مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1394، دوره 15، شماره 5، ص‌ص 269-278

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# توسعه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بهبود یافته جهت توزیع نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6

رضا فرشباف زینتی*

مربی، گروه ساخت و تولید، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

* تبریز، صندوق پستی 5157864846، reza.farshbaf.zinati@iaut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 26 دی 1393
پذیرش: 07 اسفند 1393
ارائه در سایت: 15 فروردین 1394

*کلید واژگان:*
فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک
الگوی پراش اشعه ایکس
میکروسختی
نانو لوله‌های کربنی چند دیواره
نایلون 6

**چکیده**

در این مطالعه، روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی اصلاح شده‌ی مبتنی بر ارتعاشات التراسونیک برای توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس پلیمری نایلون 6 ارائه گردیده است. بدین منظور، جهت تسهیل فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و افزایش تأثیر و بازدهی آن، از طرح ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی اصلاح شده به همراه ارتعاشات التراسونیک استفاده گردید. آزمایش‌های متعددی برای دستیابی به بازه مناسبی از پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار) صورت گرفت. مشاهدات میکروسکوب الکترونی روبشی و الگوهای پراش اشعه ایکس نشان می‌دهند که نانولوله‌های کربنی چند دیواره به شکلی یکنواخت در ماتریس پلیمری نایلون 6 توزیع شده‌اند. آزمایشات میکروسختی ویکرز نشان می‌دهند که توزیع یکنواخت‌تر نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6 می‌تواند منجر به افزایش سختی آن تا حدود 33% در مقایسه با دیگر نانوکامپوزیت‌های تولیدی گردد. همچنین، نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت مورد نظر در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک با سرعت پیشروی بالاتر از سرعت پیشروی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده تولید می‌گردد، اما افزایش سرعت پیشروی در فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک باعث کاهش اغتشاش نانوکامپوزیت و در نتیجه کاهش توزیع همگن نانوکامپوزیت نمی‌گردد.

# Development of a modified friction stir process for dispersion of multi-walled carbon nano-tube throughout nylon 6

Reza Farshbaf Zinati*

Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
* P.O.B. 5157864846, Tabriz, Iran, reza.farshbaf.zinati@iaut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 January 2015
Accepted 26 February 2015
Available Online 04 April 2015

*Keywords:*
Ultrasonic vibration assisted friction stir process
X-ray diffraction pattern
Micro-hardness
Multi-walled carbon nano-tube
Nylon 6

ABSTRACT

In the current work, a modified method of friction stir process (FSP) based on ultrasonic vibration and modified FSP tool design was developed to disperse multi-walled carbon nano-tube (MWCNT) throughout nylon 6 matrix. To this end, Field emission scanning electron microscopy, X-ray diffraction, Vickers' micro-hardness, and visual inspection were used to evaluate the fabricated nano-composites. Also, a modified design of FSP tool together with ultrasonic vibration were used to improve the impact and efficiency of FSP. Several experiments were conducted to approach an optimum range of FSP parameters (rotational speed and traverse speed). The scanning electron microscopy observations and X-ray diffraction patterns (XRD) affirm that MWCNT was dispersed homogeneously throughout nylon 6 matrix. Micro-hardness results illustrate that homogeneous dispersion of MWCNT throughout nylon 6 matrix results in 33% increase of micro-hardness. In general, the obtained results declare that ultrasonic vibration causes an increase in traverse speed and production speed of nano-composite without affecting the homogeneous dispersion and hardness of nano-particles throughout the matrix. Also, it is clear that ultrasonic vibrations did not noticeably affect superficial form of nano-composites due to low traverse speeds used in ultrasonic assisted friction stir process.

## 1- مقدمه

نانوکامپوزیت‌های سطحی زمینه پلیمری دارای خصوصیات مکانیکی سطح بالاتر در مقایسه با پلیمرها است که باعث جایگزینی نانوکامپوزیت‌های سطحی در صنعت شده است. در بسیاری از شرایط کاری، عمر مفید قطعات وابسته به خواص و شرایط سطحی از قبیل مقاومت به سایش و صافی سطح آنها است. در این‌گونه از موارد بهتر است که تنها لایه‌ای از سطح قطعه با ذرات مستحکم و سخت تقویت شده و ترکیب و ساختار اولیه حجم درونی قطعه ثابت باقی بماند.

یکی از فرآیندهایی که می‌تواند تا عمق مشخصی از سطح قطعه‌کار را تحت اثر قرار دهد و تولید نانوکامپوزیت نماید، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی است. این فرآیند با ایجاد شرایط خمیری در مواد می‌تواند مواد ثانویه کامپوزیت‌ساز را درون ساختار ماتریس به طور یکنواخت توزیع کند [1].

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

R. Farshbaf Zinati, Development of a modified friction stir process for dispersion of multi-walled carbon nano-tube throughout nylon 6, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 269-278, 2015 (In Persian)

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل یک ابزار چرخنده مصرف نشدنی متشکل از یک پین با طرحی خاص و یک شانه است که در طول سطح به چرخش در می‌آید و در اثر چرخش ابزار درون مواد، اصطکاک زیادی مابین مواد و ابزار چرخنده ایجادشده که منجر به گرم شدن مواد می‌شود. در اثر این گرما، مواد وارد ناحیه خمیری می‌شوند و در اثر سیالیتی که پیدا می‌کنند در هم مخلوط می‌شوند.

از سوی دیگر، ارتعاشات التراسونیک بدلیل دارا بودن خصوصیات دینامیکی ویژه، باعث بهبود بسیاری از فرآیندهای صنعتی گردیده است. از اینرو، امواج التراسونیک در زمینه‌های مهندسی متعددی نظیر ریخته‌گری، تولید پودر فلزی، جوشکاری التراسونیک، تنش‌زدایی التراسونیک و غیره کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. اما تاکنون در زمینه اعمال ارتعاشات التراسونیک بر روی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید نانوکامپوزیت سطحی و همچنین، بررسی اثر ارتعاشات التراسونیک برروی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و ریزساختار نانوکامپوزیت سطحی تولیدی، مطالعات اندکی صورت گرفته است. از کارهای انجام یافته در این زمینه می‌توان به مطالعه دمای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در حضور و عدم حضور ارتعاشات التراسونیک برای آلومینیوم 2024 توسط رویلین و همکارانش [2] و مطالعه اثر ارتعاشات التراسونیک بر روی نیرو، دما، استحکام کششی جوش و سختی جوش ایجاد شده توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط امینی و امیری [3] اشاره نمود.

از سوی دیگر، مقدار مطالعات انجام‌گرفته در مورد فرآیند اصطکاکی اغتشاشی پلیمرها بسیار کم بوده و بسیاری از مطالعات منتشرشده در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلیمرها است. از کارهای انجام یافته در این زمینه می‌توان به مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی‌اتیلن توسط بزکوت و همکارانش [1]، آریسی و سلاله [4]، آریسی و سینماز [5]، آیدین [6]، مصطفی‌پور و آذرسا [7]، رزقوی و همکارانش [8]، سعیدی و گیوی [9]، مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی‌اتیلن سنگین توسط سکو و کوادرینی [10]، رزقوی و همکارانش [11]، مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی‌پروپیلن توسط کیس و زیقانی [12،13]، پانیرسلاوام و لنین [14]، مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اِی‌بی‌اِس[1] توسط باقری و همکارانش [15]، مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پلی‌اتیلن-ترفتالات گلیکول توسط کیس و زیقانی [16] و در نهایت، مطالعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نایلون 6 توسط پانیرسلاوام و لنین [17] اشاره کرد. در کارهای انجام‌شده، روش جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی نیز یافت می‌شود که برای جوشکاری پلیمرها مورد استفاده قرار گرفته است. روش جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی فقط شامل فرورفتن ابزار و خارج شدن آن از قطعه‌کار جهت جوشکاری نقطه‌ای لبه‌های ناپیوسته دو قطعه به همدیگر است. از کارهای انجام‌شده برروی جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی می‌توان به جوشکاری نقطه‌ای پلی‌اتیلن سنگین توسط بلیجی و یوکلر [18]، بلیجی و همکارانش [19]، بلیجی [20]، پلی‌پروپیلن توسط بلیجی [21]، مرت و آریسی [22]، آریسی [23] و پلی‌متیل متاکرلات توسط الیوریا [24] اشاره نمود.

بوزکوت و همکارانش [1] با استفاده از یک ابزار معمولی با قطر شانه 18 میلیمتر و قطر پین 6 میلیمتر، پلی اتیلن سنگین را در سرعت چرخش ابزار بین 1500 الی 3000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی ابزار بین 45-115 میلیمتر در دقیقه تحت فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قراردادند. آنها تغییرات درجه حرارت در طول فرآیند را بین 120 الی 165 درجه سانتی-گراد اندازه‌گیری نمودند، در حالی که این پلیمر دارای دمای ذوب 132 درجه سانتی‌گراد است. حفره و ترک مشاهده‌شده در ریشه جوش نمونه باعث کاهش خواص کششی جوش گردید.

