

Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Tensile Properties and Printing Quality of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites

Zahra Soheilpour¹, Amir Masood Rezadoust^{*1}, Mohammad Razavi-Nouri^{1*}, Keyvan Garoosi², and Seyed Reza Ghaffarian²

1. Additive Manufacturing Laboratory, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

2. Department of Polymer Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box 15875-4413, Tehran, Iran

Received: 15 October 2019, accepted: 9 February 2020

ABSTRACT

Hypothesis: Due to the nature of a fused deposition modeling (FDM), by which the parts are fabricated layer by layer, many defects are prone to occur during printing of the products. Therefore, a few efficient solutions are required to minimize the defects and other shortcomings. The increase in the physical and mechanical properties of the fabricated parts using nanoparticles seems to be one of the methods.

Methods: To improve the mechanical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), which is one of the most common materials employed in FDM technique, various amounts (1, 3 and 5 wt%) of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were added to the matrix through a melt mixing process. The filaments containing different MWCNTs contents, required for fabricating of the samples, were then prepared by extrusion. Next, the samples were printed with the layer thicknesses of 0.05, 0.1 and 0.2 mm and raster angles of +45/-45° and 0/90°. Several experiments such as the tensile and rheological tests as well as scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) observations were carried out to examine the nanocomposite samples.

Finding: The SEM and TEM studies revealed that the nanoparticles were reasonably well dispersed throughout the matrix. The results of the tensile tests indicated that by addition of MWCNTs, the tensile strength and Young's modulus were increased by 21% and 103%, respectively, in comparison to those of the pristine material. It was also found that at a constant layer thickness, the maximum value of the tensile strength was obtained for the nanocomposite containing 3 wt% MWCNTs, however, the modulus progressively increased with the increase of the nanoparticles content. In addition, the change in raster angle showed no significant effect on the tensile properties, and the increasing of the layer thickness had an adverse effect on the properties for all the materials examined.

Keywords:

3D printing,
fused deposition modeling,
nanocomposite,
acrylonitrile-butadiene-styrene,
mechanical properties

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: a.rezadoust@ippi.ac.ir

m.razavi@ippi.ac.ir

Please cite this article using:

Soheilpour Z., Rezadoust A.M., Razavi-Nouri M., Garoosi K., and Ghaffarian S.R., Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Tensile Properties and Printing Quality of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 32, 497-507, 2020.

اثر نانولوله‌های کربن چنددیواره بر خواص کششی و کیفیت چاپ نانوکامپوزیت‌های آکریلونیتریل-بوتادیان-استیرین چاپ شده سه بعدی

قابل دسترس در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و دوم، شماره ۶،

صفحه ۵۰۷-۴۹۷، ۱۳۹۸

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2020.1705

زهرا سهیل پور^۱، امیرمسعود رضادوست^{۱*}، محمد رضوی نوری^{۱*}، کیوان گروسی^۲، سید رضا غفاریان^۲

۱- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، آزمایشگاه ساخت برهم‌افزا، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰

چکیده

فرضیه: به دلیل ماهیت مدل‌سازی لایه‌نشانی همجوش (FDM) که در آن قطعه‌ها به شکل لایه‌لایه ساخته می‌شوند، محصولات حین فرایند چاپ مستعد نقص‌های بسیاری هستند. بنابراین، برای به حداقل رساندن نقص‌ها و سایر کاستی‌ها به راه‌حل‌های کارآمدی نیاز است. افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه‌های ساخته‌شده با استفاده از نانوذرات یکی از این روش‌هاست. **روش‌ها:** به منظور بهبود خواص مکانیکی آکریلونیتریل-بوتادیان-استیرین (ABS) که یکی از مرسوم‌ترین مواد به کار گرفته شده در روش FDM است، مقدارهای مختلف (۱، ۳ و ۵٪ وزنی) نانولوله‌های کربن چنددیواره (MWCNTs) با روش اختلاط مذاب به ماترس پلیمر افزوده شد. سپس، رشته‌های دارای مقادیر مختلف MWCNTs لازم برای ساخت نمونه‌ها، با روش اکستروژن تهیه شدند. پس از آن، نمونه‌ها با سه ضخامت لایه مختلف ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ mm و دو زاویه رشته‌نشانی ۰/۹۰ و ۴۵°/-۴۵° چاپ شدند. آزمون‌های مختلف کشش، رئولوژی، میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) و عبوری (TEM) برای بررسی نمونه‌های نانوکامپوزیتی انجام شد. **یافته‌ها:** مطالعات SEM و TEM نشان داد، نانوذرات به شکل مناسبی درون ماتریس پراکنده شدند. نتایج آزمون کشش نشان داد، استحکام کششی و مدول یانگ در اثر افزودن MWCNTs به ترتیب تا ۲۱ و ۱۰۳٪ در مقایسه با ماده اولیه افزایش یافته است. همچنین مشخص شد، در ضخامت لایه ثابت، بیشینه استحکام کششی برای نانوکامپوزیت دارای ۳٪ وزنی MWCNTs به دست آمد، اما با افزایش مقدار نانوذرات، مدول به تدریج افزایش یافت. افزون بر این، تغییر در زاویه رشته‌نشانی اثر معنی‌داری بر خواص کششی نشان نداد و نیز افزایش ضخامت لایه اثر منفی بر خواص تمام مواد بررسی شده داشت.

واژه‌های کلیدی

چاپ سه بعدی،
مدل‌سازی لایه‌نشانی همجوش،
نانوکامپوزیت،
آکریلونیتریل-بوتادیان-استیرین،
خواص مکانیکی

* مسئولان مکاتبات، پیام‌نگار:

a.rezadoust@ippi.ac.ir, m.razavi@ippi.ac.ir

مقدمه

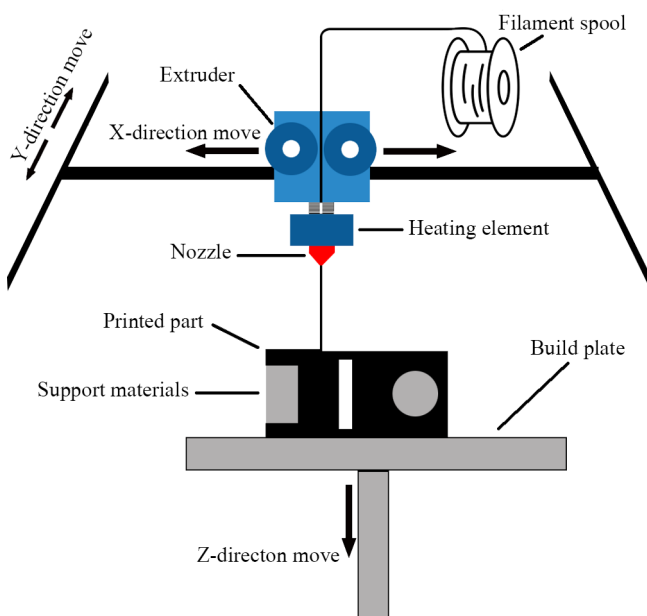
در عصر حاضر با توجه به پیشرفت فناوری، کوتاه کردن زمان چرخه تولید نقش کلیدی در رشد و پیشرفت صنایع ایفا می‌کند. بنابراین، توسعه فناوری‌های نوین ساخت نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در اقتصاد جهان دارد. از جمله این فناوری‌های در حال توسعه، می‌توان به روش‌های نمونه‌سازی سریع (rapid prototyping, RP) اشاره کرد [۱، ۲]. در این روش‌ها، ابتدا مدل رایانه‌ای قطعه مدنظر طراحی شده و سپس این مدل به کمک نرم‌افزارهای چاپ سه‌بعدی به لایه‌های دوبعدی تبدیل می‌شود. آنگاه قطعه مدنظر از راه چاپ هر لایه به‌طور مجزا و افزودن لایه‌های متعدد روی یکدیگر ساخته می‌شود. این نوع فناوری‌ها به دلیل افزودن لایه‌ها روی هم به ساخت برهم‌افزا (additive manufacturing) نیز معروف هستند [۳]. مدل‌سازی لایه‌نشانی همجوش (fused deposition modeling, FDM) از محبوب‌ترین فناوری‌های ساخت برهم‌افزا برای کاربردهای مختلف مهندسی است که در اوایل دهه ۹۰ میلادی توسط شرکت Stratasys آمریکا معرفی شده است.

