

A Review on Fused Deposition Modeling Method

Behzad Najafloo¹, Mohammad Razavi-Nouri², Amir Masood Rezadoust²

1. Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology,
P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 7 October 2015, Accepted: 26 December 2015

Abstract

Nowadays in worldwide competitive markets, the development of product by shortening the cycle time from design to production process in order to increase the rate of production is a remarkable success for manufacturing organizations. Therefore, fast prototyping and manufacturing methods are developed and grown at a fast rate. The fused deposition modeling (FDM) using polymeric filaments can be classified as one of the fast prototyping methods. Several works have been carried out to evaluate the effect of FDM processing parameters on mechanical properties. The results showed that the parameters such as raster orientation, air gap and build plane were the most important factors on mechanical properties, also the fill pattern and design precision were the ones which had significant impacts on the surface quality. By reviewing the related published papers, our aim in this article has been to provide some information on the above-mentioned manufacturing process to include the important parameters that should be controlled in order to acquire a product with optimum mechanical properties.

Key Words

fused deposition modeling,
raster orientation,
air gap,
build plane,
fill pattern

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.rezadoust@ippi.ac.ir

مروری بر روش مدل سازی لایه نشانی همجوش

بهزاد نجفלו^۱، محمد رضوی نوری^۲، امیر مسعود رضادوست^{۳*}

۱- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۴۹۷۵-۱۱۲

دریافت: ۱۳۹۴/۷/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۵

در بازار رقابتی امروز، کاهش مدت زمان توسعه و ساخت محصول از طراحی تا تولید، رمز موفقیت سازمان های تولیدی به شمار می رود. از این رو، استفاده از روش های نمونه سازی و تولید سریع با شتاب رو به رشد است. مطالعات متعدد درباره ساخت، بررسی و معرفی متغیرهای اثرگذار بر خواص مکانیکی قطعات تولید شده با روش مدل سازی لایه نشانی همجوش رشته های پلیمری انجام شده که از روش های متداول در حوزه نمونه سازی سریع است. نتایج حاکی از آن است، زاویه و فاصله هم نشینی رشته ها در هر لایه و جهت گیری مدل در زمان ساخت از مهم ترین عوامل اثرگذار بر خواص مکانیکی است. همچنین، متغیرهایی مانند الگوی پرکردن و دقت مدل طراحی شده، از مهم ترین عوامل مؤثر بر ویژگی ظاهری قطعات تولید شده محسوب می شوند. در این مقاله سعی شده است، اطلاعات به نسبت جامعی درباره این روش و متغیرهای مهم تولید و تاثیر هر یک از آن ها بر خواص مکانیکی و ظاهری قطعات تولید شده با مرور مقالات چاپ شده در این حوزه ارائه شود.

بسیار ش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال ششم، شماره ۳.

صفحه ۸۵-۷۴، ۱۳۹۵

ISSN: 2252-0449

چکیده



بهزاد نجفلو



محمد رضوی نوری



امیر مسعود رضادوست

واژگان کلیدی

مدل سازی لایه نشانی همجوش،
زاویه هم نشینی رشته ها،
فاصله هم نشینی رشته ها،
جهت گیری مدل،
الگوی پرکردن

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

a.rezadoust@ippi.ac.ir

مقدمه

زمان در زندگی بشر امروز نقش تعیین کننده دارد، به نحوی که روی برنامه ریزی های دوره کنونی اثرگذار است و آن را به سمتی سوق می دهد که بیشترین پیشرفت در کمترین زمان ممکن به دست آید. از این رو، در دنیای رقابتی امروز کاهش زمان توسعه و ساخت یک محصول از طراحی تا تولید، رمز موفقیت سازمان های تولیدکننده به شمار می آید.

به کارگیری فناوری های نوین از عواملی است که در حوزه صنعت، موجب افزایش سرعت حرکت کشورهای در حال توسعه، به سوی رشد و ترقی می شود. روش های نمونه سازی و تولید سریع (rapid prototyping, RP) از فناوری های به نسبت جدیدی است که می توان در این مسیر به کار گرفت. در حقیقت، این فناوری با تلفیق رایانه و دانش نمونه سازی ایجاد شده است. این روش افزون بر سرعت بخشیدن به چرخه طراحی، ساخت و تحلیل، موجب افزایش دقت و کاهش زمان و هزینه ها شده است. نمونه سازی سریع به مجموعه ای از فرایندهای ساخت اطلاق می شود که به وسیله آن ها، مدل فیزیکی قطعه جامد، به طور مستقیم با استفاده از داده های هندسی سطوح آن که به کمک رایانه طراحی شده است، ساخته می شود. در این روش ها، مدل سه بعدی رایانه ای قطعه مدنظر را می توان به ده ها یا هزارها لایه دوبعدی با ضخامت حدود 0.125 mm تقسیم کرده و هر لایه را جداگانه ایجاد کرد. سپس، با افزودن لایه های متعدد روی یکدیگر، قطعه نهایی تهیه می شود.

روش های RP در همه حوزه های مهندسی و حتی علوم پزشکی، جغرافیا، جواهر سازی و بسیاری دیگر از مصارف، کاربرد گسترده ای دارند. همچنین در تجسم، بازمینی، ارزیابی عملکرد و تحلیل تنش هر قطعه نیز از نقش تعیین کننده ای برخوردارند [۵-۱]. با وجود اهمیت و کاربردهای نمونه سازی سریع و نیاز به گسترش روز افزون آن در کشور عزیزمان ایران، مجامع علمی و صنعتی داخلی آشنایی اندکی با این فنون دارند و کمتر به این موضوع پرداخته اند. امید است مقاله پیش رو، مقدمه ای برای آشنایی و توجه هر چه بیشتر دانشگاهیان و افراد صنعتی کشور با این روش ها باشد.

پیشرفت جدی در حوزه RP به دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ میلادی بازمی گردد. ولی در سال های بعد، روش های دیگری پا به عرصه وجود نهادند که از آن جمله می توان به روشی اشاره کرد که Ciraud در سال ۱۹۷۲ برای ساخت مواد پودری ارائه داد. وی از لیزر، الکترون و پلاسما برای ایجاد گرمای محلی و جوش مواد به یکدیگر استفاده کرد [۶]. پس از آن در سال ۱۹۷۷، Swanson

موفق به پیشنهاد روشی شد که بر مبنای آن پلیمری حساس به نور را، به طور مستقیم با استفاده از پلیمر شدن سه بعدی، در محل برخورد دو پرتو لیزر پخت می کرد [۷].

در سال ۱۹۸۲ Herbert از روشی برای تولید قطعه استفاده کرد که در آن لیزر UV با کمک سامانه ای آینه ای به شکل مستقیم به لایه های مختلف پلیمری برخورد می کرد [۸]. در نهایت، پس از تلاش ها و اختراعات تعدادی از مخترعان و پس از چاپ اولین نتایج پژوهش ها در این زمینه در سال ۱۹۸۲، شرکت 3D SYSTEM کاربرد صنعتی آن را از سال ۱۹۸۹ در آمریکا آغاز کرد [۹].

