

## Research Paper

# Investigating the simultaneous role of clay nanoparticles and strain rate on the tensile behavior of polyethylene matrix nanocomposite

Mostafa Abbaszadeh Valojerdi <sup>1</sup>, Seyed Mojtaba Zebarjad<sup>2\*</sup>, Mohammad Hadi Moghim<sup>3</sup>

1-MSc graduated of Materials Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Engineering Faculty, Shiraz University, Shiraz, Iran

2-Prof. of Materials Science and Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Engineering Faculty, Shiraz University, Shiraz, Iran

3-Assistant prof. of Materials Science and Engineering, Department of Energy Storage, Institute of Mechanics, Shiraz, Iran

Received: 2023/07/24

Revised: 2023/09/14

Accepted: 2023/10/14

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2023.32180.2005](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.32180.2005)

### Keywords:

Polyethylene, Clay, Strain Rate, Tensile Behavior

### Abstract

**Introduction:** In this research, the tensile behavior of polyethylene matrix nanocomposites reinforced with different percentages of clay nanoparticles (0, 1, 3, 5 and 10) at two strain rates (0.1 and 0.5 min<sup>-1</sup>) and two different temperatures (25 and 50 degrees Celsius) has been investigated.

**Methods:** For this purpose, standard samples were prepared using injection molding method. Also, the fracture surface of the deformed samples along with the side surface of the stretched samples were examined using scanning electron microscope and light microscope, respectively.

**Findings:** The results obtained from the tensile test showed that the tensile properties of polyethylene strongly depend on the content of nano clay. Examining the Eyring model showed that the addition of clay nanoparticles up to 10 wt% causes to increase the amount of enthalpy changes from 64.97 to greater than 100 kJ/mol and activation volume from 0.0049 to 0.01.

**Citation:** Mostafa Abbaszadeh Valojerdi, Seyed Mojtaba Zebarjad, Mohammad Hadi Moghim, Investigating the simultaneous role of clay nanoparticles and strain rate on the tensile behavior of polyethylene matrix nanocomposite. Quarterly Journal of New Materials. 2023; 13 (50): 33-45.

\*Corresponding author: Seyed Mojtaba Zebarjad

**Address:** Department of Materials Science and Engineering, Engineering Faculty, Shiraz University, Shiraz, Iran.

**Tell:** +989173156240

**Email:** [mojtabazebarjad@shirazu.ac.ir](mailto:mojtabazebarjad@shirazu.ac.ir)

## Extended Abstract

### Introduction

In order to improve the physical and mechanical properties of polyethylene, it is very common to add some reinforcements such as clay to it. Clay is one of the most important reinforcements to add to different polymers, which has led to the production of a new class of materials called polymer-clay composites. Based on the research, it seems that the simultaneous effect of temperature and weight percentage of clay on the deformation behavior of polyethylene and the parameters of the Eyring model have not been investigated. For this reason, in this research, an attempt has been made to fill this research gap

### Findings and Discussion

For this purpose, standard samples were prepared using injection molding method. Also, the fracture surface of the deformed samples along with the side surface of the stretched samples were examined using scanning electron microscope and light microscope, respectively. The results obtained from the tensile test showed that the tensile properties of polyethylene strongly depend on the content of nano clay. Examining Eyring's model showed that the addition of clay nanoparticles increased the amount of enthalpy changes and activation volume, and this process continued until a constant value was reached. The results of microscopic evaluation showed the strong role of clay nanoparticles in the activation of shear bands during the deformation of polyethylene.

### Conclusion

The results show that the addition of clay nanoparticles causes a decrease in the elongation at break and an increase in yield strength and Young's modulus.

- By examining Eyring's model on pure and nanocomposite samples, it is found that with increasing weight percentage of clay nanoparticles, enthalpy increases, which is related to decreasing the mobility of polymer chains and increasing the yield stress.

### Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### Funding

No funding.