شکل ۱ نحوه عملکرد این فرایند را نشان می‌دهد. در این روش رشته‌ای (filament) پلیمری با قطر معین، از درون نازل داغ عبور داده می‌شود و مذاب خروجی با حرکت در صفحه XY، در محل‌ها و مسیرهایی از پیش تعیین‌شده روی صفحه چاپ نشانده می‌شود. حرکت نازل در دو راستای افقی X و Y سبب ایجاد لایه‌ای دوبعدی می‌شود و حرکت صفحه چاپ در راستای محور Z و تکرار لایه‌نشانی، ضخامت نهایی قطعه را فراهم می‌سازد [۴-۷].

پلی‌لاکتیک اسید (PLA) و آکریلونیتریل-بوتادی-ان-استیرن (ABS) از رایج‌ترین مواد مصرفی در فناوری FDM به‌شمار می‌آیند که به دلایل اقتصادی و خواص مطلوب، جایگاه مهمی را در این فناوری به خود اختصاص داده است. یکی از چالش‌های این فرایند، خواص ضعیف‌تر قطعه‌های ساخته‌شده با این روش نسبت به سایر روش‌های مرسوم است. بنابراین، برای رفع این نقص لازم است تا کیفیت مواد مصرفی بهبود یافته و قابلیت‌های این فناوری افزایش یابد. از جمله راهکارهایی که در سال‌های اخیر برای بهبود خواص مواد پلیمری استفاده می‌شود، افزودن نانوذراتی مانند خاک‌کرس، نانولوله‌های کربن چنددیواره (MWCNTs) و تک‌دیواره (SWCNTs) و گرافن به پلیمرها و تهیه نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. خواص ویژه و منحصر به فرد نانولوله‌های کربن از جمله مدول یانگ زیاد و استحکام کششی خوب آن‌ها از یک طرف به همراه وزن ویژه نسبتاً کم، پایداری گرمایی مناسب و سهولت فرایند نانوکامپوزیت‌ها نسبت به فلزات از طرف دیگر، باعث شده تا در دهه گذشته پژوهش‌های

زیادی برای افزایش کارایی و گسترش کاربرد این مواد انجام شود. در فرایند چاپ سه‌بعدی، مطالعات گسترده‌ای برای بهینه‌سازی خواص قطعه‌های چاپ‌شده با مؤلفه‌های فرایندی مختلف مانند سرعت چاپ، دمای نازل، ضخامت لایه، الگوی پرکردن (infill pattern) و چگالی پرشدگی (infill density) انجام شده است.

Patanwala و همکاران [۸] نانوکامپوزیت‌های PLA/MWCNTs دارای مقادیر ۰/۵، ۲/۵ و ۵٪ وزنی از نانوپرکننده را تهیه و گزارش کردند، نانوکامپوزیت چاپ‌شده با روش FDM دارای ۵٪ وزنی MWCNTs نسبت به نمونه خالص، ۳۰٪ مدول بیشتری نشان داد. اما، استحکام کششی و چقرمگی آن کمتر از نمونه خالص بود. از چالش‌هایی که این پژوهشگران با آن روبه‌رو بودند، مسدود شدن نازل هنگام چاپ رشته‌های دارای مقادیر زیادی از تقویت‌کننده بود. این گروه برای رفع این مشکل، بزرگ‌تر کردن قطر نازل را پیشنهاد کردند. Dul و همکاران [۹] قطعه‌های چاپ‌شده‌ای از نانوکامپوزیت گرافن-ABS با مقادیر مختلف ۲، ۴ و ۸٪ وزنی از گرافن تهیه و اثر جهت چاپ را بر خواص مکانیکی این قطعه‌ها بررسی کردند. آن‌ها بر اساس نتایج آزمون شاخص جریان مذاب (MFI) مقدار ۴٪ وزنی گرافن را به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب و مشاهده کردند، با ازدیاد گرافن، استحکام کششی کمی کاهش ولی مدول کشسانی افزایش می‌یابد. آن‌ها کاهش استحکام را به چسبندگی ضعیف رشته‌های نانوکامپوزیتی نسبت دادند. این پژوهشگران از سطح شکست



شکل ۱- نمایی از فرایند مدل‌سازی لایه‌نشانی همجوش.

Fig. 1. A schematic representation of the fused deposition modeling process.

همچنین، جهش رسانندگی الکتریکی برای نمونه‌های چاپ‌شده با زاویه رشته‌نشانی $0/90^\circ$ در مقادیر ۱٪ تا ۳٪ و برای نمونه‌های 45° تا $45^\circ+$ در ۳٪ تا ۵٪ وزنی از نانولوله‌ها گزارش شد. Wang و Zhu [۱۴] نانوکامپوزیت ABS/MWCNTs را از اختلاط مذاب تهیه کرده و از رشته‌های اکستروژن‌شده آن برای چاپ استفاده کردند. آن‌ها، استحکام کششی و مدول کشسانی نانوکامپوزیت دارای ۸٪ وزنی MWCNTs را به ترتیب حدود ۳۳ و ۴۲٪ بیشتر از مقادیر به دست آمده برای رشته‌های ABS بدون پرکننده بود. در ضمن، با افزایش MWCNTs مقدار کرنش در شکست کاهش یافت. پژوهشگران عقیده دارند، روند تغییرات گفته شده بیانگر پخش خوب این نانوذرات در ماتریس پلیمری است که این مسئله تحرک زنجیرهای پلیمری را محدود می‌کند، در نتیجه سفتی را افزایش و کرنش در شکست را کاهش می‌دهد.