کاربرد این فناوری ها در سال های اخیر، در اثر توجه بیشتر به ارزش زمان و نیز فشرده شدن رقابت ها، افزایش درخور توجهی یافته است.

مهم ترین فرایندهای RP که در سال های اخیر معرفی شده اند عبارتند از:

- نمونه سازی با رزین های حساس به نور (stereo lithography)،
- چاپ سه بعدی (3D printing)،
- مدل سازی چندافشانه ای (multi jet modeling)،
- مدل سازی با روش لایه نشانی همجوش (fused deposition modeling, FDM)،
- تف جوشی انتخابی لیزری (selective laser sintering)،
- ساخت اشیا با روش لایه ای (laminated object manufacturing)،
- نمونه سازی انجمادی سریع (rapid freeze prototyping)،
- نمونه سازی پخت زمینه جامد (solid ground curing)،
- نمونه سازی شبکه لیزری (laser engineered net shaping) و
- نمونه سازی افشانه گرمایی (thermojet) [۱۰].

مزایای مهم استفاده از این روش ها به شرح زیر است:

- کاهش زمان و هزینه در چرخه طراحی تا تولید محصول جدید،
- افزایش سرعت طراحی محصول جدید و اعمال سریع اصلاحات،
- عرضه سریع محصولات جدید در بازار رقابتی،
- امکان بازاریابی محصول جدید پیش از تولید و کاهش خطرپذیری تولید،

- امکان ساخت نمونه های پیچیده، بدون هیچ گونه محدودیت در شکل هندسی،

- سرعت و راحتی فرایند و

- دقت زیاد نمونه سازی.

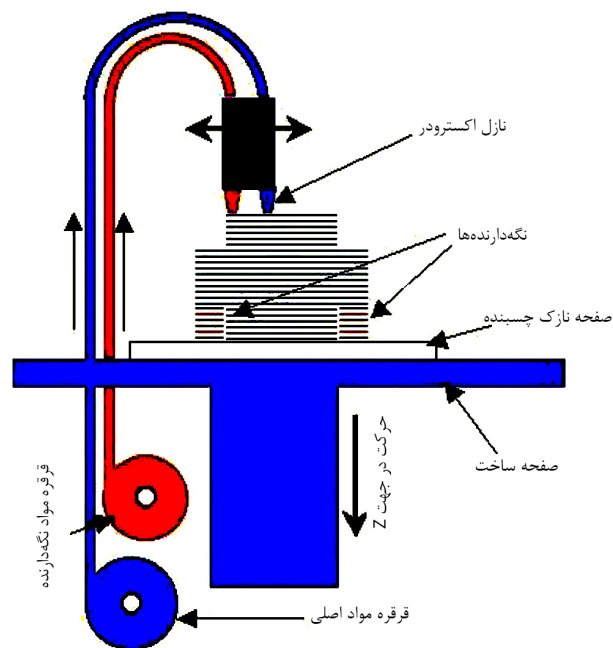
در ادامه به طور مفصل به معرفی روش لایه نشانی همجوش به عنوان یکی از متداول ترین روش ها در حوزه نمونه سازی سریع پرداخته

ساخت تأمین می شود.

سخت افزار این سامانه روباتی با سازوکار کنترل عددی (computer numerical control, CNC) است که یک یا دو نازل بسیار ظریف را جابه جا می کند. یکی از نازل ها برای پاشش مواد اصلی و دیگری برای پاشش مواد نگه دارنده مدل به کار گرفته می شود. امروزه، این دستگاه از قابلیت ساخت قطعات سرامیکی و فلزی نیز برخوردار است. بدین ترتیب که پودر سرامیک یا فلز را با چسب پلیمری ویژه مخلوط می کنند. پس از ساخت قطعه، چسب با فنون خاصی مانند گرمادهی، از قطعه خارج می شود و درصد خلوص قطعه افزایش می یابد [۱۳]. جدول ۱ برخی از مشخصات عمومی دستگاه های FDM را بیان می کند.

مواد استفاده شده در FDM

مواد بر پایه پلی آکریلونیتریل بوتادی ان استیرن (ABS) و پلی لاکتیک اسید (PLA) بیشترین کاربرد را در دستگاه های FDM دارند. سه دسته دیگر مواد نیز قابلیت جایگزین شدن با ABS را دارند که متداول ترین آن ها بر پایه پلی کربنات ها هستند. در مقایسه با ABS، این مواد خواص کششی و استحکام خمشی بیشتری دارند. گروه دوم، پلی اترایمیدها (PEI) هستند که به دلیل برخورداری از خواص مطلوب، از نظر اشتعال پذیری و مقدار سمیت، برای استفاده در وسایل نقلیه دریایی، هوایی و زمینی بسیار مناسب هستند. گروه سوم پلی فینیل سولفون ها (PPSF) نام دارند. تنها نکته دارای اهمیت درباره این سه دسته مواد جایگزین، قابلیت استفاده از این ها در مدل های پیشرفته تر دستگاه های FDM است [۱۴]. ویژگی های مواد به کار رفته بر پایه ABS و PC در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱- نحوه عملکرد سامانه FDM [۱۲].

می شود. سعی شده تا عوامل و متغیرهای اثرگذار بر فرایند و قطعه نهایی در این روش معرفی شوند.

مدل سازی با روش FDM

در این روش، که شرکت Stratasys در سال ۱۹۸۸ ایجاد کرد [۱۱]، ماده اولیه به شکل رشته جامد در نازل دستگاه گرم می شود تا قابلیت جریان پذیری پیدا کند. سپس، این ماده از داخل روزنه نازل به شکل قطره های مذاب یا جریان پیوسته خارج شده و روی صفحه ساخت، در محل ها و مسیرهای کنترل شده نشاند می شود (شکل ۱). همان طور که مشاهده می شود، نازل خروجی تنها در دو راستای x و y در صفحه افقی حرکت می کند و حرکت عمودی به وسیله صفحه

جدول ۱- ویژگی های عمومی انواع مختلف دستگاه های FDM [۹].

نام مدل	FDM 2000	FDM 3000	FDM 8000	Quantum
صفحه ساخت (mm)	۲۵۴×۲۵۴×۲۵۴	۴۰۶×۲۵۴×۲۵۴	۶۰۹×۴۵۷×۴۵۷	۶۰۰×۵۰۰×۶۰۰
دقت ابعادی (mm)	±۰/۱۲۷	±۰/۱۲۷	±۰/۱۲۷-۰/۲۵۴	±۰/۱۲۷
اندازه (mm)	۱۰۶۷×۹۱۴×۶۶۰	۹۱۴×۱۰۶۷×۶۶۰	۱۰۰۳×۱۹۰۵×۱۴۸۶	۱۱۱۸×۱۹۸۱×۲۲۳۵
وزن (kg)	۱۶۰	۱۶۰	۳۹۲	۱۱۳۴
عرض لایه (mm)	۰/۲۵۴ - ۲/۵۴	۰/۲۵۴ - ۲/۵۴	۰/۲۵۴ - ۲/۵۴	۰/۳۸ - ۰/۵۱
ضخامت لایه (mm)	۰/۰۵ - ۰/۷۶۲	۰/۰۵ - ۰/۷۶۲	۰/۰۵ - ۰/۷۶۲	۰/۱۸ - ۰/۲۵

جدول ۲- ویژگی های مواد به کار رفته در روش FDM [۱۴].

