Z

وارد می‌شود واین‌که کدام جزئیات در قطعه برای ما حائز اهمیت است توجه کنیم [٤].

۱۰ نحوه وارد شدن تنش در قطعات FFF

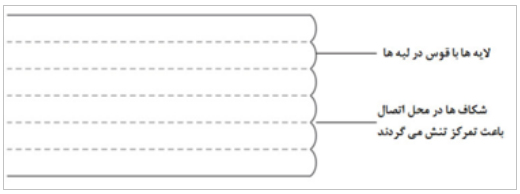
در قطعات تولیدشده با چاپگرهای سه‌بعدی FFF مقاومت در جهت محور Z همیشه کم‌تر از صفحه X,Y است. به عنوان مثال آزمون کشش بر روی قطعات چاپ شده افقی با جنس ABS با میزان لایه‌گذاری ٥٠ درصد نشانگر این امر بود که قطعاتی که به صورت عمودی چاپ شده‌اند؛ مقاومت کششی بیش‌تری (حدوداً ٤ برابر بیش‌تر) در جهت X,Y در مقایسه با جهت Z دارند (١٧ مگاپاسکال در برابر ٤/٤ مگاپاسکال). همچنین مقاومت قطعه در برابر شکست نیز حدوداً ١٠ برابر بیش‌تر بود (شکل ٥). (٤/٨ درصد در مقابل ٠/٥ درصد). علاوه بر موارد مذکور، از آنجا که لایه مذاب نسبت به لایه قبلی فشرده می‌شود و روی آن قرار می‌گیرد، شکل آن به بیضی تغییر می‌کند. این بدین معنی است که قطعات تولید شده همیشه دارای سطح موج‌دار هستند (شکل ٦). حتی برای لایه‌های با ارتفاع کم و مشخصه‌های کوچک همچون سوراخ‌های کوچک و رزوه‌های کوچک نیز ممکن است پس از چاپ نیاز به عملیات بعد از تولید وجود داشته باشد [٨ و٩] .

۱۱ ساخت پشتیبان در فناوری FFF

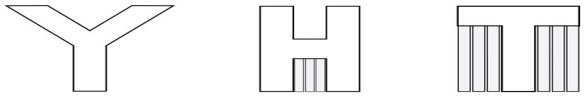
در چاپگرهای سه‌بعدی FFF ساخت پشتیبان برای به‌وجود آوردن برآمدگی هندسی شکل، الزامی است، پلیمرمذاب نمی‌تواند روی هوا ریخته شود به‌همین‌دلیل برای دستیابی به بعضی از اشکال، وجود پشتیبان الزامی است (شکل ٧). سطوح چاپ‌شده بر روی پشتیبان معمولاً کیفیت پایین‌تری نسبت به بقیه بخش‌ها دارند؛ به‌همین‌دلیل به‌شدت توصیه می‌شود که طراحی به‌صورتی انجام گیرد که نیاز به پشتیبان را به حداقل برساند. پشتیبان‌ها معمولاًجنس یکسانی نسبت به قطعه دارند. مواد پشتیبانی که در مایع حل می‌شوند نیز وجود دارند. چاپ بر روی پشتیبان‌های قابل‌حل به‌طور قابل‌توجهی، کیفیت سطح قطعه را افزایش می‌دهد، اما هزینه کلی چاپ را بسیار بالا می‌برد و با ماشین تخصصی دو افشان‌های با قابلیت لایه‌گذاری دو ماده‌ای ساخته می‌شود و به‌دلیل استفاده از مواد قابل‌حل، هزینه نسبتاً بالایی دارد. پشتیبان‌های با جنس یکسان، کاربرد بیشتری در چاپگرهای سه‌بعدی FFF دارند [٨].

۱۲ تخلخل میانی و ضخامت پوسته در فناوری FFF

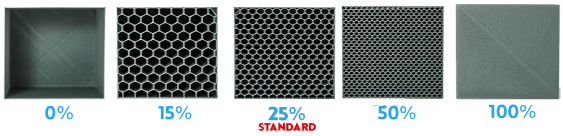
برای کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در مواد، قطعات تولیدی معمولاً به‌صورت یکپارچه تولید نمی‌شوند. به این صورت که محیط بیرونی با استفاده از چندین مرحله ایجاد می‌شود که پوسته نامیده می‌شود و بخش داخلی با ماده کم تراکم‌تری پر می‌شود که به آن تخلخل میانی گویند. تخلخل میانی و ضخامت پوسته‌ها به‌شدت بر روی استحکام قطعه نهایی، تأثیرمی‌گذارد. هرچه تخلخل میانی بیشتر شود، استحکام و وزن نهایی قطعه کم‌تر می‌شود. با افزایش تخلخل میانی، استحکام نهایی قطعه و همچنین زمان و هزینه چاپ بیش‌تر می‌شود. میزان تراکم برای تخلخل میانی از ٠ تا ١٠٠



شکل ٦ لبه قوسی شکل قطعه تولیدی و تمرکز تنش در بین لایه‌ها



شکل ۷پشتیبان به رنگ تیره و قطعه نهایی به رنگ روشن



شکل ۸میزان تراکم برای تخلخل میانی از ۰ تا ۱۰۰ درصد

درصد و ضخامت پوسته از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرون متفاوت است (شکل ۸). با توازن میزان تراکم میانی و ضخامت پوسته می توان سازش خوبی بین قدرت و سرعت برای چاپ سریع فراهم کرد [۸] .