بررسی اثر پارامترهای بحرانی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای پلی‌اتیلن نیز توسط سعیدی و گیوی [9]، که شامل سرعت چرخش و سرعت پیشروی در محدوده 1000 الی 1800دور در دقیقه و 12 الی 20 میلیمتر در دقیقه است، صورت گرفت. مقدار مقاومت جوش بهینه 75 درصد مقاومت ماده پایه، فقط برای یک ترکیب بهینه از پارامترهای جوشکاری به دست آمد. این نتایج تأثیر مهم پارامترهای فرآیند بر روی نتایج جوشکاری را نشان می‌دهد.

رزقوی و همکارانش [11] با استفاده از روش آنالیز واریانس، پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را برای جوشکاری ورق‌های پلی‌اتیلن سنگین به همدیگر بهینه‌سازی نمودند.

آریسی و سلاله [4] و همچنین آریسی و سینماز [5] با استفاده از ابزار متعارف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اقدام به جوشکاری پلی‌اتیلن کردند. آنها به منظور اجتناب از نقص ترک‌های ریشه جوش که توسط بزکوت [1] گزارش شده است، دو پاس جوش لب به لب انجام دادند و از سرعت دورانی تا 1000 دور در دقیقه و سرعت پیشروی تا 60 میلیمتر در دقیقه استفاده نمودند. آنها تولید حرارت ناکافی برای سرعت‌های دورانی600 الی 800 دور در دقیقه و شرایط جوش مناسب در سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه را گزارش کردند. این نویسندگان همچنین مشاهده کردند که، بسته به میزان حرارت، قسمتی از مواد از منطقه جوش در طول جوشکاری خارج گردیده است.

آیدین [6] نیز از ابزار و پارامترهای فرآیند مشابه آریسی و سلاله [4] استفاده کردند، با این تفاوت که جوشکاری را در یک پاس و با پیش گرم قطعه پایه انجام دادند. آنها گزارش دادند که پیش‌گرم کردن، گرمایش کافی حتی در سرعت‌های دورانی کم را تأمین می‌سازد.

استفاده از پیش‌گرم در جوشکاری اصطکاک اغتشاشی پلی‌اتیلن، با ابزار متعارف نیز توسط سکیو و کوادرینی [10] مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها علاوه بر پیش گرم کردن قطعه‌کار، ابزار فرآیند را نیز پیش گرم نمودند. آنها گزارش دادند که پیش‌گرم کردن، گرمایش کافی حتی در سرعت‌های دورانی کم را تأمین می‌سازد.

پانیرسلوام و لنین [14] با استفاده از ابزار معمولی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به تجزیه و تحلیل اثر هندسه پین در نتایج جوشکاری بر روی پلی-پروپیلن به عنوان ماده پایه پرداختند. آنها هندسه پین‌های مربع، مثلث، رزوه-دار و مخروطی را در طیف وسیعی از سرعت‌های دورانی1500 الی 2250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی30 الی 60 میلیمتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار دادند. با توجه به هندسه پین و پارامترهای جوشکاری، نقص‌های متعددی از قبیل عدم تراکم، تخلخل، حفره‌ها و آخال گزارش شده است. الحاق ضعیف نیز گزارش شده است که در اکثر موارد در ناحیه پسرفته منطقه اغتشاش یافته رخ می‌دهد. نویسندگان ادعا می‌کنند که مشخصات پین ابزار رزوه‌دار بهترین نتیجه جوشکاری را تولید می‌کند.

در نهایت، پانیرسلوام و لنین [17] اقدام به انجام آزمون‌های جوشکاری اصطکاک اغتشاشی با استفاده از ابزار معمولی دوار، همانند کارهای قبلی،

1- ABS

کردند؛ با این تفاوت که از ماده پایه نایلون 6 استفاده نمودند. آنها با استفاده از پین ابزار با رزوه چپ‌گرد، با سرعت دورانی 1000 دور در دقیقه و با سرعت پیشروی 10 میلیمتر بردقیقه اقدام به تجزیه و تحلیل اثر جهت چرخش ابزار بر روی کیفیت جوش کردند. آنها دریافتند که جوش‌های ساخته شده با چرخش ابزار پاد ساعت‌گرد نسبت به جوش با چرخش ابزار در جهت عقربه-های ساعت دارای نقص کمتر و استحکام بهتر هستند. آنها کیفیت پایین جوش به دست آمده با چرخش ابزار در جهت عقربه‌های ساعت را به خارج شدن مواد از درز جوش نسبت دادند.

در این کار تلاش شده است تا طرح بهبود یافته‌ای از ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی جهت افزایش کارایی فرآیند ارائه گردیده و در ادامه، اثر ارتعاشات التراسونیک و پارامترهای ورودی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر روی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت سطحی پایه پلیمری و ریزساختار نانوکامپوزیت سطحی پایه پلیمری تولیدی مورد مطالعه قرار گیرد.

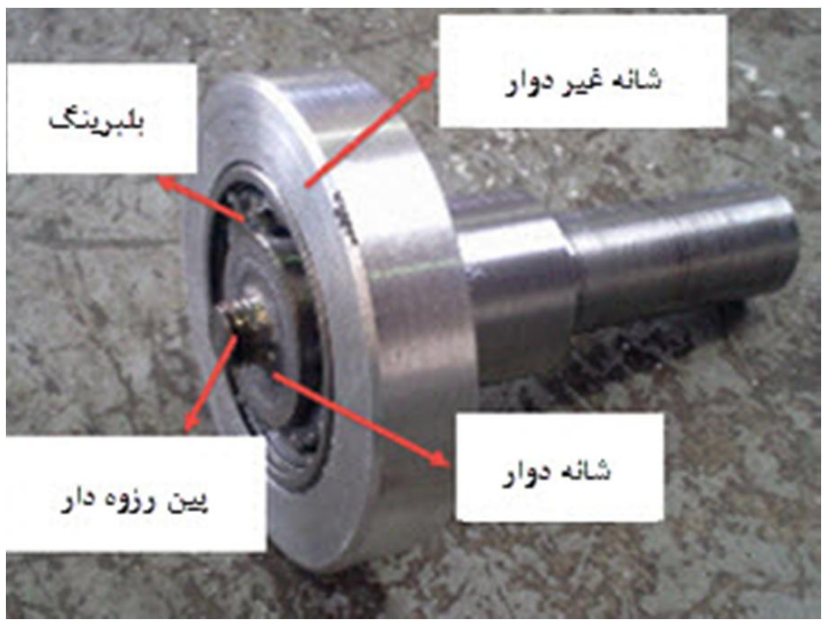
## 2- آزمایشات تجربی

### 2-1- ابزار اصلاح شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

ابزار جدیدی برای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی جهت تولید نانوکامپوزیت طراحی گردید. طراحی این ابزار به شکلی صورت گرفت که نیازی به بستن سطح بالایی شیار قبل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نباشد و خود ابزار در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، سطح بالایی شیار را ببندد تا از خروج نانوذرات از داخل شیار جلوگیری گردد. بدین منظور، شانه ثابت با قطری بزرگتر از قطر شانه دوران‌کننده، توسط بلبرینگ به ابزار مورد نظر اضافه گردید. وظیفه شانه ثابت حرکت در جلوی ابزار و بستن سطح بالایی شیار است. ابزار اصلاح شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده در این کار، از چهار بخش تشکیل شده است:

1. پین ابزار
2. شانه قابل دوران ابزار
3. بلبرینگ
4. شانه غیرقابل دوران ابزار

طرح شماتیک ابزار اصلاح شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در شکل 1 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شانه غیرقابل دوران ابزار با استفاده از بلبرینگ بر روی شانه قابل دوران ابزار مونتاژ گردیده است. وظیفه اصلی شانه غیرقابل دوران ابزار، جلوگیری از بیرون ریختن نانو لوله‌های کربنی چند دیواره از شیار در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی است. در صورت




**شکل 1** نمایی از ابزار اصلاح شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

استفاده از این نوع ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، دیگر نیازی به بستن سطح فوقانی شیار با استفاده از ابزار بدون پین که فقط شامل شانه است، نیست.

به منظور جلوگیری از چرخش شانه غیرقابل دوران ابزار، از سطح مسطح ایجاد شده بر روی سطح جانبی شانه غیرقابل دوران ابزار استفاده شده است. در طول فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، شیار مسطح مذکور در امتداد مسیر میله راهنما مسطح حرکت کرده و در نتیجه میله راهنما مانع از چرخش شانه غیرقابل دوران ابزار می‌گردد. مکانیزم شانه غیرقابل دوران ابزار در شکل 2 نشان داده شده است. برای رسیدن به بهترین حالت توزیع در نانوکامپوزیت تولیدی، پین ابزار با گام یک میلیمتر رزوه زده شده است. قطر شانه قابل دوران ابزار و شانه غیرقابل دوران ابزار بترتیب 30 و 70 میلیمتر و قطر و طول پین ابزار به ترتیب برابر با 9 و 6 میلیمتر در نظر گرفته شده است.