### Authors' contributions

Conducting experiments: Mostafa Abbaszadeh Valojerdi

Data analysis: Mohammad Hadi Moqim, Seyed Mojtabi Zobarjad

Final writing: Mohammad Hadi Moqim, Seyed Mojtabi Zabarjad

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## بررسی نقش همزمان نانو ذرات خاک رس و نرخ کرنش بر رفتار کششی نانوکامپوزیت زمینه پلی اتیلن

مصطفی عباسزاده ولوجردی<sup>۱</sup>، سید مجتبی زبرجد<sup>۲\*</sup>، محمد هادی مقیم<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- استادیار، پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی، شیراز، ایران

## چکیده

**مقدمه:** به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلی اتیلن افزودن برخی تقویت کننده‌ها مانند خاک رس به آن بسیار رایج است. خاک رس به عنوان یکی از مهمترین تقویت کننده‌ها جهت افزودن به پلیمرهای مختلف می‌باشد که منجر به تولید دسته جدیدی از مواد به نام کامپوزیت‌های پلیمر-خاک رس شده است.

**روش:** در تحقیق حاضر، رفتار کششی نانو کامپوزیت‌های زمینه پلی اتیلن تقویت شده با درصدهای مختلف نانو ذرات خاک رس از نوع مونت موریلونیت (۰، ۱، ۳، ۵ و ۱۰) در دو نرخ کرنش (۰/۱ و  $0/5 \text{ min}^{-1}$ ) و دو دمای متفاوت (۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های استاندارد با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی تهیه شدند. همچنین سطح شکست نمونه‌های تغییر شکل یافته به همراه سطح جانبی نمونه‌های کرنش یافته به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج به دست آمده از آزمایش کشش نشان داد که خواص کششی پلی اتیلن به مقدار نانو خاک رس و وابستگی دارد. به طوری که با افزایش نانو خاک رس تا ۱۰ درصد وزنی استحکام تسلیم از ۲۴ به ۲۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. بررسی مدل ایرینگ نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات خاک رس تا ۱۰ درصد وزنی، باعث افزایش میزان تغییرات آنتالپی از ۶۴/۹۷ به بالاتر از ۱۰۰  $\text{kJ/mol}$  و حجم فعال سازی از ۰/۰۴۹ به ۰/۰۱ می‌شود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج ارزیابی میکروسکوپی بیانگر نقش پررنگ نانو ذرات خاک رس در فعال شدن باندهای برشی در حین تغییر شکل پلی اتیلن می‌باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2023.32180.2005](https://doi.org/10.30495/jnm.2023.32180.2005)

## واژه‌های کلیدی:

پلی اتیلن، خاک رس، نرخ کرنش، رفتار کششی.

\* نویسنده مسئول: سید مجتبی زبرجد

نشانی: بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تلفن: ۰۹۱۷۳۱۵۶۲۴۰

پست الکترونیکی: [mojtabazbarjad@shirazu.ac.ir](mailto:mojtabazbarjad@shirazu.ac.ir)