تاکنون در مطالعات انجام شده ارتباط میان خواص کششی و شکل‌شناسی قطعه‌های چاپ‌شده به کمک روش FDM با رفتار رئولوژی آمیخته‌های تهیه شده از نانوکامپوزیت‌های ABS/MWCNTs مانند تغییرات گرانی و رفتار کشسانی به روشنی بررسی نشده است. بنابراین، در این مقاله سعی شده است، این موضوع بیشتر مطالعه شده و اثر رفتار رئولوژیکی بر کاهش خواص کششی قطعه‌های چاپ‌شده در مقایسه با خواص رشته‌های اولیه نانوکامپوزیتی بیان شود. بدین منظور، ابتدا نانوکامپوزیت‌هایی از ABS دارای ۱، ۳ و ۵٪ وزنی MWCNTs با روش اختلاط مذاب تهیه و پس از تبدیل آن به رشته‌های چاپ‌پذیر، به کمک فرایند FDM با ضخامت لایه $0/05$ ، $0/1$ و $0/2$ mm و زاویه‌های رشته‌نشانی $0/90^\circ$ و 45° تا $45^\circ+$ ، نمونه‌هایی برای آزمون کشش تهیه و بررسی شدند. همچنین، رئومتر برای مطالعه رفتار جریان‌پذیری آمیخته‌ها و میکروسکوپ‌های الکترونی پویشی و عبوری به ترتیب برای ارزیابی سطح شکست نمونه‌ها و توزیع نانوذرات در ماتریس پلیمری به کار گرفته شدند.

تجربی

مواد

در این پژوهش، از نانولوله‌های کربن چنددیواره NC 7000 تهیه شده از شرکت Nanocyl بلژیک استفاده شد. قطر و طول میانگین نانولوله‌های نامبرده به ترتیب ۹/۵ و ۱۵۰۰ nm بود. ABS استفاده شده با کد تجاری ABS N70، چگالی $1/04 \text{ g/cm}^3$ و شاخص جریان مذاب 16 g/10min (دمای 235°C ، 10 kg) از پتروشیمی قائد بصیر ایران خریداری شد.

نمونه‌های چاپ‌شده پس از آزمون کشش، تصاویر SEM تهیه و مشاهده کردند، در نمونه‌های چاپ‌شده در جهت ستونی (Z)، با وجود هم‌پوشانی رشته‌ها، به دلیل کوتاه‌تر بودن مسیر چاپ، شکست ترد رخ داده است. همچنین، درون نمونه‌های چاپ‌شده در جهت‌های افقی (X) و عمودی (Y)، نقص‌هایی میان رشته‌ها شکل می‌گیرد که مانع جوش خوردگی کامل آن‌ها به یکدیگر می‌شود. اما، در نمونه‌های چاپ‌شده در جهت Z، به دلیل کوتاه‌تر شدن مسافت رفت و برگشت نازل، رشته‌ها در دمای بیشتری قرار دارند که به دمای T_g پلیمر نزدیک‌تر است، از این رو، اتصال مناسبی میان رشته‌ها برقرار می‌شود. Dorigato و همکاران [۱۰] خواص مکانیکی نانوکامپوزیت چاپ‌شده ABS/MWCNTs را در شرایط چاپ مختلف، با خواص قطعه‌های قالب‌گیری شده با روش فشاری مقایسه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد، بیشترین افزایش استحکام کششی و مدول کشسانی در اثر افزودن MWCNTs برای قطعه‌های قالب‌گیری شده در فشار، به ترتیب ۱۵ و ۳۵٪ برای قطعه‌های چاپ‌شده ۱۳ و ۲۳٪ بود. Christ و همکاران [۱۱] نانوکامپوزیت TPU/MWCNTs را تهیه و شکل‌شناسی و خواص مکانیکی قطعه‌های چاپ‌شده از آن را با رشته اکستروژن‌شده اولیه مقایسه کردند. مطالعه رفتار تنش-کرنش نشان داد، با وجود افزایش استحکام در اثر افزودن این نانوذرات، به طور کلی استحکام قطعه‌های چاپ‌شده کمتر از استحکام رشته‌های اکستروژن‌شده است. این کاهش استحکام به شرایط چاپ، حفره‌ها و نیز پیوندهای ضعیف بین‌لایه‌ای نسبت داده شد.

Cholleti و Gibson [۱۲]، ۱۵٪ وزنی MWCNTs پخش شده در حلال را با روش مذاب با ABS مخلوط و از آن رشته‌هایی تهیه کردند. همچنین، آن‌ها برای بهبود خواص قطعه‌هایی که چاپ می‌شوند، روی رشته‌های حاصل از مرحله قبل، پوششی از نانولوله افشان کرده و نتایج را با خواص کششی ABS بدون پرکننده مقایسه کردند. این پژوهشگران گزارش کردند، برای قطعه‌های تهیه شده از رشته‌های نانوکامپوزیتی بدون پوشش و رشته‌های پوشش‌یافته، استحکام کششی به ترتیب ۲۵/۵ و ۵۱٪ و مدول کششی ۹ و ۲۰٪ افزایش یافت. نتایج این گروه نشان داد، استحکام ضربه‌ای برای رشته‌های پوشش‌یافته بیش از ۳۰٪ افزایش یافته است.

Eren و Sezer [۱۳] مقادیر ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰٪ وزنی MWCNTs را به ABS اضافه کرده و با فرایند FDM نمونه‌هایی در دو زاویه رشته‌نشانی $0/90^\circ$ و 45° تا $45^\circ+$ تهیه کردند. آن‌ها ضمن اینکه استحکام کششی قطعه‌های چاپ‌شده در جهت‌های $0/90^\circ$ را بیشتر گزارش کردند، حداکثر افزایش استحکام را به مقدار ۲۸/۸٪ برای نانوکامپوزیت دارای مقدار ۷٪ از این نانوذرات به دست آوردند.

دستگاه‌ها

در این پژوهش، از مخلوط‌کن داخلی Plasti-Corder Lab-Station ساخت شرکت Brabender آلمان، چاپگر سه‌بعدی Sizan 2، ساخت شرکت سیزان پردازش کویر ایران و دستگاه Universal Testing Machine با نام تجاری STM-20 ساخت شرکت سنتام ایران استفاده شد. همچنین، میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) نوع VEGA ساخت شرکت Tescan جمهوری چک، تجهیزات فرآنازک‌بر سرد ساخت شرکت Leica Microsystems و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل Zeiss-EM10C-100KV، هر دو ساخت آلمان و رنومتر با نام تجاری MCR501 ساخت شرکت Anton-Paar اتریش به‌کار گرفته شدند.

روش‌ها

تهیه رشته‌های نانوکامپوزیتی

پیش از اختلاط، MWCNTs و ABS به‌منظور رطوبت‌زدایی به‌مدت ۱۲ h درون گرم‌خانه با دمای 80°C قرار گرفتند. سپس، برای تهیه آمیخته غلیظ‌شده ۵٪ وزنی از نانوذرات در ABS، مقادیر لازم از مواد نامبرده درون مخلوط‌کن داخلی با دمای 180°C و سرعت ۶۰ rpm مخلوط شدند. برای این کار، ابتدا به‌مدت ۳ min ABS درون مخلوط‌کن داخلی نرم و سپس به‌تدریج نانوذرات به آن اضافه شد و ۹ min با ماتریس پلیمری مخلوط شد. آنگاه، آمیخته به‌دست‌آمده در این مرحله به‌وسیله خردکن به ریزدانه تبدیل شد. برای تهیه رشته‌های نانوکامپوزیتی با ۱، ۳ و ۵٪ وزنی از نانوپرکننده، مقادیر لازم از آمیخته غلیظ‌شده به همراه ABS خالص درون اکسترودر دوپیچی ناهمسوگرد با سرعت پیچ ۷ rpm به رشته‌هایی با قطر تقریبی ۱/۶ mm تا ۲ mm درآمده و دوباره در دانه‌ساز، به ریزدانه تبدیل شدند. این دانه‌ها، با استفاده از اکسترودر تک‌پیچی Betol (انگلستان) با نسبت طول به قطر ۱۲ به رشته‌هایی با قطر $1/75 \pm 0/05$ mm تبدیل شدند که برای چاپ سه‌بعدی مناسب بود. در این مقاله، نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای ۰٪ تا ۵٪ وزنی از نانوذرات به‌ترتیب به‌شکل ABS0٪، ABS۱٪، ABS۳٪، و ABS۵٪ نام گذاری شدند.