۱۳ مزایای فناوری FFF

– هزینه های پایین تر نسبت به دیگر روش ها: اکثر شرکت ها به دلیل هزینه پایین و راحتی کار، چاپگرهای FFF را انتخاب می کنند. در مقایسه با روش های دیگر، چاپگرهای FFF بسیار ارزان است و همین امر باعث پرکاربرد بودن این روش شده است؛ زیرا برای شرکت ها بسیار حائز اهمیت است که بدانند تولید با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی نسبت به روش سنتی بسیار ارزان تر است. پودری که در روش های چاپ SLS و ماده ای که در روش SLA به کار می رود نسبت به رشته هایی که در چاپگرهای FFF استفاده می شوند، بسیار گران هستند. به همین دلیل چاپگرهای FFF برای بسیاری از مشتری ها، جذاب تر است [۱۰] .

– محدوده وسیع انتخاب جنس رشته ها: از آنجا که دامنه رشته های پلیمری بسیار گسترده است، شرکت ها می توانند مواد را به راحتی و با هزینه کم تغییر دهند. امروزه بیش از ۵۰ نوع رشته تجاری در بازار موجود است و حتی امکان ساخت رشته های کوپلیمری نیز وجود دارد. همچنین این قابلیت وجود دارد که به صورت هم زمان مخلوطی از پلیمر و فلزات را چاپ کنند که این امر، چاپ پیچیده ترین طرح ها را ممکن می سازد. همچنین چاپ دررنگ های مختلف امکان پذیر است [۱۰].

– امکان دسترسی آسان: بر اساس آخرین آمارها فناوری چاپگرهای FFF بسیار بیشتر از سایر روش های چاپ سه بعدی قابل دسترس است. آمارها نشان می دهد که مردم تمایل دارند این روش را انتخاب و به آسانی به خروجی برسند. این موضوع باعث می شود این فناوری برای شرکت هایی که درچاپ سه بعدی یا تولید، تجربه کمی دارند، جذاب باشد، همچنین هزینه پایین دستگاه های چاپگر FFF رومیزی باعث شده تا اشخاص برای استفاده از این چاپگرها در منزل، متمایل باشند [۱۰].

۱۴ نتیجه گیری

چاپگرهای FFF بسیار دقیق و ارزان هستند که امروز در همه زمینه های علمی و صنعتی و تجاری از آن ها استفاده می شود. قطعات تولیدشده با چاپگرهای سه بعدی FFF بسیار متنوع بوده، از مواد مختلف پلیمری و فلزی ساخته می شوند. آزادی در طراحی و ساخت قطعات دقیق و پیچیده از جمله ویژگی های این چاپگرها هستند. محدوده وسیع و هزینه نسبتاً کم مواد اولیه، این چاپگرها را به کاربردی ترین ابزار ساخت افزایشی تبدیل کرده است. نسل های جدید این چاپگرها در دو نسخه رومیزی و صنعتی وارد بازار شده است. این چاپگرها قیمت بسیار مناسبی از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دلار دارند که باعث شده شرکت ها و سازمان ها و کارخانه ها و حتی افراد شخصی نیز این دستگاه ها را خریداری کنند. مولفه های چاپ زیادی مثل ساخت پشتیبان ها، تخلخل میانی و ضخامت پوسته در فناوری FFF وجود دارد که انتخاب های زیادی به کاربر برای ساخت قطعه نهایی با ویژگی های مناسب می دهد. در طراحی سه بعدی برای چاپ با چاپگرهای FFF رعایت نکاتی همچون استحکام فشاری، کششی و پیچشی و همچنین وزن و میزان ماده مصرفی باید مد نظر قرار گرفته شود.

مراجع

1. Sachs, E., Cima M., Cornie J., Three Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a CAD Model,- *Journal of Engineering for Industry*, 481-488, 114, **1992**.

2. Gross, B.C., Erkal J.L., Lockwood S.Y., Chen C., Spence D.M., Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical Chemistry*, 3240-3253, 86, **2014**.

3. Ning, F., Cong W., Hu Y., Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling, *Composites Part B: Engineering*, 369-378, 80, **2015**.

4. Mohamed, O.A., S.H. Masood, and J.L. Bhowmik, Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters: A Review of Current Research and Future Prospects, *Advances in Manufacturin*g, 42-53, 3, **2015**.

5. Zein, I., Hutmacher DW., Tan KC., Teoh SH., Fused Deposition Modeling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications, *Biomaterials*, 1169-1185, 23, **2002**.

6. Gurrala, P.K. and S.P. Regalla, Part Strength Evolution with Bonding Between Filaments in Fused Deposition Modelling, *Virtual and Physical Prototyping*,141-149, 9, **2014**.

7. MacDonald, E. and R. Wicker, Multiprocess 3D Printing for Increasing Component Functionality, *Science*, 353, **2016**.

8. Rezaie, R., Badrossamay M., Ghaie A., Moosavi H ., Topology Optimization for Fused Deposition Modeling Process, *Procedia CIRP*, 521-526, 6, **2013**.

9. Fernandez-Vicente, M., Calle-Guamantario WP.; Ferrándiz Bou S.; Conejero Rodilla A., Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing, *3D Printing and Additive Manufacturing,*183-192, 3, **2016**.

10. Wong K.V., Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing, *International Scholarly Research Network*, 2012, 1-10, **2012**.