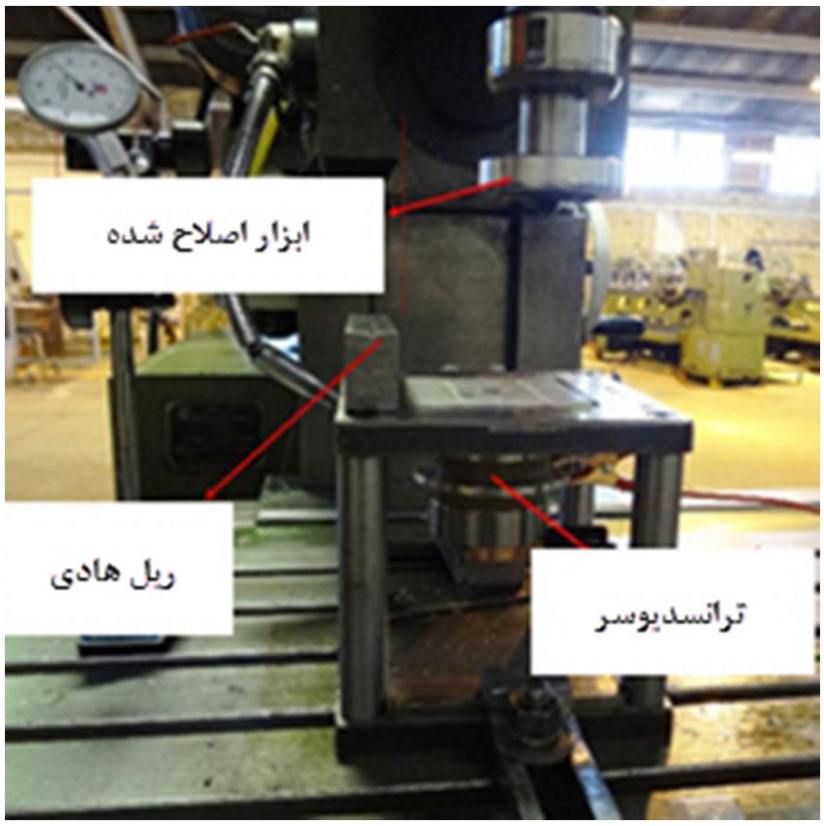
### 2-2- مواد مورد استفاده

ماتریس نانوکامپوزیت، از ورق‌های نایلون 6 با ضخامت 10 میلیمتر و مارک تجاری تی‌کاست[1] از شرکت انسینگر[2] کشور آلمان تأمین شده است. خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ورق نایلون مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است.

ذرات نانولوله‌های کربنی چند دیواره از شرکت نوترینو کشور ایران بعنوان ماده پرکننده در این کار مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات مکانیکی و فیزیکی نانولوله‌های کربنی چند دیواره مورد استفاده در جدول 2 آورده شده است. نانولوله‌های کربنی چند دیواره از نوع فعال‌سازی شده کربوکسیل بوده و با استفاده از روش رسوب شیمیایی بخار کاتالیستی تهیه شده است.

### 2-3- طراحی قید و بند آزمایش

برای نصب مجموعه قطعه‌کار و ترانسدیوسر بر روی میز دستگاه فرز به صورتی که بتوان به راحتی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را برروی قطعه‌کار نصب‌شده بر روی ترانسدیوسر انجام داد، نیاز به قید و بند مناسبی است. این قید و بند می‌بایست به گونه‌ای طراحی می‌گردید که از یک سو بتواند نیروهای اعمالی




**شکل 2** مکانیزم شانه غیرقابل دوران ابزاراصلاح شده فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

1- TECAST
2- Ensinger

از طرف ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را تحمل نماید و از سوی دیگر اتصال صحیح تمرکزدهنده و فضای لازم برای عبور سیم‌ها و ترانسدیوسر را فراهم آورد.

از اینرو، قید و بندی با سازه نشان داده شده در شکل 3 طراحی گردید و قطعات قید و بند مورد نظر از طریق فرآیند ماشین‌کاری ساخته شدند و توسط پیچ برروی همدیگر مونتاژ گردیدند. شکل 3 نمایی از قید و بند ساخته شده را نشان می‌دهد.

## 2-4- اجرای آزمایشات فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک

جهت تولید نانوکامپوزیت مورد نظر با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک مراحل زیر به ترتیب انجام گردید:

**شکل 3** نمایی از قید و بند ساخته شده برای مهار سیستم ارتعاشی التراسونیک

**جدول 1** خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ورق نایلون 6

| | |
|---|---|
| وزن مخصوص | 1/14 – 1/15 (گرم بر سی‌سی) |
| جذب رطوبت | 1/2 (درصد) |
| استحکام تسلیم کششی | 64/1 – 73/1 (مگاپاسکال) |
| استحکام برشی | 44/8 – 51/7 (مگاپاسکال) |
| دمای ذوب | 220 (درجه سانتی‌گراد) |
| دمای شیشه‌ای شدن | 60 (درجه سانتی‌گراد) |

**جدول 2** خصوصیات مکانیکی و فیزیکی نانولوله‌های کربنی چند دیواره

| | |
|---|---|
| قطر خارجی | 10 – 20 (نانومتر) |
| قطر داخلی | 5 - 10 (نانومتر) |
| طول | 10 – 30 (میکرومتر) |
| درجه خلوص | بالاتر از 95 (درصد) |
| محتوای کربوکسیل | 2 (درصد وزنی) |
| مساحت سطح مخصوص | 200 (متر مربع بر گرم) |

1. پیش از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، شیاری با سطح مقطع 6×1 mm به موازات لبه کناری قطعه‌کار در آن ایجاد گردید.
2. سپس، پودر نانولوله‌های کربنی چند دیواره در داخل شیار ریخته شد و توسط فشار دست فشرده گردید تا در حین فرآیند از حفره خارج نگردد.
3. در نهایت، ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی وارد قطعه‌کار نایلون 6 شده و در امتداد شیار ایجاد شده، به منظور توزیع ذرات نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ناحیه اغتشاش یافته ماتریس نایلون 6 حرکت داده می‌شود.

به منظور دستیابی به ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک جهت تولید نانوکامپوزیت سطحی با توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی چند دیواره و کیفیت مناسب، از طراحی آزمایشات فاکتوریل کامل با سه سطح برای سرعت دورانی (1250، 2000، 2500 دور در دقیقه) و دو سطح برای سرعت ابزار (100، 125 میلیمتر بر دقیقه) استفاده گردید.

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، یک بار در حضور ارتعاشات التراسونیک و بار دیگر در غیاب ارتعاشات التراسونیک انجام گردید؛ تا با مقایسه نتایج بدست آمده از هر دو سری نانوکامپوزیت تولید شده، اثر ارتعاشات التراسونیک مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، با توجه به طراحی آزمایشات انجام شده، تعداد 12 نمونه نانوکامپوزیتی تحت ترکیب پارامترهای مختلف تولید گردید. جدول 3 نمونه‌های نانوکامپوزیتی کدگذاری شده را نشان می‌دهد.

## 3- بحث و نتیجه‌گیری

به منظور یافتن پارامترهای بهینه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک جهت تولید نانوکامپوزیت‌های سطحی ایده‌آل، نمونه-های تولید شده به شکل زیر بررسی گردیدند:

**جدول 3** نمونه‌های نانوکامپوزیتی کدگذاری شده

| وضعیت التراسونیک | شماره نمونه | سرعت دورانی (دور بر دقیقه) | سرعت پیشروی (میلیمتر بر دقیقه) |
|---|---|---|---|
| عدم حضور ارتعاشات التراسونیک | 1 | 1250 | 100 |
| | 2 | 1250 | 125 |
| | 3 | 2000 | 100 |
| | 4 | 2000 | 125 |
| | 5 | 2500 | 100 |
| | 6 | 2500 | 125 |
| حضور ارتعاشات التراسونیک | 7 | 1250 | 100 |
| | 8 | 1250 | 125 |
| | 9 | 2000 | 100 |
| | 10 | 2000 | 125 |
| | 11 | 2500 | 100 |
| | 12 | 2500 | 125 |

### 3-1- بررسی کیفیت ظاهری نانوکامپوزیت‌های سطحی ساخته شده

همانطور که ذکر شد، از شش ترکیب مختلف پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای تولید شش نوع مختلف استفاده گردید. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برروی ستآپ طراحی شده، یک بار در حضور ارتعاشات التراسونیک و بار دیگر در غیاب ارتعاشات التراسونیک انجام گردید. سطح ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیدی در غیاب ارتعاشات التراسونیک در شکل 4 نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، تولید گرما در سرعت دورانی پایین (1250 دور در دقیقه) برای افزایش دمای ماتریس نایلون 6 تا دمای انتقال شیشه‌ای آن و در نتیجه نرم کردن آن کافی نیست. بنابراین، ماتریس نایلون 6 در طول فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، رشته رشته گردیده و فرآیند تولید نانوکامپوزیت موفقیت آمیز نخواهد بود.

همچنین، تولید گرما در سرعت دورانی بالا (2500 دور در دقیقه) بسیار بالا بوده و منجر به ذوب ماتریس نایلون 6 می‌گردد. لذا، به دلیل سیالیت بالای مذاب ماتریس نایلون 6، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی خارج از کنترل گشته و روند مخلوط‌سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس موفقیت آمیز نخواهد بود.

از سوی دیگر، روند مخلوط سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس در دو ترکیب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 100 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار و 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 125 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار از نظر شکل ظاهری موفقیت‌آمیز بوده است.

با توجه به این که کاهش سرعت پیشروی ابزار منجر به افزایش زمان صرف شده جهت مخلوط‌سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره با ماتریس نایلون 6 می‌گردد و افزایش زمان مخلوط‌سازی باعث توزیع یکنواخت‌تر نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6 می‌شود؛ بنابراین به نظر می‌رسد ترکیب پارامترهای 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 100 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار را می‌توان بعنوان ترکیب بهینه پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انتخاب نمود.