نمونه‌سازی با روش چاپ سه‌بعدی

نمونه‌های آزمون کشش بر اساس استاندارد ISO 527-5A طراحی و با چاپگر Sizan 2 تهیه شدند. نمونه‌ها با سه ضخامت لایه ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۲ mm و زاویه‌های رشته‌نشانی $0/90^{\circ}$ و $45^{\circ}/-45^{\circ}$ در صفحه XYZ چاپ شدند. سایر شرایط چاپ نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است.

آزمون‌ها

نمونه‌های آزمون با ضخامت ۲ mm، عرض ۴/۵ mm و طول سنجش ۲۵ mm بودند و با سرعت ۵ mm/min کشیده شدند. حداقل ۶ نمونه برای هر ترکیب درصد مورد آزمون قرار گرفت و مقادیر میانگین و انحراف معیار محاسبه شد. همچنین برای مقایسه نتایج، رشته‌های نانوکامپوزیتی نیز در آزمون کشش قرار گرفتند. رفتار جریان‌پذیری تمام نمونه‌های نانوکامپوزیتی تهیه‌شده با رنومتر نوسانی بررسی شد. ابتدا، این آزمون با استفاده از روش صفحه‌های موازی با قطر ۲۵ mm و فاصله میان صفحه‌ها ۱ mm برای تعیین ناحیه گرانروکشسان خطی نمونه‌ها در بازه کرنش ۰/۰۱٪ تا ۱۰۰٪، بسامد ۱ Hz، دمای 210°C و زیر جو نیتروژن انجام شد. آنگاه آزمون رویش زمان به‌مدت ۲/۵ h در کرنش ۰/۲٪ و بسامد ۱ Hz، در شرایط گفته‌شده انجام شد تا پایداری نمونه‌ها با زمان بررسی شود. سپس، تمام نمونه‌ها با رویش بسامد در بازه ۰/۰۱ Hz تا ۱۰۰ Hz و در کرنش ثابت ۰/۲٪، دمای 210°C و زیر جو نیتروژن بررسی شدند. برای مطالعه شکل‌شناسی سطح شکست و بررسی توزیع نانولوله‌های کربن درون ماتریس ABS، به‌ترتیب از سطح شکست ناشی از کشش نمونه‌ها و از مقطع رشته‌های نانوکامپوزیتی که در محیط نیتروژن مایع شکسته‌شده بودند، به‌وسیله SEM تصاویری تهیه شد. پیش از تصویربرداری برای افزایش رسانندگی، نمونه‌ها با لایه نازکی از طلا پوشش یافتند. برای تهیه تصاویر TEM مناسب، ابتدا از نمونه مدنظر لایه‌هایی با ضخامت ۸۰ nm به‌وسیله تجهیزات فرآنازک‌بر سرد بریده شده و سپس این لایه‌ها با دستگاه TEM بررسی شدند.

جدول ۱- تنظیمات چاپگر برای نمونه‌های آزمون کشش.

Table 1. The printer settings for the tensile test specimens.

Printing parameter	Value
Nozzle diameter (mm)	0.5
Filament diameter (mm)	1.75±0.1
Number of contours	2
Filament overlap (mm)	0.06
Infill density (%)	100
Layer thickness (mm)	0.05, 0.1, 0.2
Print speed (mm/min)	2400
Nozzle temperature (°C)	233±2
Bed temperature (°C)	103±2

نتایج و بحث

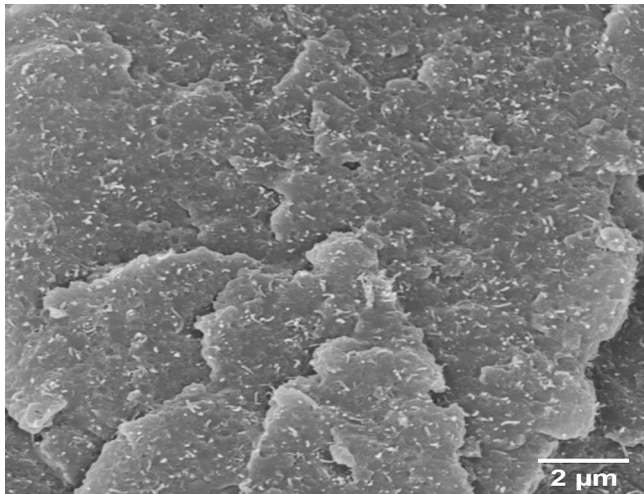
شناسایی نانوکامپوزیت

شکل ۲ تصویر TEM از مقطع موازی با جهت چاپ را برای نمونه چاپ‌شده دارای ۳٪ وزنی پرکننده نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، نانوذرات به‌خوبی در ماتریس پلیمری توزیع و پراکنده شدند. برای بررسی چگونگی توزیع و پراکنش این نانوذرات درون ماتریس پلیمری در ابعاد بزرگ‌تر، از نمونه نامبرده تصاویر SEM گرفته شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج SEM در توافق با نتایج TEM بود و تجمعی با ابعاد میکرونی دیده نشد.

آزمون کشش

برای بررسی اثر شکل قطعه چاپ‌شده بر نتایج آزمون کشش، دو قطعه دمبل و مستطیل شکل از ABS0٪ تهیه شد. نمودار تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمون کشش برای این دو نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج، تفاوت چشمگیری میان استحکام این دو نوع نمونه دیده نشد و استحکام کششی قطعه مستطیل شکل فقط حدود ۵٪ بیشتر از قطعه دمبل شکل بود. بنابراین، به‌دلیل رایج‌تر بودن نمونه‌های دمبل‌شکل در آزمون کشش پلاستیک‌ها، از این نمونه‌ها برای انجام آزمون کشش استفاده شد.