ویژگی	ABS	ABSi	ABS plus	ABS/PC
استحکام کششی (MPa)	۲۲	۳۷	۳۶	۳۴/۸
مدول کششی (MPa)	۱۶۲۷	۱۹۱۵	۲۲۶۵	۱۸۲۷
ازدیاد طول (%)	۶	۳/۱	۴	۴/۳
مقاومت خمشی (MPa)	۴۱	۶۱	۵۲	۵۰
انرژی IZOD (J/m^2)	۱۰۶/۸	۱۰۱/۴	۹۶	۱۲۳
چگالی ویژه	۱/۰۵	۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۲۰

بحث

ساخت در روش FDM را می توان به چهار گروه متمایز دسته بندی کرد (جدول ۳) [۱۷].

با توجه به ماهیت هر فرایند تولید، بروز مشکل در اثر عوامل متعدد اثرگذار در مدت ساخت قطعه، مانند گرادیان گرمایی ناشی از ذوب، جریان هوا، انجماد، جهت گیری مواد و برش، امکان پذیر است. با توجه به این موضوع و از آنجا که هر یک از عوامل نام برده می توانند به طور جداگانه تحت تأثیر سایر متغیرها قرار گیرند، بهینه سازی فرایند مسئله ای دشوار است [۱۷].

به دلیل گستردگی متغیرهای فرایند، شناسایی اثرگذارترین آن ها در تولید محصول امری ضروری به نظر می رسد. از این رو، در ادامه به نتایج پژوهش های انجام شده در این زمینه پرداخته می شود.

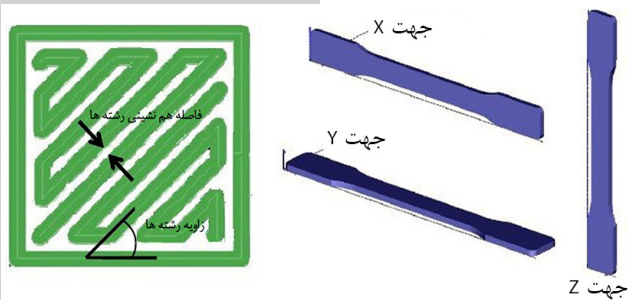
Montero و همکاران [۱۸] اثر متغیرهای طراحی و فرایند را بر استحکام کششی قطعات تولید شده با روش FDM بررسی کردند. این پژوهشگران برای متغیرهای خود دو حد را در نظر گرفتند (جدول ۴). آن ها، با توجه به نتایج میزان اثرگذاری این متغیرها بر استحکام کششی (شکل ۲) دریافتند، از میان متغیرهای مطالعه شده، فاصله هم نشینی (air gap) و زاویه رشته ها (raster orientation) بیش ترین اثر را بر خواص مکانیکی دارند. با مرور کارهای پژوهشی سایر پژوهشگران می توان دریافت، جهت گیری مدل هنگام ساخت (build plane) نیز اثر درخور توجهی بر خواص مکانیکی قطعه

خواص مکانیکی

در روش FDM ساختار درونی قطعات مشابه قرارگیری الیاف در کامپوزیت هاست. پژوهشگران بسیاری تلاش کرده اند تا با این رویکرد به بررسی خواص قطعات بپردازند. El-Gizawy [۱۵] از نظریه کلاسیک لایه ها برای پیش بینی شکست مواد در FDM استفاده کرد. رویکرد دیگر را Rodriguez و همکاران [۱۶] بیان کردند. آن ها این کار را با تعریف جزء حجمی به حالت ایستا انجام دادند. نتایج پژوهش دیگری که به بررسی مشخصات و خواص مواد ABS به کار رفته در FDM (در شرایط آزمایش استاندارد) پرداخته است، نشانگر اثرگذار بودن نحوه قرارگیری مواد بر خواص مکانیکی قطعه است. به طور مشابه همجوشی میان رشته های مجاور در تنش های زیاد از حساسیت بیشتری برخوردار است. زیرا در این حالت، به دلیل آنکه تنش وارد شده تمایل به گسستن ساختار قطعه دارد، کیفیت همجوشی انجام شده میان رشته هایی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند، نقش تعیین کننده ای ایفا می کند [۱۷]. مطالعات آزمایشگاهی بسیاری [۱۸-۲۸] در زمینه اثر متغیرهای فرایندی FDM بر مشخصات قطعه نهایی، مانند کیفیت سطح، کاهش مواد مصرفی و دقت تولید انجام شده است. متغیرهای

جدول ۳- متغیرهای فرایند FDM [۱۷].

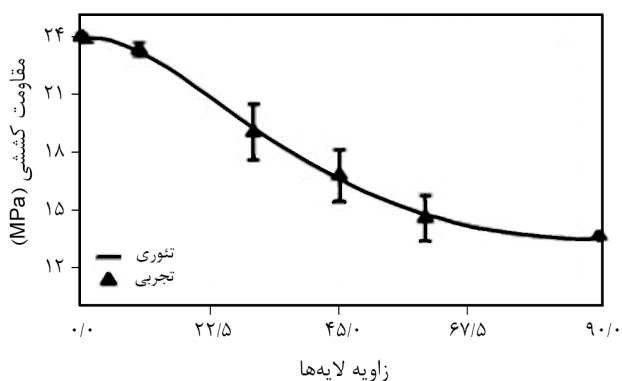
مشخصه هندسی	مشخصه مواد	مشخصه ماشین	مشخصه فرایندی
طول رشته گذاری در لایه ساختار مواد نگه دارنده	گرانروی سفتی رسانندگی گرمایی	قطر نازل سرعت تغذیه رشته سرعت جریان قطر رشته	ضخامت لایه عرض رشته ها دمای اکسترودر دمای مدل الگوی رشته گذاری در لایه



شکل ۳- متغیرهای جهت گیری مدل در زمان ساخت، اثر فاصله هم نشینی و زاویه رشته ها در هر لایه.