شکل 5 سطح ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیدی در حضور ارتعاشات التراسونیک را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، ارتعاشات التراسونیک اثر محسوسی برروی شکل ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیدی ندارد. بدین ترتیب که، شکل ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولید شده در حضور ارتعاشات التراسونیک بسیار مشابه نانوکامپوزیت‌های تولید شده در عدم حضور ارتعاشات التراسونیک و با پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی یکسان است.

همچنین، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که روند موفق فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در حضور ارتعاشات التراسونیک همانند فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده و در دو ترکیب پارامترهای فرآیند مشابه بوده است.

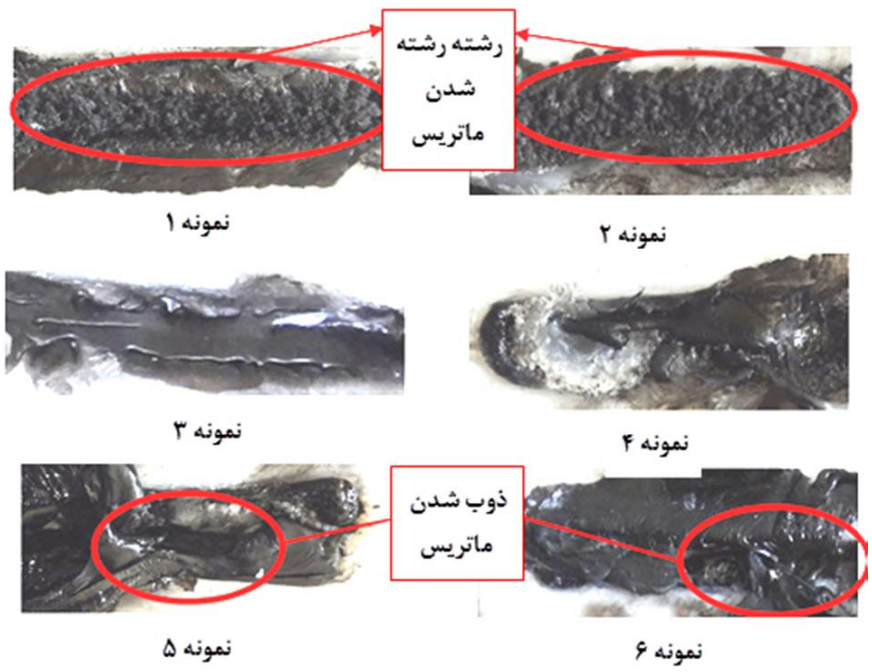
پدیده اثر نامحسوس ارتعاشات التراسونیک بر روی شکل ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیدی را می‌توان به میزان سرعت پیشروی ابزار در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ربط داد. رویلین و همکارانش در سال 2014 [2]، دمای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در حضور و عدم حضور ارتعاشات التراسونیک برای آلومینیوم 2024 را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار بدست آمده نشان می‌دهد که در سرعت‌های پیشروی پایین (150 میلیمتر بر دقیقه)، دمای ناحیه اغتشاشی در هر دو فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده و فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک تقریباً نزدیک به هم بوده و ارتعاشات التراسونیک اثر محسوسی بر دمای ناحیه اغتشاشی نداشته است.

از سوی دیگر، رویلین و همکارانش [2] ادعا کرده‌اند که در سرعت‌های پیشروی بالا (450 میلیمتر بر دقیقه)، انرژی التراسونیک باعث افزایش دما در ناحیه اغتشاشی گردیده و در نتیجه دمای ناحیه اغتشاشی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک بالاتر از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده می‌گردد.

در این مطالعه، سرعت پیشروی ابزار به دلیل محدود بودن توان موتور پیشروی دستگاه، مقدار پایینی انتخاب شده است. از اینرو، ارتعاشات التراسونیک برروی دمای ناحیه اغتشاشی اثر محسوسی نداشته است.

### 3-2- بررسی توزیع نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6 با استفاده از الگوهای پراش اشعه ایکس

به منظور بررسی تأثیر نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر رفتار تبلور نایلون 6، الگوهای پراش اشعه ایکس شامل: (1) نایلون 6 خالص (شکل 6)؛ (2) نانولوله‌های کربنی چند دیواره خالص (شکل 7)؛ (3) نانوکامپوزیت تولیدی با ترکیب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 100 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار (نمونه 3) (شکل 8)؛ (4) نانوکامپوزیت تولیدی با ترکیب پارامترهای فرآیند اصطکاکی



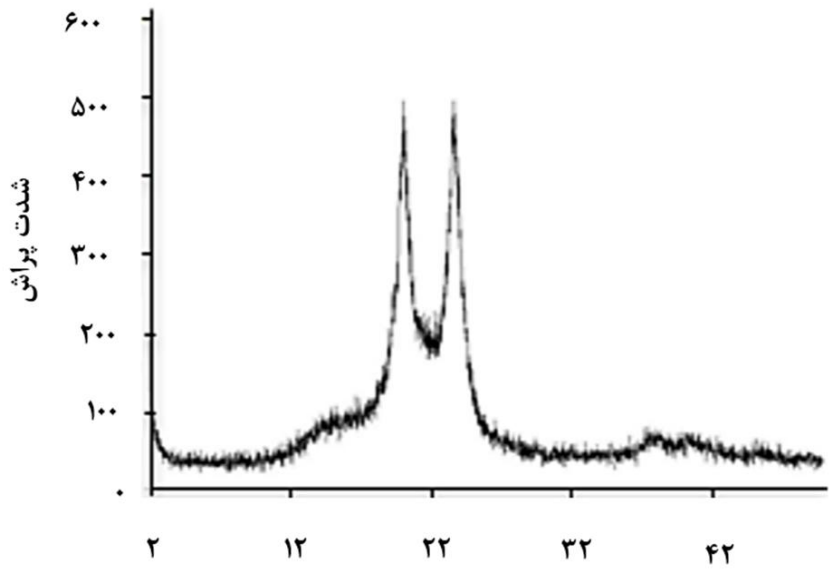

**شکل 4** سطح ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیدی در غیاب ارتعاشات التراسونیک

**شکل 5** سطح ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیدی در حضور ارتعاشات التراسونیک

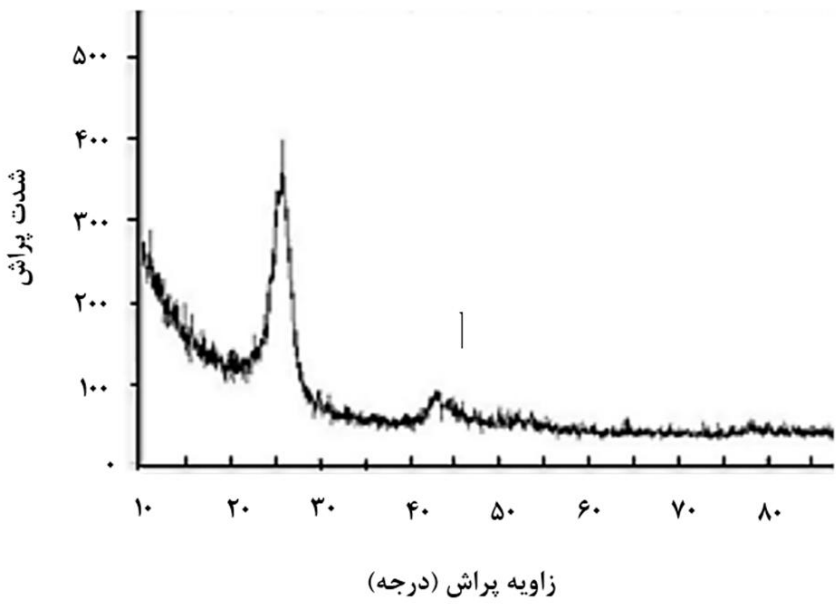
اغتشاشی شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 125 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار (نمونه 4) (شکل 9)؛ (5) نانوکامپوزیت تولیدی با ترکیب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 100 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار (نمونه 9) (شکل 10)؛ (6) نانوکامپوزیت تولیدی با ترکیب پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک ارتعاشات التراسونیک شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 125 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار (نمونه 10) (شکل 11) با یکدیگر مقایسه شدند. الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌ها در ولتاژ 40 کیلوولت و جریان 30 میلی‌آمپر و با استفاده از تابش اشعه آلفا مس ($\lambda$=0.154nm) ثبت گردید.

در شکل 7، پیک در زاویه $2\theta$=25° برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره خالص مشاهده می‌شود که در الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 4، نمونه 9 و نمونه 10 دیده نمی‌شود (شکل‌های 8، 9، 10 و 11). این امر نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی چند دیواره به شکلی مناسب در ماتریس نایلون 6 در نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 4، نمونه 9 و نمونه 10 پراکنده شده‌اند.