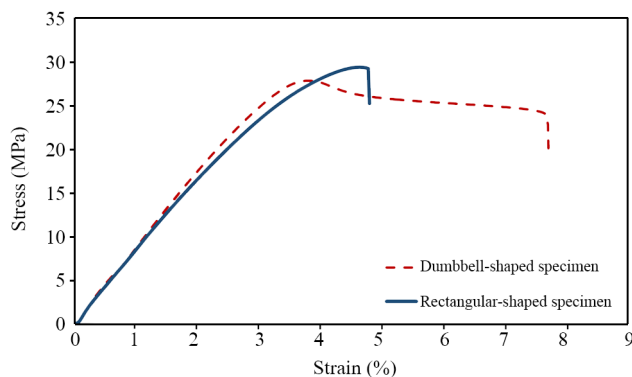
نتایج استحکام کششی و مدول کشسانی قطعه‌های دمبل‌شکل چاپ‌شده با دو زاویه رشته‌نشانی، سه ضخامت لایه و چهار ترکیب درصد مختلف از نانوذرات در شکل ۵ نشان داده شده است. به‌طور



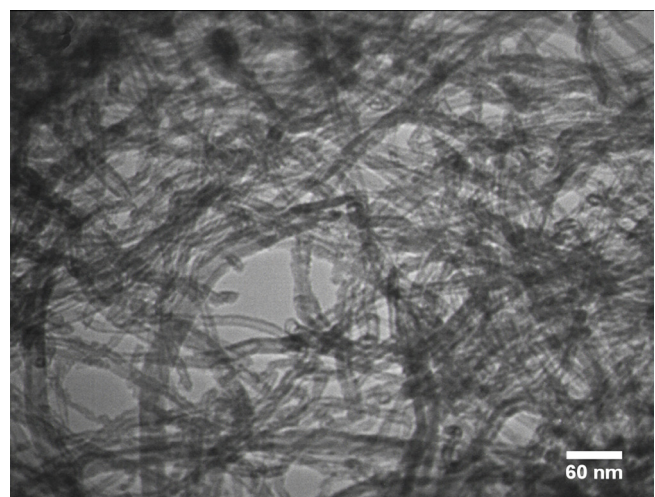
شکل ۳- تصویر SEM از سطح شکست رشته نانوکامپوزیت دارای ۳٪ وزنی MWCNTs.

Fig. 3. SEM image of the fracture surfaces of nanocomposite filament containing 3 wt% MWCNTs.

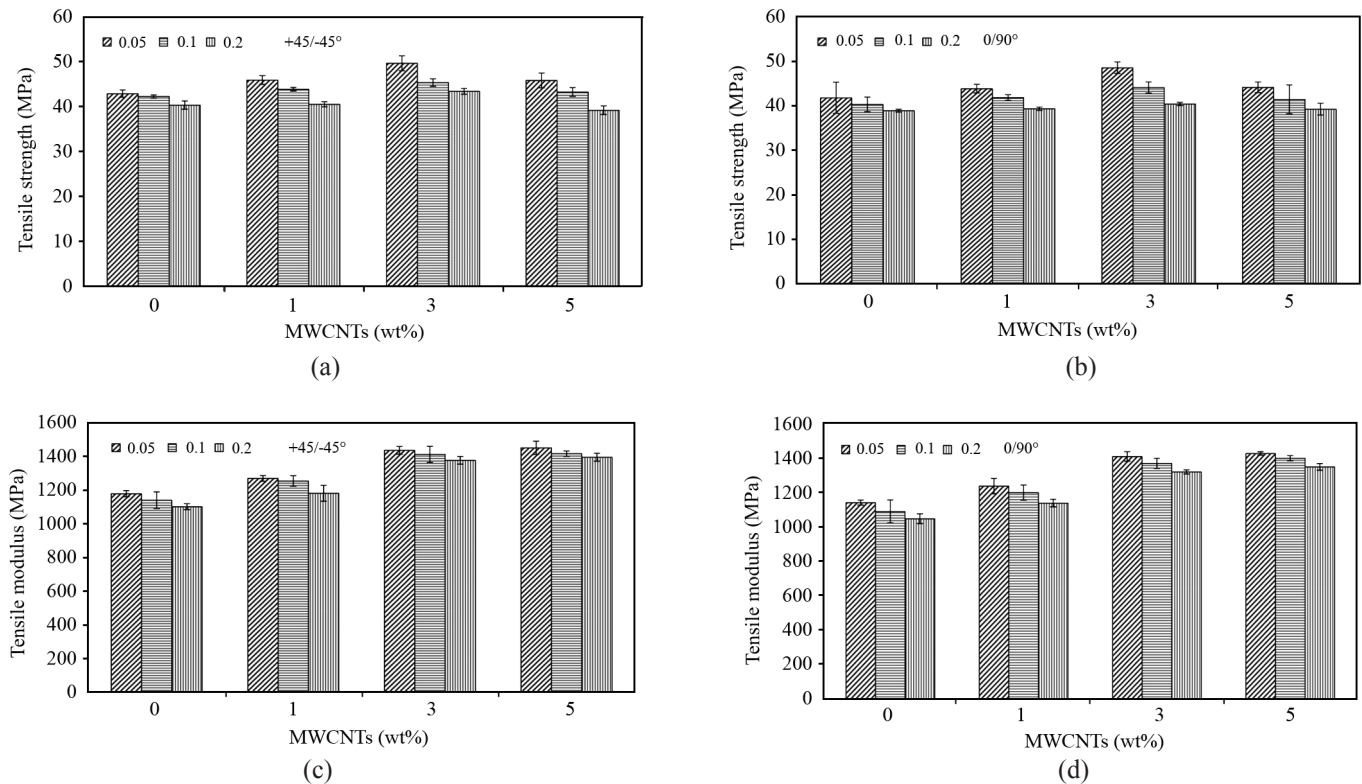
کلی، استحکام و مدول کششی به عوامل مختلفی نظیر نحوه اختلاط آمیخته، نوع مواد مصرفی، روش آمیخته‌سازی، قطر نازل چاپگر، سرعت چاپ و حتی قابلیت‌های دستگاه چاپ سه‌بعدی بستگی دارد [۱۵-۱۸]. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در تمام حالت‌های بررسی‌شده، افزایش ضخامت لایه موجب کاهش استحکام کششی و مدول کشسانی شده و مدول نیز با ازدیاد مقدار نانولوله‌های کربن زیاد شده است. هر چند که این افزایش مدول، برای مقدار ۵٪ نسبت به ۳٪ وزنی از نانوذرات قابل ملاحظه نیست. اما استحکام کششی برای قطعه دارای ۵٪ وزنی از نانوذرات کمتر از نمونه‌ای بود که با نانوکامپوزیت دارای ۳٪ وزنی از این پرکننده ساخته شده بود. برای تفسیر این تغییرات نیاز



شکل ۴- منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های دمبل و مستطیل شکل.
Fig. 4. Tensile stress-strain curves of the dumbbell- and rectangular-shaped specimens.



شکل ۲- تصویر TEM از نانوکامپوزیت دارای ۳٪ وزنی MWCNTs.
Fig. 2. TEM image of the nanocomposite containing 3 wt% MWCNTs.



شکل ۵- مقادیر استحکام کششی و مدول کشسانی برای نمونه‌های چاپ‌شده با ضخامت‌های لایه و زاویه‌های رشته‌نشانی مختلف.

Fig. 5. The values of tensile strength and elastic modulus for the specimens printed with different layer thicknesses and raster angles.