## مقدمه

پلی اتیلن (PE) از جمله پلیمرهای پرمصرف و مهم محسوب می‌شود، زیرا علاوه بر داشتن خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً مناسب، از نظر شیمیایی نیز خنثی است. این ویژگی‌ها در کنار قیمت پایین و فرایند پذیری خوب باعث شده است که از پلی اتیلن در کاربردهای گسترده و متنوع استفاده شود. خواص فیزیکی و مکانیکی پلی اتیلن از ماهیت نیمه بلورین آن نشأت می‌گیرد و بیشتر خواص آن تحت تأثیر ترکیب نواحی بلورین و آمورف آن است. علیرغم خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً مناسب، ناپایداری ابعادی پلی اتیلن تحت تنش بویژه در زمان‌های طولانی و دمای بالا باعث شده است که این پلیمر از پلیمرهای مهندسی جدا شده و تنها در کاربردهای کوتاه مدت یا کاربردهای بدون تنش‌های بحرانی مورد استفاده قرار گیرد [۱]. به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پلی اتیلن افزودن برخی تقویت کننده‌ها مانند خاک رس به آن بسیار رایج است. خاک رس به عنوان یکی از مهمترین تقویت کننده‌ها جهت افزودن به پلیمرهای مختلف می‌باشد که منجر به تولید دسته جدیدی از مواد به نام کامپوزیت‌های پلیمر-خاک رس شده است. ذرات خاک رس اغلب برای بهبود استحکام، افزایش خواص حرارتی و تغییر در رسانایی به پلیمر اضافه می‌شوند [۲]. در حقیقت علت استفاده از کامپوزیت پلیمر/خاک رس، ایجاد یا بهبود خواصی است که در حالت عادی در ماده زمینه به تنهایی وجود ندارد. اما در بسیاری مواقع در ازای ایجاد یا بهبود این خواص ممکن است تعدادی دیگر از خواص مطلوب ماده تضعیف شوند. به بیان دیگر، عموماً با استفاده از پرکننده‌هایی با مدول یانگ بالا در کامپوزیت، اگرچه استحکام ماده موردنظر افزایش می‌یابد، اما سبب کاهش چقرمگی می‌گردد. نانو کامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌ها این مزیت را دارند که با افزودن آنها می‌توان مدول یانگ، استحکام و چقرمگی را به طور همزمان بهبود بخشید [۳]. این ویژگی از مزیت‌های برتری نانوکامپوزیت‌ها بر کامپوزیت محسوب می‌شود. این رفتار در نانوکامپوزیت‌ها به واسطه نسبت سطح به حجم زیاد و اندازه کوچک پرکننده‌های نانویی می‌باشد. از دلایل جذابیت نانورس به عنوان نانو افزودنی می‌توان به ساختار لایه‌ای آن و سطح ویژه بالای ناشی از این ساختار، ارزان و در دسترس بودن آن، امکان تغییر بعد نانومتری، خواص ویژه در شرایط عامل دار و ظرفیت تبادل یونی بالا اشاره کرد [۴].

نرخ کرنش اثر پیچیده‌ای روی فرآیند تغییر شکل PE دارد [۵]. زیرا انرژی مصرف شده در حین تغییر شکل مومسان به صورت حرارت به هدر می‌رود. این پدیده در نرخ کرنش‌های بالاتر بیشتر مشهود است، زیرا در نرخ کرنش‌های پایین، کشش به صورت هم دما انجام می‌گیرد. در حالیکه در نرخ کرنش‌های بالاتر این پدیده به صورت آدیاباتیکی است [۶-۹]. طور کلی، به دلیل ناهمگن بودن (در حالت گلوبی) تغییر شکل مومسان پلیمرهای نیمه بلورین مانند پلی اتیلن و پلی پروپیلن، بررسی رفتار شکل پذیری این گونه مواد تنها براساس نمودار تنش-کرنش مهندسی دشوار است و باید از ارزیابی‌های میکروسکوپی و مدل‌های موجود مانند مدل ایرینگ نیز سود جست.

رفتار تسلیم PE شدیداً به نرخ کرنش حساس است و همچنین این وابستگی به دما نیز ارتباط دارد. مدل سیلان ایرینگ اثر دما و نرخ کرنش را روی تنش سیلان و بر اساس مدل مولکولی بررسی می‌نماید. اساس این نظریه این است که در پلیمر، بخشی از یک زنجیره بزرگ باید یک سد انرژی را در حرکت از یک موقعیت به موقعیت دیگر پشت سر بگذارد [۱۰]. با توجه به این مدل، با اعمال تنش به پلیمر، زنجیره‌های پلیمری از سد انرژی عبور کرده و به یک مکان جدید حرکت می‌کنند. معادله (۱) که به معادله ایرینگ شهرت دارد، ارتباط بین تنش سیلان و سد انرژی را به صورت تابعی از دما و نرخ کرنش نمایش می‌دهد.

$$\left(\frac{\sigma_y}{T}\right) = \left(\frac{2}{V^*}\right) \left[\left(\frac{\Delta H}{T}\right) + 2.303R \log\left(\frac{\dot{\epsilon}_y}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right] \quad (1)$$