شکل ۳- متغیرهای جهت گیری مدل در زمان ساخت، اثر فاصله هم نشینی و زاویه رشته ها در هر لایه. همچنین، کمترین استحکام کششی نیز برای زوایای 90° و 45° گزارش شده است. آن ها در توجیه نتایج آزمون کشش به ویژگی ناهم سانگردی قطعه تولید شده اشاره کردند. به بیان دیگر، اثر استفاده از زاویه صفر درجه در روش FDM مشابه اثر الیاف تقویت کننده ای است که در کامپوزیت های سنتی در راستای نیروی اعمال شده جهت گیری کرده باشند. بنابراین، در هر دو حالت بیشینه استحکام کششی به دست می آید. زیرا نیرو در لایه نشانی با زاویه صفر درجه، در راستای آرایش مولکول ها اعمال می شود. اما در حالت ضعیف بودن پیوند بین لایه ای یا وجود تداخل بین لایه ای، تمایل به هم راستایی با محور تنش وارد شده در سایر زاویه ها موجب پدیده لایه لایه شدن قطعه شده و از استحکام کششی آن می کاهد.

آزمون خمش ویژگی دیگری است که به طور معمول برای ارزیابی خواص مکانیکی مطالعه می شود. در حقیقت، آزمون خمش چگونگی رفتار قطعه را بر اثر نیروی خارجی وارد شده به حالت عمود بر محور طولی آن بیان می کند. روش متداول تعیین استحکام خمشی مواد، آزمون خمش سه نقطه ای است. Es-Said و همکاران [۱۸] بیشترین استحکام خمشی ($44/4 \text{ MPa}$) را برای لایه چینی با زاویه صفر درجه به دست آوردند. آن ها گزارش کردند، رتبه دوم و سوم



شکل ۴- تغییرات استحکام کششی با زاویه لایه ها [۲۰].

جدول ۴- متغیرهای تولیدی در پژوهش Montero [۱۸].

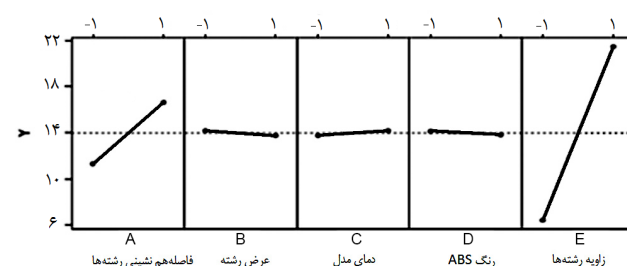
متغیر	سطح تغییرات	
	حد کم	حد زیاد
فاصله هم نشینی رشته ها (cm)	۰/۰۰	۰/۰۰۵۰۸
عرض رشته ها (cm)	۰/۰۰۵۰۸	۰/۱۰۰۵۸
دمای مدل ($^\circ\text{C}$)	۲۸۰	۲۷۰
رنگ ABS	سفید	آبی
نحوه وجود رشته ها در هر لایه	محوری	عرضی

دارد [۲۱-۱۹]. در ادامه به اثر سه متغیر یعنی جهت گیری مدل هنگام ساخت، اثر فاصله هم نشینی و زاویه رشته ها در هر لایه به عنوان اثر گذارترین متغیرها، به تفصیل پرداخته می شود. شکل ۳ چگونگی قرارگیری و ساخت قطعه را نشان می دهد.

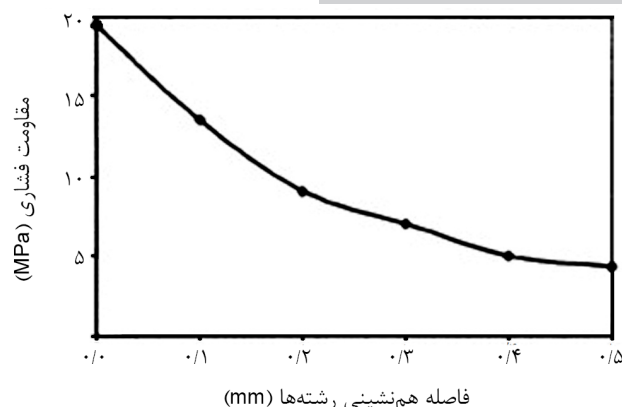
اثر زاویه رشته ها در هر لایه

این متغیر به عنوان یکی از مهم ترین عوامل تعیین کننده ویژگی های نهایی قطعه به شمار می رود. بنابراین، در بیشتر پژوهش های انجام شده در زمینه خواص مکانیکی، اثر زاویه رشته ها در هر لایه از نکاتی است که بررسی می شود [۲۷-۱۹]. Rodriguez و همکاران [۲۰] نمونه هایی با زوایای مختلف ساخته و اثر زاویه رشته ها را بر استحکام کششی در هر لایه بررسی کردند. در قسمتی از نتایج این پژوهش، بدون بیان علت و چگونگی دستیابی به این نتیجه، اعلام شده است که زاویه رشته ها در هر لایه نقش بسیار مهمی در تعیین تنش های عمودی و برشی در قطعه ایفا می کند و با افزایش این زاویه، از استحکام لایه ها کاسته می شود (شکل ۴).

در پژوهشی مشابه، Es-Said و همکاران [۲۸] اثر زاویه لایه ها را بر خواص کششی، خمشی و ضربه ای قطعات تولید شده از ABS بررسی کردند. آن ها دریافتند، بیشترین استحکام کششی ($20/6 \text{ MPa}$) در لایه چینی با زاویه صفر درجه اتفاق می افتد. رتبه دوم و رتبه سوم استحکام، به ترتیب به لایه چینی با زاویه های $45^\circ/0^\circ$ (14 MPa) و



شکل ۲- سطح تغییرات برای متغیرهای در نظر گرفته شده در پژوهش Montero بر استحکام کششی [۱۸].

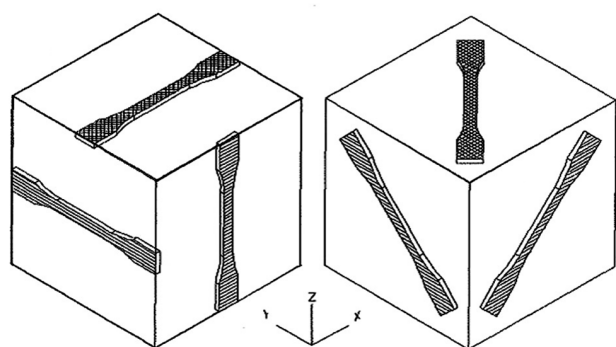


شکل ۵- تغییرات استحکام فشاری با فاصله هم‌نشینی رشته‌ها [۲۷].

این موضوع، اثر تعداد لایه‌های هم‌نشین شده کنار یکدیگر، به دلیل تغییرات فاصله هم‌نشینی میان رشته‌هاست. در حقیقت، با افزایش فاصله هم‌نشینی رشته‌ها و کاهش رشته‌ها در هر لایه، از قابلیت باربرداری نمونه کاسته می‌شود و در نهایت، استحکام کششی کاهش می‌یابد. اثر فاصله هم‌نشینی رشته‌ها در هر لایه بر خواص فشاری، موضوع دیگری است که Too و همکاران [۲۷] بررسی کرده‌اند. آن‌ها شش فاصله هم‌نشینی متفاوت با تعداد لایه‌های یکسان (۳۹ لایه) را برای این بررسی انتخاب کردند (شکل ۵). نتایج نشان داد که مشابه اثر فاصله هم‌نشینی رشته‌ها بر استحکام کششی [۱۸]، با افزایش فاصله هم‌نشینی، از مقدار استحکام فشاری قطعه کاسته می‌شود.