پلیمری اطلاعاتی در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد. تغییرات مدول ذخیره با بسامد برای مواد مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود، با افزودن نانولوله‌های کربن به ABS، مدول ذخیره به تدریج افزایش یافته و شیب منحنی‌ها در بسامدهای کم، با افزایش درصد نانوذرات، کاهش یافته است. کاهش شیب و مسطح شدن منحنی مدول ذخیره در بسامدهای کم معیاری از درجه پراکنش نانوذرات و تشکیل شبکه به وسیله آن‌هاست [۱۷]. این شبکه در اثر برهم‌کنش نانوذرات با یکدیگر و درگیری نانوذرات با زنجیرهای پلیمری و حبس این زنجیرها میان نانولوله‌های کربن تشکیل می‌شود [۱۴، ۱۹، ۲۰]. همچنین، اگر چه زنجیرهای پلیمری در بسامدهای کم رفتار شبه سیال نشان می‌دهند، مشاهده کاهش وابستگی مدول به بسامد، ناشی از خاصیت کشسانی شبکه تشکیل شده است. از سوی دیگر، شکل ۶ نشان می‌دهد، در اثر افزایش مقدار MWCNTs، ناحیه مسطح مدول ذخیره در بسامدهای کم طولانی‌تر می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که برهم‌کنش ذرات تقویت‌کننده با یکدیگر و با زنجیرهای پلیمری بیشتر شده، در نتیجه شبکه حاصل از آن فراگیرتر می‌شود [۲۱، ۲۲]. با توجه به کاهش تدریجی شیب منحنی مدول ذخیره با افزایش MWCNTs و مسطح شدن آن در بسامدهای کمتر

بود، بررسی‌های بیشتری انجام شود و اثر متغیرهای حاصل از چاپ از متغیرهای مربوط به نانوکامپوزیت جدا شود. بنابراین، آزمون کشش برای رشته‌های نانوکامپوزیتی اولیه در شرایط یکسان با نمونه‌های چاپ‌شده انجام شد. نتایج این آزمون در جدول ۲ آمده است. دیده می‌شود، استحکام کششی و مدول کشسانی در اثر افزودن MWCNTs به تدریج افزایش یافت. این بدان معناست که افزودن نانولوله‌های کربن حتی در بیشترین مقدار MWCNTs به کار رفته، اثر مثبتی بر افزایش خواص مکانیکی دارد و کاهش مقادیر مدول و استحکام در نمونه‌های چاپ‌شده، ناشی از خصوصیات فرایند چاپ است [۹]. با توجه به تفاوت نتایج آزمون کشش رشته‌ها و قطعه‌های چاپ‌شده، لازم بود پیش از بررسی بیشتر، خواص رئولوژیکی و شکل‌شناسی سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش مطالعه شده تا تحلیل دقیق‌تری در این زمینه ارائه شود.

آزمون رئولوژی

بررسی رئولوژیکی مواد در حالت مذاب به‌ویژه در بسامدهای کم روش ارزشمندی برای بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت‌های پلیمری است. زیرا نتایج این آزمون از چگونگی پراکنش نانوذرات در ماتریس

SEM بررسی شد که تصاویر آن در شکل ۷ نشان داده شده است. باید یادآور شد، به دلیل ماهیت روش FDM، یعنی چاپ قطعه با نشانیدن رشته‌ها کنار و روی یکدیگر، همواره در قطعه‌های چاپ شده حفره به وجود می‌آید [۱۰]. شکل ۷ نشان می‌دهد، با افزودن نانوذرات MWCNTs به ABS، اندازه حفره‌های بین‌لایه‌ای افزایش و مقدار چسبندگی و درهم فرو رفتگی رشته‌ها به تدریج ضعیف‌تر می‌شود. یعنی وجود نانولوله‌های کربن موجب افزایش گرانروی نمونه‌ها می‌شود. برای مثال، مقدار گرانروی مختلط در بسامد 0.2 s^{-1} برای ABS0%، ABS1%، ABS3% و ABS5% به ترتیب برابر $30,600$ ، $302,000$ ، $2,110,000$ و $5,560,000 \text{ Pa.s}$ به دست آمد.

در ضمن، محل تلاقی مدول ذخیره و مدول اتلاف که نشانگر گستره بسامدی است که ماده به حالت شبه‌مایع و شبه جامد عمل می‌کند، نشان داد، این نقطه تلاقی برای ABS0% حدود 33 s^{-1} و برای ABS1% برابر $5/84 \text{ s}^{-1}$ است. اما، محل برخورد برای دو نمونه دارای بیش از ۱٪ وزنی از پرکننده در محدوده بسامد انتخاب شده قرار ندارد و به پایین‌تر از کمترین بسامد بررسی شده منتقل می‌شود. در نتیجه، این دو ماده در تمام گستره بسامد شبه‌جامد عمل می‌کنند و زمان آسودگی به تدریج با افزایش MWCNTs طولانی‌تر می‌شود. بنابراین، وقتی لایه جدید روی لایه قبلی می‌نشیند، حرکت زنجیرها برای نفوذ از یک لایه به لایه دیگر به سختی انجام شده و در نتیجه چسبندگی بین‌لایه‌ای ضعیف‌تر می‌شود [۱۴]. این افزایش گرانروی جریان‌پذیری و تغییر شکل رشته چاپ شده را کمتر می‌کند. به طوری که سطح مقطع رشته از شبه‌دوزنقه به شبه‌نیم‌دایره تبدیل شده و در نتیجه ابعاد حفره بزرگ‌تر می‌شود. بررسی هم‌زمان نتایج کشش و میکروسکوپی نشان داد، با افزایش ۱٪ وزنی MWCNTs به ABS نسبت به پلیمر بدون پرکننده، درهم فرو رفتگی و در پی آن چسبندگی لایه‌ها به یکدیگر تغییر چندانی نمی‌کند. اما، با افزودن نانوذرات بیشتر تا ۵٪ وزنی اندازه حفره‌ها زیادتر شده که این موضوع به تدریج به خنثی شدن اثر تقویت‌کنندگی نانوذرات منجر می‌شود. نتایج نشان داد، نمونه چاپ شده با ABS3% بیشترین مقدار استحکام کششی را دارد. اما، با اضافه کردن ۵٪ وزنی نانوذرات اثر نقص‌ها و تمرکز تنش به حدی افزایش می‌یابد که استحکام قطعه از نمونه چاپ شده با ABS3% کمتر می‌شود. همچنین مطابق نتایج شکل ۷، تعداد حفره‌ها در زاویه رشته‌نشانی $0/90^\circ$ از $45^\circ - 45^\circ +$ بیشتر است. این مسئله را می‌توان ناشی از آن دانست که نازل برای چاپ رشته‌ها در زاویه رشته‌نشانی $45^\circ - 45^\circ +$ مسیر کوتاه‌تری را نسبت به $0/90^\circ$ طی می‌کند. از این رو، انتقال گرمای بهتری میان لایه‌ها رخ می‌دهد و مقدار نقص قطعه چاپ شده کم می‌شود [۹]. نتایج آزمون کشش نیز نشان داد، مقادیر

جدول ۲- نتایج آزمون کشش برای رشته‌های دارای مقادیر مختلف MWCNTs.

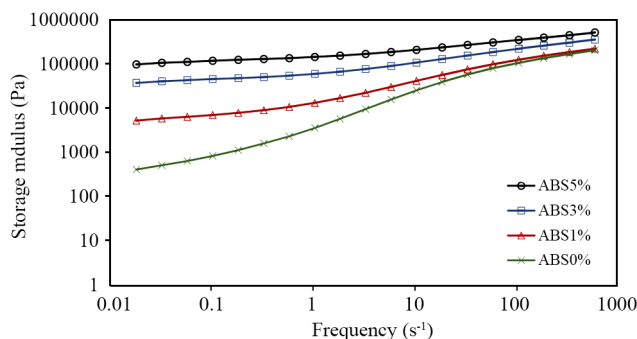
Table 2. The tensile test results for the filaments containing different amounts of MWCNTs.