در این معادله  $\sigma_y$  تنش تسلیم،  $T$  دمای آزمون برحسب درجه کلوین،  $V^*$  حجم فعال سازی،  $\Delta H$  آنتالپی فعال سازی،  $\dot{\epsilon}_y$  نرخ کرنش در نقطه تسلیم،  $\dot{\epsilon}_0$  مقداری ثابت و  $R$  ثابت گازها است. حجم فعال سازی یک پارامتر کلیدی از ماده است که اطلاعاتی در مورد مکانیزم کرنش مواد ارائه می‌دهد. شیب  $\frac{\sigma_y}{T}$  برحسب لگاریتم  $\dot{\epsilon}_y$  وابسته به حرکت المان‌های ماده و دما می‌باشد که توسط معادله (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{d\left(\frac{\sigma_y}{T}\right)}{d \log \dot{\epsilon}_y} = \frac{2 \cdot 2.303 \cdot R}{V^*} \quad (2)$$

داساری و همکارش [۸] مدل ایرینگ را برای پلی اتیلن چگالی بالا و پلی پروپیلن مورد بررسی قرار دادند. با بررسی این مدل، نشان دادند که حجم فعال سازی و سیلان مومسان وابسته به حرکت زنجیره‌های پلیمری می‌باشد. در تحقیقی دیگر، ژو و همکارانش در سال ۲۰۰۵ [۱۱] دریافتند که اضافه کردن تالک به پلی پروپیلن، حجم فعال سازی را افزایش می‌دهد. همچنین، با افزایش حجم فعال سازی، تنش تسلیم افزایش می‌یابد که مرتبط با محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری در بین لایه‌های خاک رس می‌باشد. مقیم و همکارانش [۱۲]، تأثیر نرخ کرنش بر خواص کششی پلی یورتان با استفاده از مدل ایرینگ را بررسی نمودند. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش نرخ کرنش استحکام کششی و مدول الاستیک نمونه‌ها به ترتیب بیش از ۸۰ و ۳۰۰ درصد افزایش یافته و این در حالی است که کرنش شکست پلی یورتان تا بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. با بررسی تصاویر میکروسکوپی مشخص است که با افزایش نرخ کرنش، سطح شکست نمونه‌ها به سمت شکست ترد میل می‌کند. در انتها نیز با استفاده از روابط مدل ایرینگ، آنتالپی فعال سازی  $45.49 \text{ kJ/mol}$  محاسبه گردید که نتیجه جدیدی برای پلی یورتان گرماسخت به حساب می‌آید [۱۲]. فرجام فر و همکارانش [۱۳]، نقش نانوذرات هیدروکسی آپاتیت (HA) و نرخ کرنش را روی رفتار کشش PMMA بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که افزودن HA به پلیمر مذکور و همچنین افزایش درصد وزنی آن، باعث کاهش استحکام کششی، کاهش مدول کششی و کاهش در میزان چقرمگی در نمونه‌ها شد. افزایش درصد HA همچنین باعث افزایش حساسیت نمونه‌ها به نرخ کرنش شد. مقدار انرژی فعال سازی ( $\Delta H$ ) لازم جهت نوسان زنجیره‌ها و همچنین حجم فعال زنجیره‌ها ( $V^*$ ) در آزمون کشش، با افزایش در صد وزنی HA کاهش یافت. مکانیزم

به منظور تولید نمونه‌های کامپوزیتی از پلی‌اتیلن خالص با درصد‌های متفاوتی از خاک رس (۰، ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) از اکسترودر دو مارپیچه در محدوده دمایی ۲۰۰ الی ۲۳۰ درجه استفاده شد. همچنین جهت تولید نمونه‌های استاندارد از روش قالب گیری تزریقی و با استفاده از دستگاه تزریق و در محدوده دمایی ۲۲۰ الی ۲۳۰ استفاده گردید.

## ۲-۲ بررسی خواص نمونه‌ها

### ۲-۲-۱ آزمون کشش

نمونه‌های استاندارد آزمون کشش بر اساس ASTM D638 تهیه گردید. سپس نمونه‌ها در دو نرخ کرنش ( $0.1 \text{ min}^{-1}$  و  $0.5 \text{ min}^{-1}$ ) و در دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد تحت آزمون کشش قرار گرفتند. دستگاه کشش مورد استفاده در این آزمون دستگاه کشش تک محوری مدل SANTAM STM-150 بوده است.