اثر جهت‌گیری مدل هنگام ساخت

در پژوهشی که Bertoldi و همکاران [۱۹] در سال ۱۹۹۸ انجام دادند، اثر جهت‌گیری نمونه‌ها را بر ماتریس سختی (stiffness matrix) و ضریب انبساط گرمایی قطعات ارتوتروپیک بررسی کردند. آن‌ها شش جهت‌گیری مختلف برای نمونه‌ها در نظر گرفتند (شکل ۶). نتایج نشان داد، نمونه‌های عمودی (در صفحه XZ) در آزمون کشش، دچار شکست ترد می‌شوند. ولی نمونه‌های دارای جهت‌گیری در صفحه‌های XY و YZ رفتار کشسانی معمولی از خود نشان می‌دهند، با این تفاوت که نمونه‌های قرار گرفته در صفحه XY از مدول کشسانی و استحکام کششی بیشتری برخوردارند. کمترین استحکام کششی و مدول کشسانی نیز برای نمونه‌های واقع در صفحه XZ به دست آمد. باید توجه داشت، زمانی که نمونه‌ها در جهت Z ساخته می‌شوند، به دلیل افزایش تعداد لایه‌ها در ساخت نمونه و احتمال سستی بیشتر مکان جوش لایه‌ها هنگام تماس با یکدیگر، استحکام قطعه کاهش می‌یابد. اما در حالتی که نمونه‌ها در صفحه X یا Y ساخته می‌شوند، ساختار هم‌نشینی رشته‌ها در هر لایه بهتر می‌شود و به دلیل احتمال کمتر ایجاد نقص به هنگام



شکل ۶- نمونه‌های آزمون کشش با جهت‌گیری‌های متفاوت [۱۹].

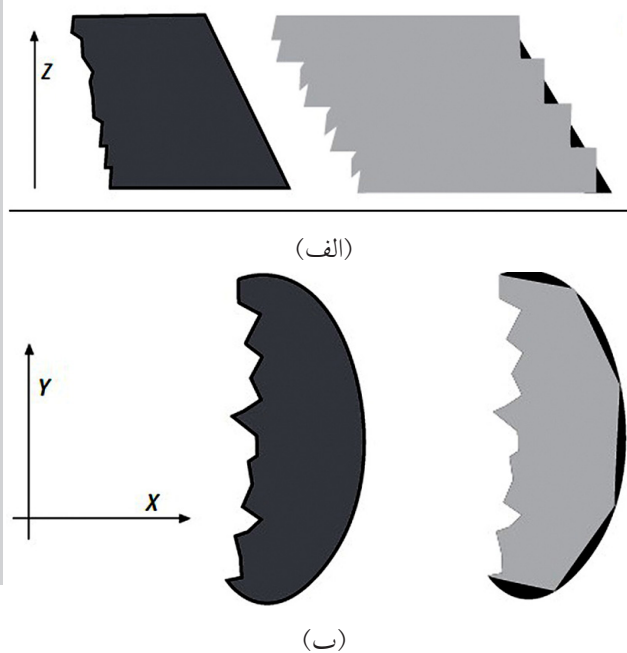
به ترتیب به لایه‌چینی با زاویه‌های $45^\circ/+45^\circ$ (۳۳/۱ MPa) و لایه‌چینی با زاویه‌های $0^\circ/45^\circ$ (۳۲/۲ MPa) تعلق دارد. ضعیف‌ترین نتیجه نیز برای لایه‌چینی با زاویه 90° به دست آمد.

بررسی‌های آماری نتایج به دست آمده نشان داد، برای نمونه‌های تهیه شده با زاویه‌های $0^\circ/45^\circ$ ، $45^\circ/+45^\circ$ و 45° اختلاف معناداری میان داده‌ها وجود ندارد و روند اثر زاویه رشته‌ها بر مقاومت خمشی مشابه مقاومت کششی است.

هنگامی که نمونه در شرایط آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد، در سطح بالایی آن تنش فشاری و در سطح پایینی آن تنش کششی به وجود می‌آید. هنگامی که نمونه ABS در حالت خمش آزمایش می‌شود، شکست از سطح کششی آغاز می‌شود. در نتیجه، نیروی شکست به استحکام کششی ماده مربوط است. بنابراین، تشابه اثرگذاری زاویه رشته‌ها بر خواص کششی و خمشی را می‌توان موضوعی منطقی قلمداد کرد. یافته‌های این گروه از پژوهشگران در باره مقاومت ضربه‌ای بیانگر این موضوع بود که بیش‌ترین انرژی جذب شده برای نمونه‌ای به دست می‌آید که با زاویه صفر درجه ساخته شود. همچنین، بررسی‌های آماری، مشابه حالت خمش اختلاف معناداری را میان سایر زوایای لایه‌چینی نشان نمی‌دهد [۱۸].

اثر فاصله هم‌نشینی رشته‌ها در هر لایه

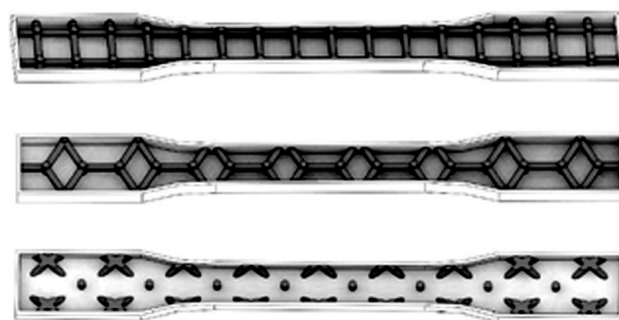
تعدادی از پژوهشگران اثر فاصله هم‌نشینی رشته‌ها در هر لایه را نیز بررسی کرده‌اند [۲۷-۱۸، ۲۵]. Monetro و همکاران [۱۸] اثر متغیرهای طراحی و فرایند را بر استحکام کششی (جدول ۴)، با کمک تعریف دو سطح تغییر متفاوت برای هر عامل بررسی کردند (شکل ۲). تغییرات فاصله هم‌نشینی رشته‌ها از یکدیگر و زاویه آن‌ها در هر لایه اثر زیادی بر استحکام کششی دارد. دلیل



شکل ۸- تفاوت در دقت مدل طراحی شده (سمت چپ) با نوع لایه گذاری واقعی (الف) و (ب) (سمت راست) [۱۷].

زیادی دارند. این عامل زمانی که دقت ابعادی دستگاه کمتر از دقت طراحی باشد، به بروز مشکلات منجر می شود. در شکل های ۸-الف و ۸-ب نمونه ای از مغایرت میان مدل های طراحی شده با مدل تولید شده به وسیله دستگاه، نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸-الف مشاهده می شود، دقت مدل لایه نشانی به طور کامل بر مدل طراحی شده منطبق نیست و لایه نشانی در جهت z به شکل پلکانی (staircase effect) انجام شده است که از آن با نام اثر پلکانی یاد می کنند. در شکل ۸-ب نیز دیده می شود، منحنی مدنظر به حالت خط های شکسته درمی آید. از این رو، بررسی و توجه ویژه به دقت لایه نشانی دستگاه موضوعی مهم تلقی می شود [۱۷].