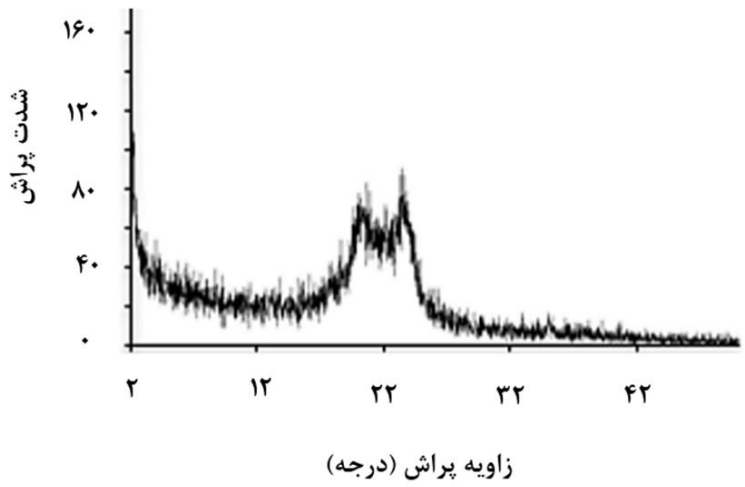
شکل‌های 6، 8 و 9 به ترتیب نشان می‌دهند که وجودکریستال‌های فاز آلفا نایلون 6 باعث انعکاس در زوایای تقریبی $2\theta$=20° و $2\theta$=24° در نایلون 6 خالص و نانوکامپوزیت‌های نمونه 3 و نمونه 4 گردیده است. فاز آلفا، لایه‌های کریستالی زنجیره‌ای با پیوند هیدروژنی است که بین زنجیره‌های آمورف شکل می‌گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت پیک‌های فاز آلفا برای نایلون 6 خالص بیشتر از شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 4 است.



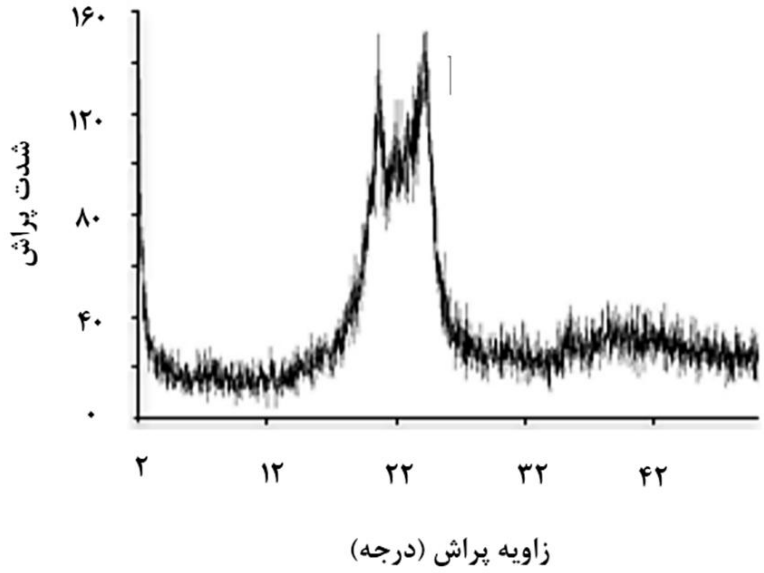

**شکل 6** الگوهای پراش اشعه ایکس نایلون 6 خالص



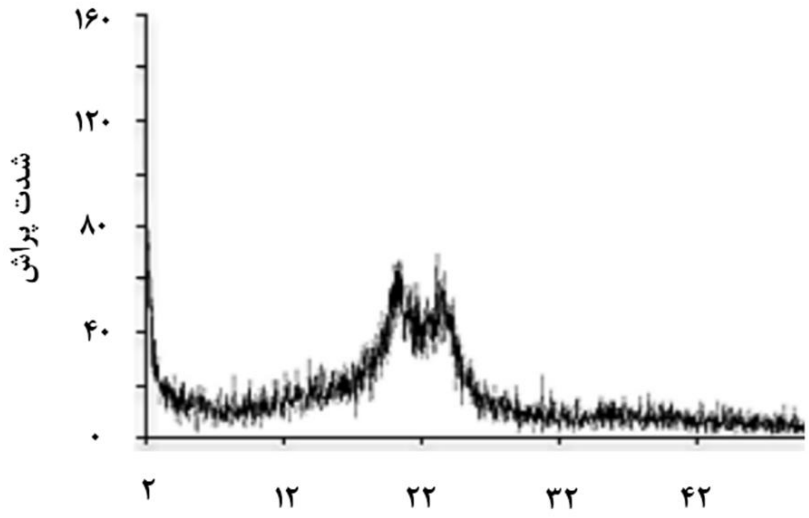

**شکل 7** الگوهای پراش اشعه ایکس نانولوله‌های کربنی چند دیواره خالص



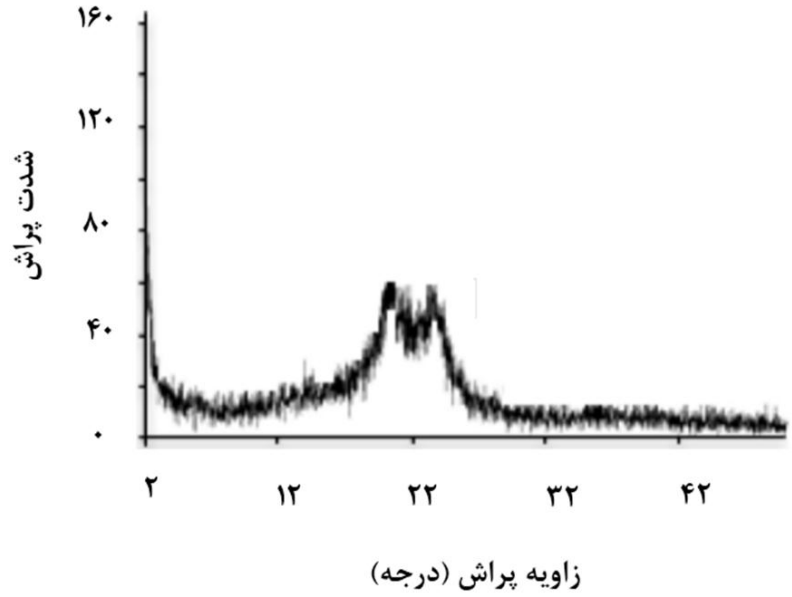

**شکل 8** الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه 3




**شکل 9** الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه 4




**شکل 10** الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه 9




**شکل 11** الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه 10

همچنین، شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 4 بیشتر از شدت پیک فاز آلفا نانوکامپوزیت نمونه 3 است. از سوی دیگر، باریک شدگی قابل توجهی در پیک فاز آلفا نانوکامپوزیت نمونه 3 در مقایسه با نایلون 6 خالص و نانوکامپوزیت نمونه 4 مشاهده می‌شود که نشان دهنده این است که اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 3 بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 4 بوده است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که توزیع نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6 نانوکامپوزیت نمونه 3 در مقایسه با نانوکامپوزیت نمونه 4 بهبود یافته است.

از سوی دیگر با مقایسه دو شکل 9 و 11 مشخص می‌شود که شدت پیک‌های فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 4 بیشتر از شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 10 است. این پدیده نشان دهنده این است که با وجود تولید هر دو نانوکامپوزیت با ترکیب یکسان پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 125 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار، اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 10 بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 4 بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که انرژی اعمال‌شده از ارتعاشات التراسونیک در نمونه 10 باعث تشدید اغتشاشات در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک در مقایسه با تولید نانوکامپوزیت نمونه 4 توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده گردیده است.

همچنین با مقایسه دو شکل 8 و 10 مشخص می‌شود که شدت پیک-های فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 3 بیشتر از شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 9 است. اما میزان افت شدت پیک در این مورد بسیار کمتر از میزان افت شدت پیک نانوکامپوزیت نمونه 4 در مقایسه با نانوکامپوزیت نمونه 10 است. این پدیده نشان دهنده این است که با وجود تولید هر دو نانوکامپوزیت با ترکیب یکسان پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه با سرعت پیشروی ابزار 100 میلیمتر در دقیقه، اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 9 کمی بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 3 بوده است. اما میزان افزایش اغتشاش در این مورد بسیار کمتر از میزان افزایش اغتشاش در حین تولید نانوکامپوزیت نمونه 10 در مقایسه با نانوکامپوزیت نمونه 4 است. از اینرو، می‌توان نتیجه گرفت که انرژی اعمال شده از ارتعاشات التراسونیک در نمونه 9 باعث تشدید اغتشاشات در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک در مقایسه با تولید نانوکامپوزیت نمونه 3 توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده گردیده است.

می‌توان کاهش شدت پیک‌های فاز آلفا به دلیل افزایش اغتشاش را شکسته شدن کریستال‌های فاز آلفا به کریستال‌های با اندازه کوچکتر در اثر بیشتر شدن اغتشاش و همچنین کاهش هسته‌های جوانه زنی نامتجانس کریستال‌های فاز آلفا دانست. از یک سو، افزایش اغتشاش در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش شکسته شدن کریستال‌های فاز آلفا گردیده و در نتیجه اندازه این کریستال‌ها کاهش می‌یابد. کاهش اندازه کریستال‌های فاز آلفا باعث افت شدت پیک الگوی پراش اشعه ایکس آن می‌گردد.