### ۲-۲-۲ ارزیابی میکروسکوپی

برای مشاهده سطح جانبی و به منظور بررسی مناطق تحت تاثیر تنش-های برشی از میکروسکوپ نوری مجهز به نور پلاریزه مدل Union ukz-TR 6v-10w ساخت کشور ژاپن استفاده شد. همچنین مشاهده سطوح مقاطع شکست نمونه‌ها و به منظور مشاهده رفتار شکست پلی-اتیلن و کامپوزیت‌های آن از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leica Cambridge S360 ساخت انگلستان با ولتاژ شتاب دهنده ۲۰ کیلو ولت و فاصله کاری ۹-۱۲ میلی متر استفاده شد. قبل از مشاهده، نمونه‌ها توسط دستگاه پوشش دهی Polaron SC7640 ساخت کشور انگلستان، پوشش نقره داده شدند.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱ آزمون کشش

شکل‌های (۱) تا (۴) منحنی-های تنش-کرنش نمونه‌های پلی‌اتیلن و کامپوزیت‌های آن در دو نرخ کرنش و دمای متفاوت را نشان می‌دهند. با نگاه دقیق به منحنی‌های تنش-کرنش مذکور می‌توان دریافت که چهار ناحیه مجزا به شرح زیر قابل مشاهده است. ناحیه الاستیک، که در آن تنش به صورت خطی با کرنش افزایش می‌یابد. منطقه شروع تسلیم، که محلی است که در آن  $d\sigma/d\varepsilon = 0$  می‌باشد. ناحیه کار نرمی، که در آن تنش با افزایش کرنش کاهش می‌یابد و ناحیه کشش سرد، که در آن تغییر شکل مومسان در تنش ثابت انجام می‌گیرد.

نمونه‌ی PE خالص، در نقطه تسلیم چون تغییرات تنش به کرنش صفر می‌باشد، شروع به گلوبی شدن می‌کند و افزایش کرنش باعث می‌شود که ناحیه گلوبی گسترش یابد و به جای اینکه تغییر شکل در ناحیه گلوبی متمرکز شود، به نواحی خارج از آن گسترش می‌یابد. در حقیقت در ابتدای تغییر شکل، با اعمال تنش به ماده، زنجیره‌های پلیمری در راستای اعمال نیرو قرار می‌گیرند. در این حالت اصطکاک استاتیکی به وجود آمده باعث لغزیدن زنجیره‌ها روی هم و کشیده شدن آنها می‌گردد. پیوند بین زنجیره‌های پلیمری از نوع پیوند ضعیف واندروالس می‌باشد که با اعمال تنش، این پیوند مولکولی در نقطه تسلیم شکسته

شکست PMMA در آزمون کشش کریزینگ بود که کامپوزیت کردن این پلیمر با HA و همچنین افزودن درصد وزنی HA باعث کم شدن چگالی کریزها و متمرکز شدن آنها در اطراف ذرات HA شد [۱۳]. باقری و همکارانش [۱۰]، نقش نرخ کرنش روی رفتار تغییر شکل پلی‌پروپیلن را مورد نقد قرار دادند. وابسته بودن استحکام تسلیم به نرخ کرنش و تبعیت رفتار پلیمر از معادله ایرینگ تایید گردید. همچنین مشخص شد که آنتالپی با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد [۱۰]. براساس تحقیقات صورت گرفته به نظر می‌رسد تاثیر همزمان دما و درصد وزنی خاک رس روی رفتار تغییر شکل پلی‌اتیلن و پارامترهای مدل ایرینگ مورد بررسی قرار نگرفته است. بدین دلیل در تحقیق حاضر تلاش شده است که این شکاف تحقیقاتی پر شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مواد اولیه مورد استفاده