عامل بعدی، نحوه یا الگوی پرکردن (fill pattern) است. این متغیر افزون بر اثرگذاری بر شکل ظاهری قطعه تولید شده، در



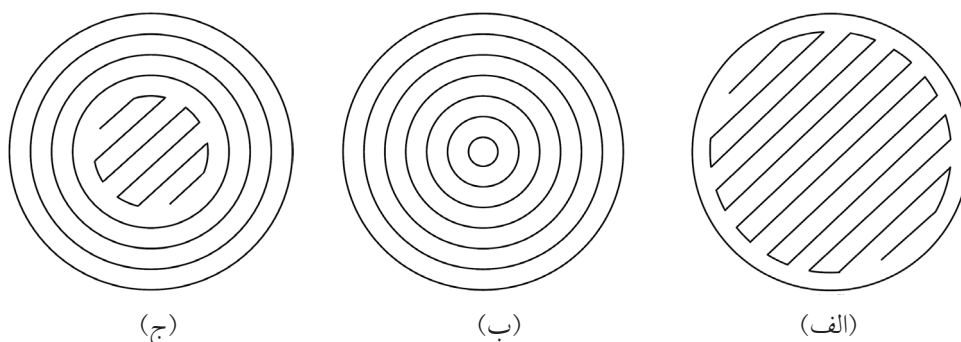
شکل ۷- مدل CAD نمونه های استفاده شده در پژوهش Rosas [۲۹].

تولید، خواص مکانیکی افزایش می یابد. این نتایج با یافته های Es-Said [۲۸] مبنی بر دستیابی به بیشترین استحکام کششی با کمک لایه چینی در زاویه صفر درجه، مطابقت دارد.

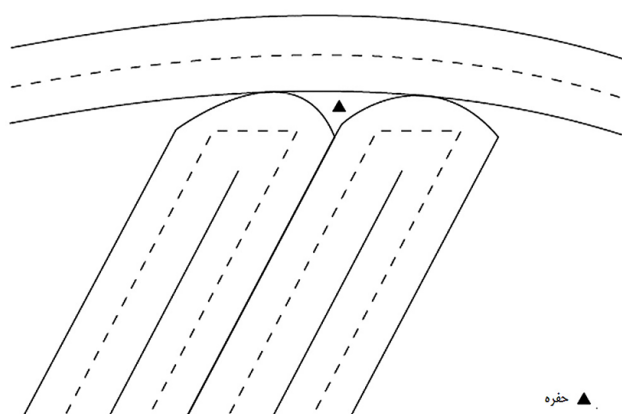
Rosas [۲۹] اثر ساختار درونی قطعات FDM را بر خواص مکانیکی قطعه بررسی کرد. وی از شش متغیر مختلف برای مطالعه هر چه بهتر نمونه ها استفاده کرد و سه نوع ساختار درونی متعامد (orthogonal)، شش وجهی (hexagonal) و هرمی (pyramid) را برای ساخت نمونه ها در نظر گرفت که مدل (computer-aided CAD design) نمونه ها در شکل ۷ نمایش داده شده است. یافته های او نشان داد، جهت گیری نمونه ها در زمان ساخت، اثر درخور توجهی بر نیروی کشش دارد. همچنین، بهترین عملکرد در برابر نیروی فشاری برای نمونه ای به دست می آید که در صفحه XY جهت گیری کرده است.

شکل شناسی

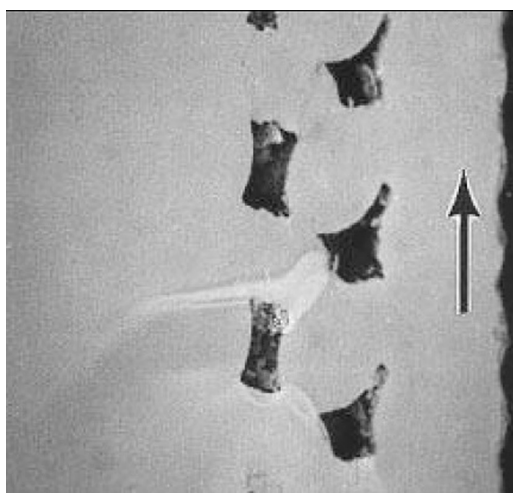
برای تولید قطعات با روش FDM، چند متغیر وجود دارد که هر یک به نوعی، افزون بر خواص مکانیکی بر ویژگی های ظاهری نمونه ها نیز اثرگذارند. به طور معمول، مدل های شبیه سازی شده در CAD که به عنوان ورودی در اختیار دستگاه FDM قرار می گیرند، دقت ابعادی



شکل ۹- الگوهای مختلف لایه نشانی در فرایند FDM، (الف) مورب، (ب) محیطی و (ج) محیطی-مورب [۱۷].



(الف)

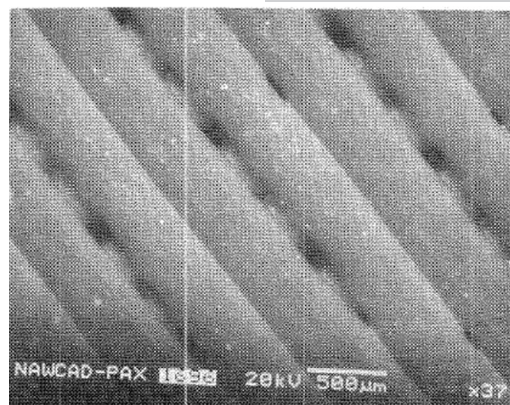


(ب)

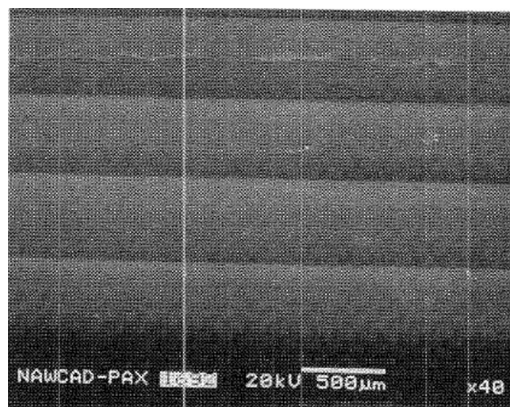
شکل ۱۱- وجود حفره در اثر نوع رشته‌نشانی: (الف) نحوه تماس رشته‌ها و (ب) سطح مقطع نمونه. علامت پیکان جهت ساخت قطعه را نشان می‌دهد [۱۷].