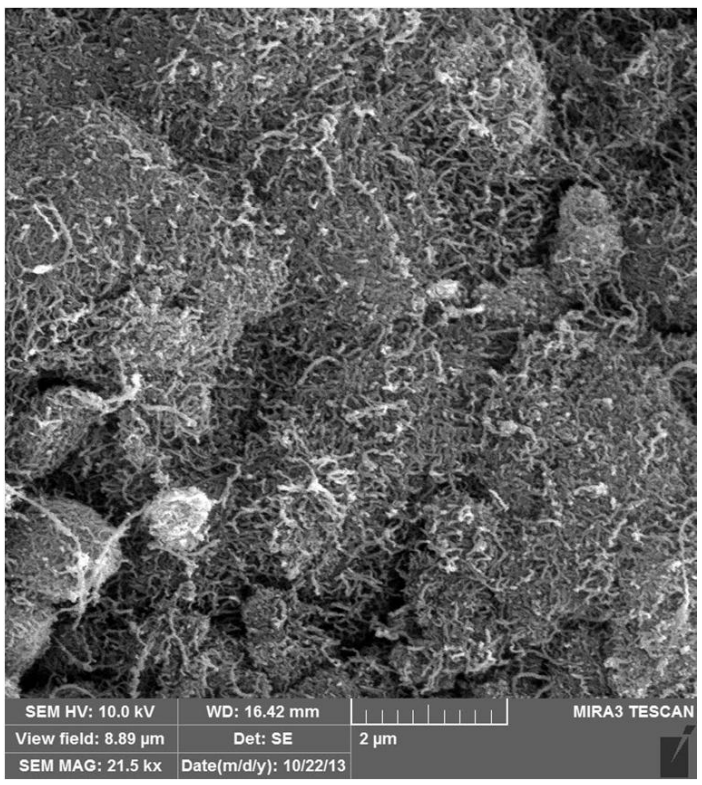
از سوی دیگر، نانولوله‌های کربنی چند دیواره به عنوان هسته‌های جوانه-زنی نامتجانس کریستال‌های فاز آلفا محسوب می‌گردد. با افزایش اغتشاش ایجاد شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، توزیع نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس همگن‌تر شده و از اینرو کریستال‌های فاز آلفا ریزتر خواهند گردید. از این رو، جوانه زنی و رشد کریستال‌های فاز آلفا به ترتیب افزایش و کاهش یافته و در نتیجه شدت پیک‌های فاز آلفا کاهش می‌یابد [25،26].

## 3-3- بررسی حالت توزیع با استفاده از میکروسکوب الکترونی روبشی

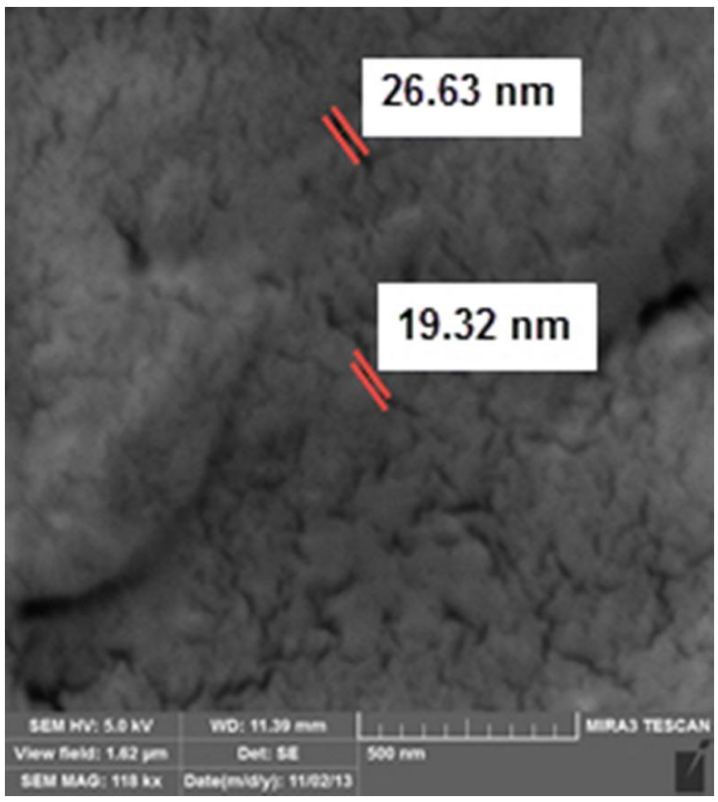
میکروسکوپ الکترونی روبشی با ولتاژهای شتاب‌گیری 5 و 10 کیلوولت برای مشاهده نانولوله‌های کربنی چند دیواره مورد استفاده قرار گرفت. میکروسکوپ الکترونی روبشی از نوع انتشار میدانی بوده و در خلأ با فشار پایین (برای نمونه‌های نارسانا) مورد استفاده قرار گرفت.

شکل 12، نانولوله‌های کربنی چند دیواره مشاهده‌شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نانولوله‌های کربنی چند دیواره دارای قطر تقریبی 20-15 نانومتر و طول چندین میکرومتر می‌باشند.

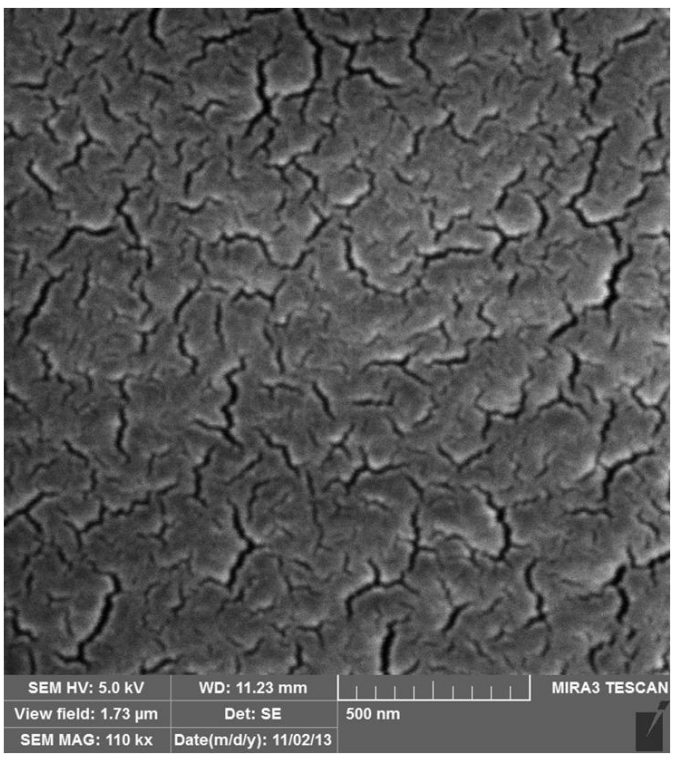
شکل‌های 13، 14، 15 و 16 به ترتیب توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6 با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد که از نمونه‌های نانوکامپوزیتی نمونه 3، نمونه 4، نمونه 9 و نمونه 10 گرفته شده است. تغییر در کنتراست تصویر به دلیل تفاوت تفرق الکترون‌ها از عمق‌های مختلف است.