Filament	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)
ABS0%	0.98±0.08	44.1±1.5
ABS1%	1.26±0.20	46.3±1.9
ABS3%	1.60±0.08	50.2±1.2
ABS5%	2.00±0.08	53.4±0.7

می‌توان دریافت، اختلاط در آمیخته‌سازی موفق بوده و نانولوله‌های کربن به خوبی در ماتریس ABS توزیع و پراکنده شده‌اند. در ادامه، با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی این موضوع بررسی و تأیید شده است. در ضمن، ABS پلیمری دوفازی با ذراتی از لاستیک پلی‌بوتادیان (PB) [۲۳، ۲۴] است که در آن این ذرات نقش گره یا اتصال در شبکه‌ای متشکل از زنجیرهای پلی‌استیرن-آکریلونیتریل را ایفا می‌کنند. از این رو، در بسامدهای کمتر که زنجیرها امکان آسودگی دارند، این شبکه رفتار شبه‌کشسان تقریباً مستقل از بسامد نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات این رفتار تشدید می‌شود.

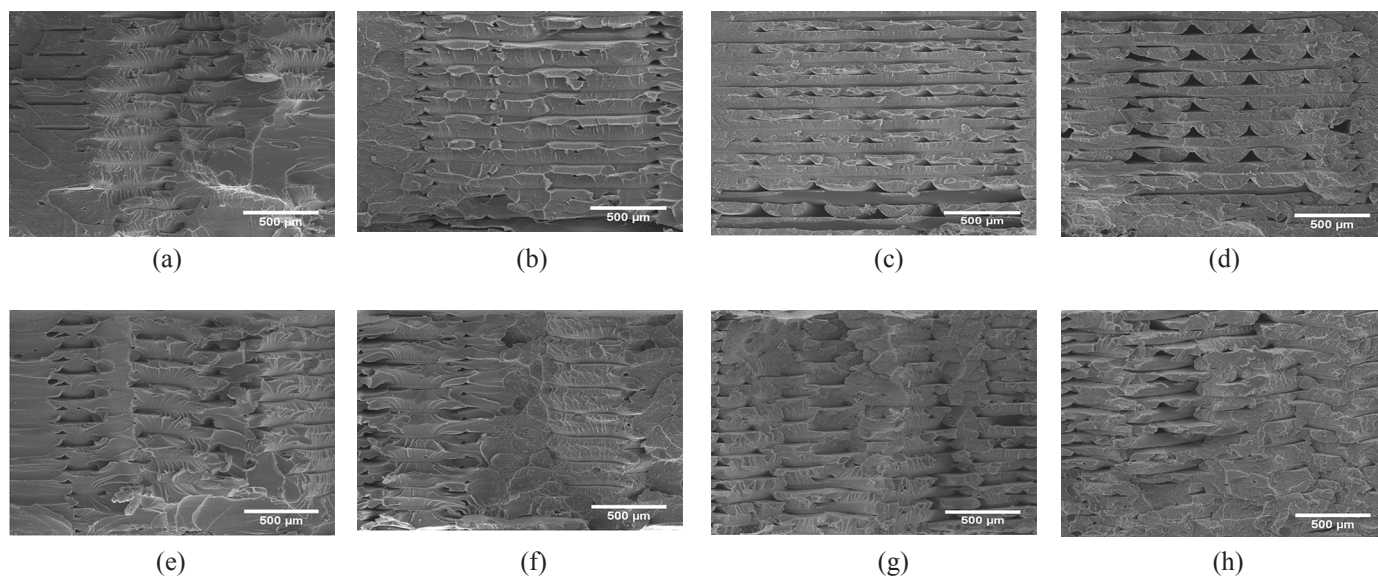
مطالعات سطح شکست

برای مطالعه اثر افزودن نانوذرات بر ساختار قطعه‌های چاپ شده، سطح شکست نمونه‌های ساخته شده با ضخامت لایه $0/1 \text{ mm}$ از نانوکامپوزیت‌های مختلف (پس از انجام آزمون کشش) به کمک



شکل ۶- تغییرات مدول ذخیره با بسامد برای ABS و نانوکامپوزیت‌های دارای مقادیر مختلف MWCNTs.

Fig. 6. The variation of storage modulus with frequency for ABS and the nanocomposites containing different amounts of MWCNTs.



شکل ۷- تصاویر SEM از سطح شکست تمام نمونه‌های چاپ‌شده در زاویه‌های رشته‌نشانی $0/90^\circ$ (بالا) و $45/-45^\circ$ (پایین) با ضخامت لایه 0.1 mm دارای مقادیر مختلف نانوذرات پس از آزمون کشش: (a)، (e) 0 wt%، (b)، (f) 1 wt%، (c)، (g) 3 wt%، و (d)، (h) 5 wt%.

ضعیف لایه‌ها به یکدیگر ایجاد می‌شوند. تعداد، اندازه و کیفیت این نقص‌ها با تغییر ضخامت لایه چاپ، ترکیب درصد MWCNTs و زاویه رشته‌نشانی تغییر می‌کند که این عوامل موجب کاهش استحکام و مدول کششی در قطعه چاپ‌شده می‌شوند.

- زاویه رشته‌نشانی، به دلیل آرایش‌یافتگی این نانوذرات و نیز زنجیرهای پلیمری در امتداد یک رشته، زاویه رشته‌نشانی به‌طور غیرمستقیم می‌تواند بر خواص مکانیکی قطعه‌های تهیه‌شده مؤثر باشد. البته به دلیل شدت اثر دو عامل وجود نانوذرات و نقص‌ها، اثر رشته‌نشانی در دو زاویه $0/90^\circ$ و $45/-45^\circ$ در این کار چندان مشهود نبود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوکامپوزیت ABS با مقادیر 1 ، 3 و 5 ٪ وزنی نانولوله‌های کربن چنددیواره با روش اختلاط مذاب تهیه و از آمیخته‌های حاصل رشته‌های مناسب فرایند چاپ سه‌بعدی با روش FDM ساخته شد. مطالعات میکروسکوپی الکترونی پویشی و عبوری نشان داد، توزیع و پراکنش مناسب MWCNTs درون ماتریس پلیمری

استحکام کششی و مدول کشسانی قطعه‌های چاپ‌شده با زاویه $45/-45^\circ$ اندکی بیشتر از $0/90^\circ$ است. از سوی دیگر، نتایج آزمون کشش برای همه آمیخته‌ها نشان داد، در اثر افزایش ضخامت لایه چاپ، در هر دو زاویه رشته‌نشانی، روند استحکام کششی و مدول کشسانی کاهش است. در اثر افزایش ضخامت لایه، اندازه حفره‌های میان لایه‌ها بزرگ‌تر شده که این موضوع باعث تمرکز تنش و کاهش استحکام نمونه‌ها می‌شود [25-28]. به عبارت دیگر، وقتی ضخامت لایه کم است، به دلیل فاصله کمتر لایه‌های مجاور با یکدیگر، انتقال گرمای بهتری میان آن‌ها اتفاق می‌افتد، در نتیجه برای ترکیب درصد ثابت، کیفیت چاپ بهبود می‌یابد. با مشاهده روند تغییرات نتایج استحکام کششی و مدول کشسانی قطعه‌های چاپ‌شده در شرایط فرایندی و ترکیب درصد‌های مختلف و نیز در نظر گرفتن خواص رئولوژیکی آمیخته‌ها و تصاویر SEM آن‌ها، می‌توان نتیجه گرفت، سه عامل زیر به‌طور هم‌زمان در به‌دست آمدن این نتایج مؤثرند:

- تقویت‌کنندگی ABS با نانوذرات MWCNTs، که افزودن این نانوذرات به پلیمر خالص موجب بهبود استحکام کششی و مدول کشسانی می‌شود.
- وجود نقص در قطعه، منظور از نقص، حفره‌های موجود میان لایه‌هاست که در اثر جریان‌پذیری کم آمیخته و نیز چسبندگی

نمونه‌ها شد. تغییرات مدول ذخیره بر حسب بسامد و مسطح شدن آن در بسامدهای کم با افزودن نانوذرات نشانگر آن بود که در این ناحیه رفتار رئولوژیکی هرچه بیشتر شبه جامد شده است. کاهش جریان پذیری نیز سبب ضعیف شدن اتصال رشته‌های خروجی از نازل هنگام لایه‌نشانی و افزایش نقص‌ها در قطعه چاپ شده در درصد‌های زیاد MWCNTs شد.

قدردانی

از پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران برای دراختیار گذاشتن آزمایشگاه چاپ سه بعدی و سایر امکانات برای انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Attaran M., The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing, *Bus. Horizons*, **60**, 677-688, 2017.
- Panda S.K., Padhee S., Sood A.K., and Mahapatra S.S., Optimization of Fused Deposition Modelling (FDM) Process Parameters Using Bacterial Foraging Technique, *Intell. Inf. Manag.*, **1**, 89-97, 2009.
- Mohamed O.A., Masood S.H., and Bhowmik J.L., Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameters: A Review of Current Research and Future Prospects, *Adv. Manuf.*, **3**, 42-53, 2015.
- Zhang M., Song X., Grove W., Hull E., Pei Z.J., and Cong W., Carbon Nanotube Reinforced Fused Deposition Modeling Using Microwave Irradiation, *Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Blacksburg, Virginia, June 27-July 1, 1-7, 2016.
- Tian X., Liu T., Yang C., Wang Q., and Li D., Interface and Performance of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, **88**, 198-205, 2016.
- Bartolomé E., Bozzo B., Sevilla P., Martínez-Pasarell O., Puig T., and Granados X., ABS 3D Printed Solutions for Cryogenic Applications, *Cryogenics*, **82**, 30-37, 2017.
- Alafaghani A., Qattawi A., and Ablat M.A., Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling, *Open J. Appl. Sci.*, **7**, 291-318, 2017.
- Patanwala H.S., Hong D., Vora S.R., Bognet B., and Ma A.W.K., The Microstructure and Mechanical Properties of 3D Printed Carbon Nanotube-Polylactic Acid Composites, *Polym. Compos.*, **39**, E1060-E1071, 2018.
- Dul S., Fambri L., and Pegoretti A., Fused Deposition Modelling with ABS-Graphene Nanocomposites, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, **85**, 181-191, 2016.
- Dorigato A., Moretti V., Dul S., Unterberger S.H., and Pegoretti A., Electrically Conductive Nanocomposites for Fused Deposition Modelling, *Synth. Met.*, **226**, 7-14, 2017.
- Christ J.F., Aliheidari N., Ameli A., and Pötschke P., 3D Printed Highly Elastic Strain Sensors of Multiwalled Carbon Nanotube/ Thermoplastic Polyurethane Nanocomposites, *Mater. Design*, **131**, 394-401, 2017.
- Cholleti E.R. and Gibson I., ABS Nanocomposite Materials in Additive Manufacturing, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **455**, 012038, 2018.
- Sezer H.K. and Eren O., FDM 3D Printing of MWCNT Reinforced ABS Nano-composite Parts with Enhanced Mechanical and Electrical Properties, *J. Manuf. Process.*, **37**, 339-347, 2019.
- Zhu J. and Wang B., Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene Nanocomposites Potentially Used for Fused Deposition Modeling, *Mater. Sci. Forum*, **898**, 2384-2391, 2017.

15. Forster A.M., Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, 2015.
16. Gnanasekaran K., Heijmans T., van Bennekom S., Woldhuis H., Wijnia S., de With G., and Friedrich H., 3D Printing of CNT- and Graphene-Based Conductive Polymer Nanocomposites by Fused Deposition Modeling, *Appl. Mater. Today*, **9**, 21-28, 2017.
17. Dizon J.R.C., Espera Jr. A.H., Chen Q., and Advincula R.C., Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers, *Addit. Manuf.*, **20**, 44-67, 2018.
18. Crococolo D., De Agostinis M., and Olmi G., Experimental Characterization and Analytical Modelling of the Mechanical Behaviour of Fused Deposition Processed Parts Made of ABS-M30, *Comput. Mater. Sci.*, **79**, 506-518, 2013.
19. McNally T., Pötschke P., Halley P., Murphy M., Martin D., Bell S.E.J., Brennan G.P., Bein D., Lemoine P., and Quinn J.P., Polyethylene Multiwalled Carbon Nanotube Composites, *Polymer*, **46**, 8222-8232, 2005.
20. Ma P.C., Siddiqui N.A., Marom G., and Kim J.K., Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: A Review, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, **41**, 1345-1367, 2010.
21. Mousavi L., Nazoockdast H., Mohammadi Y., Azizi H., and Saleh Z., The Effect of Mixing Process on Linear Viscoelastic and Electrical Properties of ABS/MWNT Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **125**, E260-E267, 2012.
22. Singh B.K., Kar P., Shrivastava N.K., Banerjee S., and Khatua B.B., Electrical and Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites Prepared by Melt-Blending, *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 3165-3174, 2012.
23. Al-Saleh M.H., Al-Anid H.K., and Hussain Y.A., CNT/ABS Nanocomposites by Solution Processing: Proper Dispersion and Selective Localization for Low Percolation Threshold, *Compos. Part A-Appl. Sci. Manuf.*, **46**, 53-59, 2013.
24. Shrivastava N.K., Suin S., Maiti S., and Khatua B.B., Ultralow Electrical Percolation Threshold in Poly(Styrene-co-Acrylonitrile)/Carbon Nanotube Nanocomposites, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **52**, 2858-2868, 2013.
25. Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian. F., and Letcher T., Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation, *J. Fail. Anal. Preven.*, **16**, 467-481, 2016.
26. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S., Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts, *Mater. Design*, **31**, 287-295, 2010.
27. Christiyani K.G.J., Chandrasekhar U., and Venkateswarlu K., Influence of Raster Orientation and Layer Thickness on Mechanical Properties of ABS Material Using FDM Process, *IJASRE*, **3**, 1-6, 2014.
28. Nancharaiah T., Raju D.R., and Raju V.R., An Experimental Investigation on Surface Quality and Dimensional Accuracy of FDM Components, *Int. J. Emerg. Technol.*, **1**, 106-111, 2010.