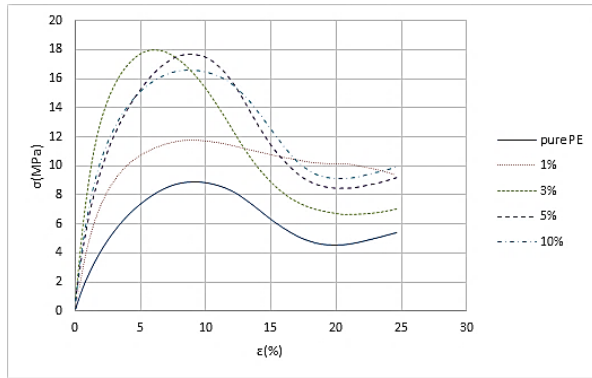
در این تحقیق از پلی‌اتیلن تولید شرکت پتروشیمی اراک با خصوصیات نمایش داده شده در جدول (۱) به عنوان زمینه نانوکامپوزیت استفاده گردید. خاک رس استفاده شده در این تحقیق مونت موریلونیت DK4 از تولیدات شرکت زی آنگ فننگ چین می‌باشد که جزئیات آن در جدول (۲) ارائه شده است.

### جدول ۱- ویژگی پلی‌اتیلن استفاده شده در تحقیق حاضر

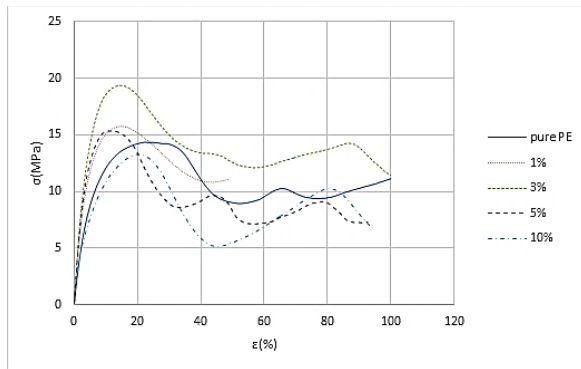
ویژگی	آزمون استاندارد	مقدار
	ASTM	
شاخص جریان مذاب در $230^\circ\text{C}$ و $2/16 \text{ kg (g/10min)}$	D1238/L	۷
دمای نرمی، $10^\circ\text{N}$ ( $^\circ\text{C}$ )	D1525	۱۵۲
HDT ( $0.46 \text{ N/mm}^2$ ) ( $^\circ\text{C}$ )	D648	۸۸

### جدول ۲- خصوصیات خاک رس استفاده شده

ویژگی	مقدار
مونت موریلونیت %	۹۶
سیلیس بلورین %	۱
رطوبت %	۳
چگالی حجمی $\text{g/cm}^3$	۱/۷



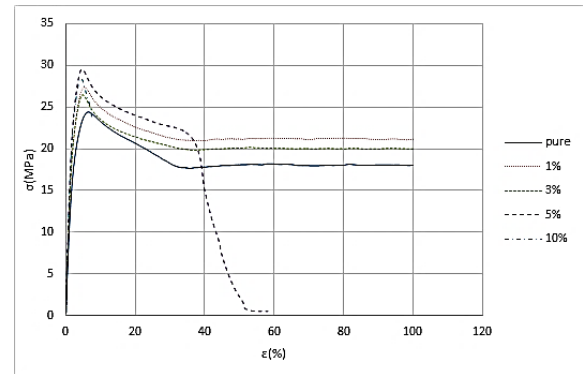
شکل ۳- منحنی تنش-کرنش مربوط به نمونه های PE خالص و نمونه های پلی اتیلنی تقویت شده با ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد خاک رس در دمای ۵۰ °C با نرخ کرنش ۱ min-1