قسمت خواص مکانیکی مشاهده شد، تعیین این فاصله از نظر ظاهری و مقدار خواص مکانیکی به دست آمده، دارای اهمیت است. همچنین، در شکل ۱۱-الف دیده می‌شود که رشته‌ها در بالای قطعه در تماس کامل با یکدیگر قرار ندارند. بنابراین، در این بخش از قطعه اتصال کاملی میان رشته‌ها وجود ندارد. بررسی سطح مقطع این نمونه‌ها، وجود حفره‌هایی میان رشته‌ها را به اثبات می‌رساند (شکل ۱۱-ب). حال اگر با توجه به شکل ۱۲-الف، فاصله هم‌نشینی به گونه‌ای باشد که تماس کامل میان رشته‌ها برقرار شود، حفره‌ای به وجود نمی‌آید و قطعه‌ای بدون عیب تولید می‌شود (شکل ۱۲-ب). شایان توجه است، این اشکالات در کناره‌های قطعه‌ها بیشتر رخ می‌دهد.

موضوع دیگر در این زمینه به نقص‌های ایجاد شده در سطح



(الف)



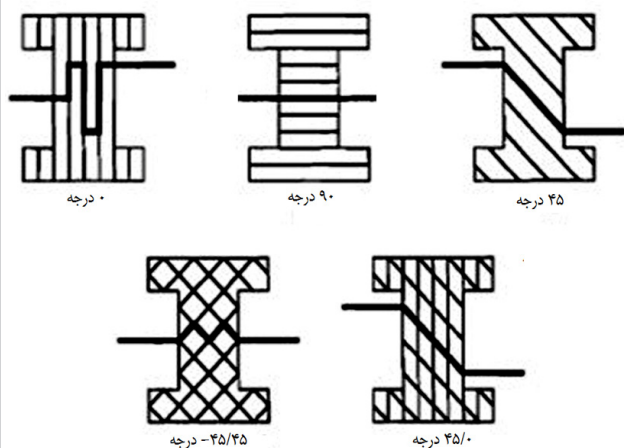
(ب)

شکل ۱۰- رشته‌نشانی با الگوی مورب: (الف) با زاویه ۴۵-۴۵+ و (ب) زاویه صفر درجه [۲۸].

شکل‌گیری خواص مکانیکی نیز سهم عمده‌ای دارد. به طور معمول، از سه الگوی پرکردن استفاده می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها الگوی مورب (raster fill pattern) است. در این الگو رشته‌ها به شکل مورب و با فاصله هم‌نشینی دلخواه از یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۹-الف). امکان تغییر زاویه و فاصله هم‌نشینی رشته‌ها از یکدیگر از مزایای مهم این نحوه از پرکردن قلمداد می‌شود. گاهی نیز، با توجه به الگوی طراحی و انتخاب طراح، از دو الگوی پرکردن محیطی (contour fill pattern) (شکل ۹-ب) و پرکردن محیطی-مورب که ترکیبی از دو الگوی دیگر است (شکل ۹-ج)، استفاده می‌شود [۱۷]. شکل ۱۰ ریزنگاشت SEM نمونه‌ای از رشته‌نشانی با الگوی مورب و زوایه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

اشکال‌های ایجاد شده روی سطوح قطعات FDM، موضوع دیگری است که نظر پژوهشگران را به خود معطوف کرده است.

در میان عوامل ایجاد این اشکالات، پیش‌تر به نوع طراحی و دقت الگو اشاره شده است، اما عوامل دیگری مانند فاصله هم‌نشینی نیز وجود دارند که در ایجاد این عیوب اثرگذارند. همان‌طور که در



شکل ۱۴- مسیر شکست نمونه‌ها در لایه‌چینی‌های مختلف [۲۸].

می‌دهد که به شکل‌های مختلف لایه‌چینی شده‌اند. مشاهده می‌شود، زاویه قرارگیری رشته‌ها در هر لایه اثر بسزایی بر رفتار شکست نمونه‌ها دارد و به‌طور عمده شکست در مرز مشترک میان رشته‌ها رخ می‌دهد. رشد ترک نیز در جهت زاویه قرارگیری رشته‌ها اتفاق می‌افتد.

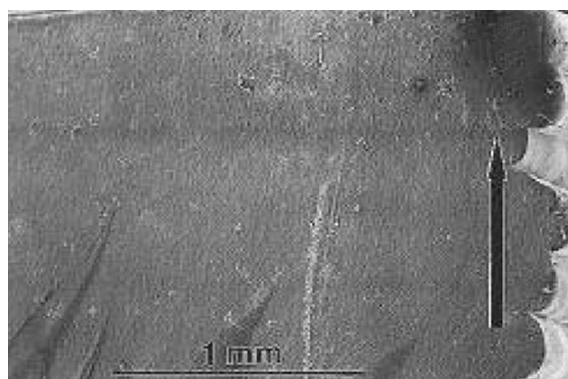
Es-Said و همکاران [۲۸] بر این عقیده هستند که مسیر رشد ترک با پیوند میان رشته‌ها و تخلخل بین‌لایه‌ای کنترل‌شدنی است. در حقیقت، مناطق ضعیف منشأ شروع ترک هستند و با کنترل دو عامل پیوند و تخلخل می‌توان رشد ترک را محدودتر کرد. تنش‌های باقی‌مانده هنگام انجام مواد مذاب، موجب جمع‌شدگی حجمی و ایجاد پیوند ضعیف میان لایه‌ها می‌شوند و از تحمل رشته‌ها هنگام بارگذاری می‌کاهند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، قطعات ساخته شده با روش FDM مطالعه شد و اثر زاویه و فاصله هم‌نشینی رشته‌ها در هر لایه و نیز جهت‌گیری مدل در زمان ساخت بر خواص مکانیکی بررسی شد. همچنین، در زمینه ایرادهای احتمالی در قطعات تولید شده و دلایل ایجاد آن‌ها نیز مطالبی بیان شد. با توجه به حجم مقاله‌های منتشر شده در این زمینه، می‌توان دریافت که روش‌های تولید سریع مانند FDM، از اهمیت فراوانی در چرخه تولید برخوردارند و لزوم توجه و مطالعه بیشتر در این باره برای پژوهشگران کشور اجتناب‌ناپذیر است. مرور یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد، جهت‌گیری مدل در زمان ساخت از عوامل مؤثر در تعیین خواص مکانیکی قطعات



(الف)

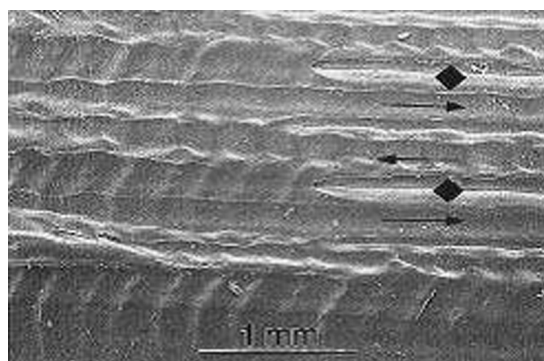


(ب)

شکل ۱۲- عدم وجود حفره با تنظیم فاصله هم‌نشینی رشته‌ها از جداره‌ها: (الف) نحوه تماس رشته‌ها و (ب) سطح مقطع نمونه. علامت پیکان جهت ساخت قطعه را نشان می‌دهد [۱۷].