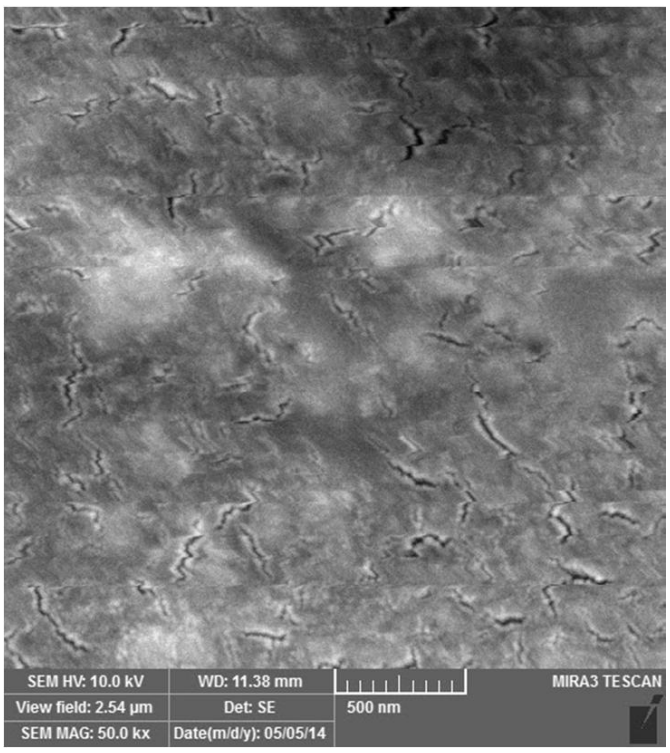

**شکل 12** نانولوله‌های کربنی چند دیواره 60



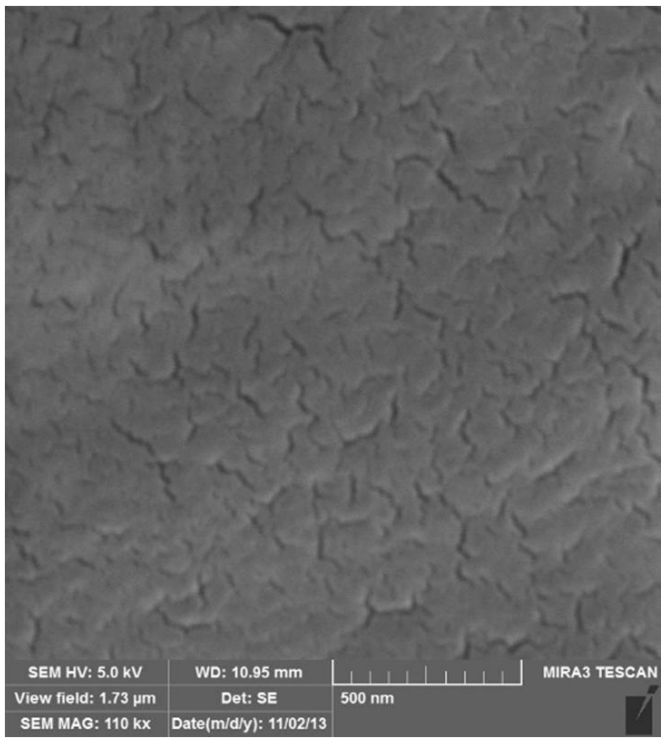

**شکل 13** نمونه 3 مشاهده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی




**شکل 14** نمونه 4 مشاهده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی




**شکل 15** نمونه 9 مشاهده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی




**شکل 16** نمونه 10 مشاهده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی

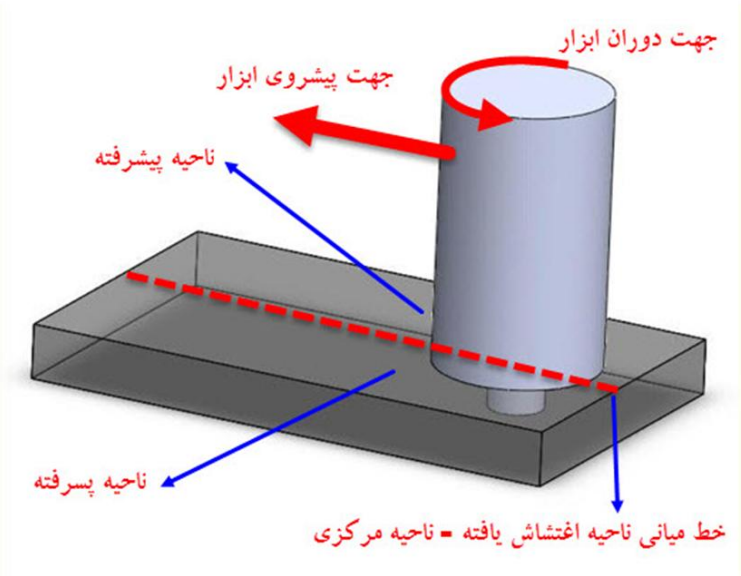
## 3-4- میکروسختی سنجی نانوکامپوزیت‌های تولیدی

با توجه به اینکه هدف از نانوکامپوزیت‌سازی سطح پلیمر افزایش خصوصیات مکانیکی سطح پلیمر از قبیل سختی، مقاومت به سایش و غیره است، میکروسختی سطحی کامپوزیت‌های تولیدی با استفاده از الماس فرورونده ویکرز با بار 100 گرم به مدت 15 ثانیه صورت گرفت. برای افزایش دقت نتایج بدست آمده، تست‌های میکروسختی سنجی در هر سه ناحیه پیشرفته، پسرفته و مرکز ناحیه اغتشاش یافته انجام گرفته و میانگین نتایج حاصل از سه تست به عنوان میکروسختی نانوکامپوزیت مزبور در نظر گرفته شد. نواحی پیشرفته، پسرفته و مرکزی منطقه اغتشاش یافته در شکل 17 نشان داده شده است.

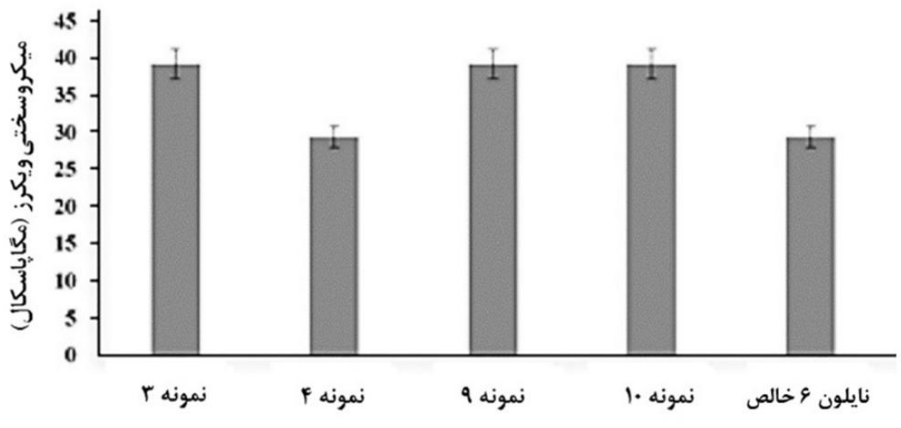
مقادیر میانگین میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 4، نمونه 9، نمونه 10 در شکل 18 نشان داده شده است. با توجه به شکل 18، مقدار متوسط میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت نمونه 4، کمترین مقدار در میان نانوکامپوزیت‌های تولیدی است. این پدیده را می‌توان به کم بودن میزان اغتشاش ایجاد شده در ماتریس و عدم توزیع مناسب ذرات نانولوله های کربنی چند دیواره با استحکام بالا نسبت داد.

از سوی دیگر، مقدار متوسط میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 9، نمونه 10 نشان دهنده افزایش 33 درصدی در مقایسه با مقدار متوسط میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت نمونه 4 است. افزایش میکروسختی ویکرز را می‌توان به بالا بودن میزان اغتشاش ایجاد شده در ماتریس و توزیع مناسب و تفکیک بالای نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس پلیمری نسبت داد.

به وضوح مشاهده می‌شود که مقدار متوسط میکروسختی نانوکامپوزیت نمونه 4 کمتر از مقدار متوسط میکروسختی نانوکامپوزیت نمونه 10 است. این پدیده نشان دهنده این است که با وجود تولید هر دو نانوکامپوزیت با ترکیب




**شکل 17** شماتیک نواحی پیشرفته، پسرفته و مرکزی منطقه اغتشاش یافته




**شکل 18** مقادیر میانگین میکروسختی ویکرز نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 4، نمونه 9، نمونه 10

یکسان پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه با سرعت پیشروی ابزار 125 میلیمتر در دقیقه، اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 10 بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 4 بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که انرژی اعمال شده از ارتعاشات التراسونیک در نمونه 10 باعث تشدید اغتشاشات در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک در مقایسه با تولید نانوکامپوزیت نمونه 4 توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده گردیده است.

از سوی دیگر، مشاهده می‌شود که مقدار متوسط میکروسختی نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 9 و نمونه 10 تقریباً برابر با یکدیگر بدست آمده است. نتایج بدست آمده برای میکروسختی نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 9 و نمونه 10 با نتایج بدست آمده از الگوهای پراش اشعه ایکس این نمونه‌ها تطابق خوبی را نشان می‌دهد؛ زیرا هر دوی آنها نشان‌دهنده میزان اغتشاش ایجاد شده یکسان در نانوکامپوزیت‌های نمونه 3، نمونه 9 و نمونه 10 می‌باشند.

پدیده اثر نامحسوس ارتعاشات التراسونیک بر روی میزان اغتشاش ایجاد شده و میکروسختی نمونه‌های 3 و 9 را می‌توان به میزان سرعت پیشروی ابزار در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ربط داد. با توجه به نتایج بدست آمده از کار تحقیقاتی رویلین و همکارانش در سال 2014 [2]، در سرعت‌های پیشروی پایین (150 میلیمتر بر دقیقه)، اغتشاش و در نتیجه دمای ناحیه اغتشاشی در هر دو فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده و فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک تقریباً نزدیک به هم بوده و ارتعاشات التراسونیک اثر محسوسی بر اغتشاش و در نتیجه دمای ناحیه اغتشاشی نداشته است.

از اینرو، با توجه به استفاده از سرعت پیشروی پایین برای تولید نمونه‌های 3 و 9 به دلیل محدودیت توان موتور پیشروی دستگاه، ماکزیمم اغتشاش ممکن توسط ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ایجاد گردیده و در نتیجه، افزایش بیشتر اغتشاش خارج از توان ارتعاشات التراسونیک بوده است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، توزیع نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس نایلون 6 همگن‌تر گردیده و در نتیجه سختی سطحی نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد.