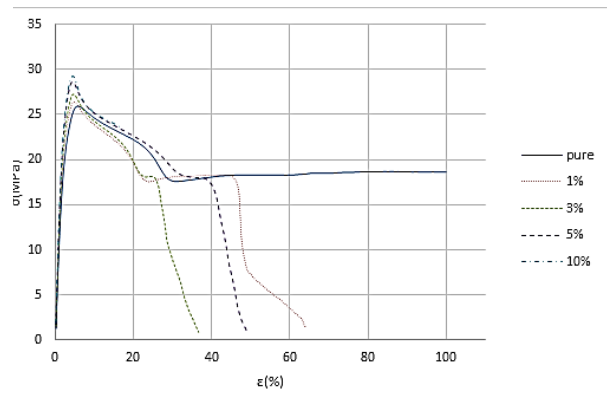
شکل ۴- منحنی تنش-کرنش مربوط به نمونه های PE خالص و نمونه های پلی اتیلنی تقویت شده با ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد خاک رس در دمای ۵۰ °C با نرخ کرنش ۵ min-1

دلیل وابستگی درصد ازدیاد طول به درصد وزنی خاک رس موجود در کامپوزیت به این حقیقت بر می گردد که ذرات خاک رس به دلیل خواص مکانیکی متفاوتی که در مقایسه با زمینه پلیمری دارند، باعث تمرکز تنش در سطح مشترک پلیمر با ذرات پرکننده رس می شوند. تمرکز تنش باعث جدایش ذرات پرکننده از زمینه می گردد و سبب پدید آمدن حفرات می گردد. به هم پیوستن حفره ها باعث ایجاد ترک و شکست نمونه می شود، که نتیجه آن کاهش درصد ازدیاد طول و در مقابل افزایش مدول یانگ و استحکام تسلیم می شود [۴]. به نظر می رسد افزایش درصد نانوذرات خاک رس بیش از ۳ درصد، منجر به کلوخه شدن نانو ذرات و افزایش استحکام کششی نمونه می شود این کلوخه ها ضمن کاهش سطح موثر، به شکل نقاط تمرکز تنش نیز عمل کرده و نمونه دچار شکست زودرس می گردد. کلوخه شدن نانو ذرات، تنش لازم برای جدا کردن آن ها از زمینه را کاهش می دهد. درحقیقت با توجه به ریز بودن ذرات خاک رس، تنش لازم برای جدا شدن آنها از

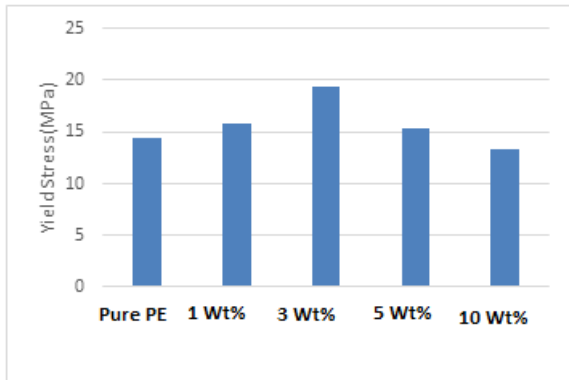
می شود. با ادامه ی تغییر شکل، پیوندهای درون زنجیره های شکسته می شوند. تنش لازم برای حرکت زنجیره های پلیمری، تنش اصطکاکی نام دارد که این تنش سبب شکسته شدن پیوندها شده تا زنجیره ها بتوانند در راستای اعمال نیرو قرار گیرند. با شکسته شدن پیوندها و منظم شدن زنجیره ها، به تدریج نیرو افت می کند و کار نرمی روی می دهد [۱۴ و ۱۵]. افزودن نانو ذرات این تنش را افزایش داده و حرکت این زنجیره ها را مختل می کند. در هر نمونه با افزایش نرخ کرنش در آزمون کشش، درصد ازدیاد طول کاهش و استحکام و مدول یانگ افزایش می یابد. علت وابستگی ازدیاد طول به نرخ کرنش این است که زنجیره های پلیمری که درون ماده به صورت کلاف در هم پیچیده شده اند، در نرخ کرنش کم، فرصت پیدا می کنند که در راستای نیروی اعمال شده قرار بگیرند اما افزایش نرخ کرنش یا کشش سریع باعث قفل شدن زنجیره ها در هم می گردد که این عامل باعث می شود به راحتی در راستای نیروی اعمالی قرار نگیرند.