لایه‌ها مربوط می‌شود. این مسئله می‌تواند به دلیل تنظیم نبودن سرعت حرکت، دمای نازل و حتی ایراد در رشته مصرفی به وجود آید. در شکل ۱۳ نمونه‌ای از ایجاد نقص‌های سطحی در قطعه‌ای با سطح زیر نشان داده شده است.

اثر زاویه رشته‌ها بر رفتار شکست نمونه‌ها نیز، به‌منظور تعیین ضعیف‌ترین مسیر رشد ترک در مدت آزمون کشش بررسی شده است [۲۸]. شکل ۱۴ مسیر شکست نمونه‌هایی را نشان



شکل ۱۳- قطعه تولید شده با سطح زیر [۱۷]

افزایش زاویه هم‌نشینی رشته‌ها از استحکام کششی و خمشی و مقاومت ضربه‌ای کاسته می‌شود.

است. از آنجا که با کاهش زاویه رشته‌ها نسبت به محور بارگذاری، مولکول‌ها بیشتر در راستای نیروی وارد شده قرار می‌گیرند، در این حالت استحکام قطعه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. بنابراین، با

مراجع

1. Li H., Taylor G., Bheemreddy V., Iyibilgin O., Leu M., and Chandrashekhara K., Modeling and Characterization of Fused Deposition Modeling Tooling for Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process, *Additive Manufact.*, **7**, 64-72, 2015.
2. Xu N., Ye X., Wei D., Zhong J., Chen Y., Xu G., and He D., 3D Artificial Bones for Bone Repair Prepared by Computed Tomography-Guided Fused Deposition Modeling for Bone Repair, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **6**, 14952-14963, 2014.
3. McCullough E.J. and Yadavalli V.K., Surface Modification of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS to Enable Rapid Prototyping of Biomedical Micro Devices, *J. Mater. Proc. Technol.*, **213**, 947-954, 2013.
4. Hwang S., Reyes E.I., Moon K.S., Rumpf R.C., and Kim N.S., Thermo-mechanical Characterization of Metal-Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process, *J. Electron. Mater.*, **44**, 771-777, 2015.
5. Choi J.W., Medina F., Kim C., Espalin D., Rodriguez D., Stucker B., and Wicker R., Development of a Mobile Fused Deposition Modeling System with Enhanced Manufacturing Flexibility, *J. Mater. Process. Technol.*, **211**, 424-432, 2011.
6. Prinz F.B., Atwood C.L., Aubin R.F., Beaman J.J., Brown R.L., Fussell P.S., Lightman A.J., Sachs E., Weiss L.E., and Wozney M.J., *JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan*, SME, USA, 21-31, 1997.
7. Swainson W.K., Method Medium and Apparatus for Producing Three Dimensional Figure Product, *US Pat. 4,041,476*, 1977.
8. Herbert A.J., Solid Object Generation, *J. Appl. Photogr. Eng.*, **8**, 185-188, 1982.
9. Pham D.T. and Dimov S.S., *Rapid Manufacturing*, Springer, London, 19-36, 2001.
10. Zamani J. and Partovipoor H., *Rapid Prototyping Method in Mechanical Engineering (persian)*, Khaje Nasir University, Tehran, 1-50, 2009.
11. Fused Deposition Modelling, <http://www.stratasys.com>, available in 21st September, 2015.
12. Van-Noort R. The Future of Dental Devices is Digital, *Dent. Mater.*, **28**, 3-12, 2012.
13. Khalilpoor S. and Khanjani A., *Rapid Prototyping Methods with CAD/CAM, (Persian)*, Naghoos Andishe, Tehran, 25-70, 2006.
14. Gibson I., Rosen D.W., and Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York, 143-173, 2010.
15. El-Gizawy A.S., Cardona J., and Graybill B., An Integrated Approach for Characterization of Properties and Meso-Structure of Fused Deposition Modeling ULTEM 9085 Products, *International SAMPE Symposium and Exhibition*, Covina, CA, USA, 2010.
16. Rodriguez J.F., Thomas J.P., and Renaud J.E., Mechanical Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene Fused Deposition Materials: Experimental Investigation, *Rapid Prototyping J.*, **7**, 148-158, 2001.
17. Agarwala M.K., Jamalabad V.R., Langrana N.A., Safari A., Whalen P.J., and Danforth S.C., Structural Quality of Parts Processed by Fused Deposition, *Rapid Prototyping J.*, **2**, 4-19, 1996.
18. Montero M., Roundy S., Odell D., Ahn S., and Wright P., Material Characterization of Fused Deposition Modeling ABS by Designed Experiments, *Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing Conference*, Cincinnati, OH, USA, 2001.
19. Bertoldi M., Yardimci M.A., Pistor C.M., Guceri S.I., and Sala G., Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition, *Proceeding of 9th Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas at Austin, USA, 1998.
20. Rodriguez J.F., Thomas J.P., and Renaud J.E., Design of Fused-Deposition ABS Components for Stiffness and Strength, *J. Mech. Design*, **125**, 545-551, 2003.
21. Sood A.K., Ohdar R.K., and Mahapatra S.S., Parametric Appraisal of Fused Deposition Modeling Process Using the Grey Taguchi Method, *P. I. Mech. Eng. B-J. Eng.*, **224**, 135-145,

- 2010.
22. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., and Wright P.K., Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS, *Rapid Prototyping J.*, **8**, 248–257, 2002.
23. Anitha R., Arunachalam S., and Radhakrishnan P., Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling, *J. Mater. Proc. Technol.*, **118**, 385-388, 2001.
24. Abu-Bakar N.S., Alkahari M.R., and Boejang H., Analysis on Fused Deposition Modelling Performance, *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, **11**, 972-977, 2010.
25. Fodran E., Koch M., and Menon U., Mechanical and Dimensional Characteristics of Fused Deposition Modeling Build Styles, *7th SFF Symposium Proceeding*, Austin, TX, USA, 1996.
26. Lee B.H., Abdullah J., and Khan Z.A., Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object, *J. Mater. Process. Technol.*, **169**, 54–61, 2005.
27. Too M.H., Leong K.F., Chua C.K., Du Z.H., Yang S.F., Cheah C.M., and Ho S.L., Investigation of 3D Non-Random Porous Structures by Fused Deposition Modelling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **19**, 217–223, 2002.
28. Es-Said O.S., Foyos J., Noorani R., Mendelson M., Marloth R., and Pregger B.A., Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples, *Mater. Manuf. Process.*, **15**, 107-122, 2000.
29. Rosas L.F.V., *Characterization of Parametric Internal Structures for Components Built by Fused Deposition Modeling*, M.Sc. Thesis, University of Windsor, Canada, 2013.