## 4- جمع‌بندی

در این مطالعه، روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی اصلاح شده‌ای برای توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس پلیمری نایلون 6 ارائه گردید. به منظور تسهیل فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و افزایش تأثیر و بازدهی آن، از طرح ابزار فرآیند اصطکاکی اغتشاشی اصلاح شده، استفاده گردید. آزمایشات متعددی برای دستیابی به بازه مناسبی از پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار) صورت گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل خروجی آزمایشات را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- از بررسی کیفیت ظاهری نانوکامپوزیت‌های تولیده شده می‌توان دریافت که تولید گرما در سرعت دورانی پایین (1250 دور در دقیقه) برای افزایش دمای ماتریس نایلون 6 تا دمای انتقال شیشه نایلون 6 و در نتیجه نرم کردن آن کافی نیست. بنابراین، ماتریس نایلون 6 در طول فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، رشته رشته گردیده و فرآیند تولید نانوکامپوزیت موفقیت آمیز نخواهد بود. از سوی دیگر، تولید گرما در سرعت دورانی بالا (2500 دور در دقیقه) بسیار بالا بوده و منجر به ذوب ماتریس نایلون 6 می‌گردد. لذا، به دلیل سیالیت بالای مذاب ماتریس نایلون 6، فرآیند اصطکاکی اغتشاشی خارج از کنترل گشته و روند مخلوط‌سازی نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس موفقیت آمیز نخواهد بود.
- با بررسی الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه‌های نانوکامپوزیتی می‌توان دریافت که پیک در زاویه $2\theta=25°$ برای نانولوله‌های کربنی چند دیواره خالص مشاهده می‌شود که در الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های نانوکامپوزیتی دیده نمی‌شود. این امر نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی چند دیواره به شکلی مناسب در ماتریس نایلون 6 در نمونه‌های نانوکامپوزیتی پراکنده شده است.
- از سوی دیگر، وجود کریستال‌های فاز آلفا در نایلون 6 باعث انعکاس در زوایای تقریبی $2\theta=20°$ و $2\theta=24°$ در نایلون 6 خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیتی گردیده است. شدت پیک‌های فاز آلفا برای نایلون 6 خالص بیشتر از شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 4 است. همچنین، شدت پیک فاز آلفای بدست آمده از نمونه 4 بیشتر از نمونه 3 است.این پدیده نشان می‌دهد که اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 3 بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 4 است.
- همچنین، بیشتر بودن شدت پیک‌های فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 4 از شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 10 نشان دهنده این است که با وجود تولید هر دو نانوکامپوزیت با ترکیب یکسان پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی 2000 دور در دقیقه با سرعت پیشروی ابزار 125 میلیمتر در دقیقه، اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 10 بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 4 است. بنابراین انرژی اعمال شده از ارتعاشات التراسونیک در نمونه 10 باعث تشدید اغتشاشات در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک در مقایسه با تولید نانوکامپوزیت نمونه 4 توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده گردیده است.
- کاهش شدت پیک‌های فاز آلفا به دلیل افزایش اغتشاش مرتبط با شکسته شدن کریستال‌های فاز آلفا به کریستال‌های با اندازه کوچکتر در اثر بیشتر شدن اغتشاش و همچنین کاهش هسته‌های جوانه زنی نامتجانس کریستال‌های فاز آلفا است. از یک سو، افزایش اغتشاش در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش شکسته شدن کریستال‌های فاز آلفا گردیده و در نتیجه اندازه این کریستال‌ها کاهش می‌یابد. کاهش اندازه کریستال‌های فاز آلفا باعث افت شدت پیک الگوی پراش اشعه ایکس آن می‌گردد. از سوی دیگر، نانولوله‌های کربنی چند دیواره به عنوان هسته‌های جوانه‌زنی نامتجانس کریستال‌های فاز آلفا

محسوب می‌گردد. با افزایش اغتشاش ایجاد شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، توزیع نانولوله‌های کربنی چند دیواره در ماتریس همگن‌تر شده و از اینرو کریستال‌های فاز آلفا ریزتر خواهند گردید. از این رو، جوانه زنی و رشد کریستال‌های فاز آلفا به ترتیب افزایش و کاهش یافته و در نتیجه شدت پیک‌های فاز آلفا کاهش می‌یابد.

- از سوی دیگر، شدت پیک‌های فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 3 بیشتر از شدت پیک فاز آلفا برای نانوکامپوزیت نمونه 9 است. اما میزان افت شدت پیک در این مورد بسیار کمتر از میزان افت شدت پیک نانوکامپوزیت نمونه 4 در مقایسه با نانوکامپوزیت نمونه 10 است. این پدیده نشان دهنده این است که با وجود تولید هر دو نانوکامپوزیت با ترکیب یکسان پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شامل 2000 دور در دقیقه سرعت دورانی با 100 میلیمتر در دقیقه سرعت پیشروی ابزار، اغتشاش ایجاد شده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت نمونه 9 کمی بیشتر از نانوکامپوزیت نمونه 3 بوده است. اما میزان افزایش اغتشاش در این مورد بسیار کمتر از میزان افزایش اغتشاش در حین تولید نانوکامپوزیت نمونه 10 در مقایسه با نانوکامپوزیت نمونه 4 است. بنابراین انرژی اعمال شده از ارتعاشات التراسونیک در نمونه 9 باعث تشدید اغتشاشات در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به کمک التراسونیک در مقایسه با تولید نانوکامپوزیت نمونه 3 توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی ساده گردیده است.

## 5- مراجع


[1] Y. Bozkurt, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets, *Mater Des,* Vol. 35, No. 1, pp. 440–445, 2012.

[2] L. Ruilin, H. Diqiu, L. Luocheng, Y. Shaoyong, Y. Kunyu, A study of the temperature field during ultrasonic-assisted friction-stir welding, *Int J Adv Manuf Technol,* DOI 10.1007/s00170-014-5813-8, 2014.

[3] S. Amini, M. R. Amiri, Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding, *Int J Adv Manuf Technol,* Vol. 73, No. 1, pp. 127–135, 2014.

[4] A. Arici, S. Selale, Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene, *Sci Technol Weld Joi,* Vol. 12, No. 1, pp. 536–539, 2007.

[5] A. Arici, T. Sinmaz, Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. *J Mater Sci,* Vol. 40, No. 1, pp. 3313–3316, 2005.

[6] M. Aydin, Effects of welding parameters and pre-heating on the friction stir welding of UHMW-polyethylene, *Polym Plast Technol Eng,* Vol. 49, No. 1, pp. 595–601, 2010.

[7] A. Mostafapour, E. Azarsa, A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: investigating microstructure, tensile and flexural properties, *Int J Phys Sci,* Vol. 7, No. 4, pp. 647–54, 2012.

[8] A. Rezgui, M. Ayadi, A. Cherouat, K. Hamrouni, A. Zghal, S. Bejaoui, Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene. *EPJ Web Conf,* Vol. 6, pp. 1–8, 2010.

[9] S. Saeedy, M. Givi, Investigation of the effects of critical process parameters of friction stir welding of polyethylene, *Proc Inst Mech Eng, Part B: J Eng Manuf,* Vol. 225, No. 8, pp. 1305–10, 2011.

[10] E. Squeo, F. Quadrini, *Friction stir welding of polyethylene sheets*. The Annals of DUNAˇREA DE JOS University of Galati Fascicle V. Technologies in Machine Building, ISSN 1221-4566, 2009.

[11] M. Rezgui, A. Trabelsi, A. Ayadi, K. Hamrouni, Optimization of friction stir welding process of high density polyethylene, *Int J Prod Qual Eng,* Vol. 2, No. 1, pp. 55–61, 2011.

[12] Z. Kiss, T. Czigany, Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene, *Express Polym Lett,* Vol. 6, No. 1, pp. 54–62, 2012.

[13] Z. Kiss, T. Czigany, Applicability of friction stir welding in polymeric materials, *Periodica Polytech, Mech Eng,* Vol. 51, No. 1, pp. 15–8, 2007.

[14] K. Panneerselvam, K. Lenin, Effects and defects of the polypropylene plate for different parameters in friction stir welding process, *Int J Res Eng Technol,* Vol. 2, No. 2, pp. 143–52, 2013.

[15] A. Bagheri, T. Azdast, A. Doniavi, An experimental study on mechanical properties of friction stir welded ABS sheets. *Mater Des,* Vol. 43, No. 1, pp. 402–9, 2013.

[16] Z. Kiss, T. Czigany, Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly (ethylene-terephthalateglycol), *J Appl Polym Sci,* Vol. 125, No. 1, pp. 2231–8, 2012.

[17] K. Panneerselvam, K. Lenin, Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile, *Mater Des,* Vol. 53, No. 1, pp. 302–7, 2014.

[18] M. Bilici, A. Yukler, Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets,*Mater Des,* Vol. 33, No. 1, pp. 145–52, 2012.

[19] M. Bilici, A. Yukler, M. Kurtulmus, The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, *Mater Des,* Vol. 32, No. 1, pp. 4074–9, 2011.

[20] M. Bilici, A. Yukler, Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, *Mater Des,* Vol. 33, No. 1, pp. 545-50, 2012.

[21] M. Bilici, Effect of tool geometry on friction stir spot welding of polypropylene sheets, *Express Polym Lett,* Vol. 6, No. 10, pp. 805–13, 2012.

[22] S. Mert, A. Arici, Design of optimal joining for friction stir spot welding of polypropylene sheets, *Sci Technol Weld Joi,* Vol. 16, No. 6, pp. 522–7, 2011.

[23] A. Arici, Friction stir spot welding of polypropylene. *J Reinf Plast Compos,* Vol. 27, No. 18, pp. 2001–4, 2008.

[24] P. Oliveira, S. Amancio-Filho, J. Santos, E. Hage, Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA, *Mater Lett,* Vol. 64, No. 1, pp. 2098–101, 2010.

[25] N. Mahmood, M. Islam, A. Hameed, S. Saeed, Polyamide 6/Multiwalled Carbon Nanotubes Nanocomposites with Modified Morphology and Thermal Properties, *Polymer,* Vol. 5, No. 1, pp. 1380-91, 2013.

[26] N. Mahmood, M. Islam, A. Hameed, S. Saeed, A.N. Khan, Polyamide-6 based composites reinforced with pristine or functionalized multi-walled carbon nanotubes produced using melt extrusion technique, *Journal of Composite Materials,* DOI: 10.1177/0021998313484779, 2013.