شکل ۱- منحنی تنش-کرنش مربوط به نمونه های PE خالص و نمونه های پلی اتیلنی تقویت شده با ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد خاک رس در شرایط دمای محیط با نرخ کرنش ۱ min-1



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش مربوط به نمونه های PE خالص و نمونه های پلی اتیلنی تقویت شده با ۱، ۳، ۵ و ۱۰ درصد خاک رس در شرایط دمای محیط با نرخ کرنش ۵ min-1



شکل ۸- مقایسه تنش تسلیم نمونه‌ها در شرایط دمای  $50^{\circ}\text{C}$  با نرخ کرنش  $1\text{-}5/\text{min}$

شکل (۹) رفتار نمونه‌ها در حین تغییر شکل کششی را نشان می‌دهد. به ترتیب از چپ به راست نمونه‌ها از پلی‌اتیلن خالص شروع و به پلی-اتیلن تقویت شده با ۱۰ درصد نانو ذرات خاک رس ختم می‌شوند. کاهش درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی خاک رس مشهود می‌باشد که دلیل عمده آن به توده‌ای شدن ذرات برمی‌گردد. مکانیزم محتمل دیگر در خصوص افزودن نانو ذرات و افزایش چقرمگی ماده بحث کند شدن اشاعه ترک به دلیل برخورد به ذرات نانویی پراکنده شده و اجبار ترک به تغییر مسیر ناگهانی از مسیر اولیه به نواحی اطراف ترک می‌باشد. چون انرژی لازم برای عبور از نانو ذرات به مراتب بیشتر از حرکت در مسیر مستقیم است، این انرژی تامین نشده و به همین سبب رشد استحکام و چقرمگی را در پی دارد. [۱۴-۱۶].

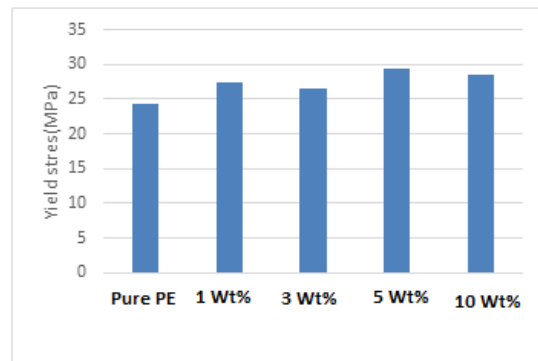


شکل ۹- تصویر بعضی از نمونه‌های کشیده شده در دمای اتاق با نرخ کرنش  $1\text{-}5/\text{min}$

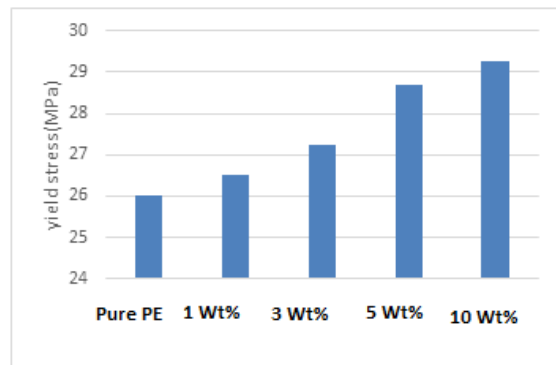
### ۲-۳ بررسی مدل ایرینگ

با انجام آزمون کشش در نرخ کرنش‌های  $1\text{-}5/\text{min}$  و  $1\text{-}1/\text{min}$  در دمای اتاق و با استفاده از معادله ایرینگ، وابستگی تنش سیلان به نرخ کرنش

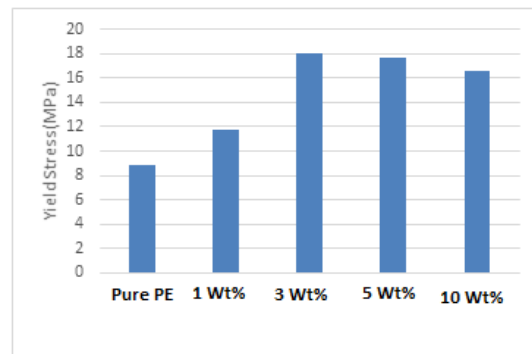
زمینه افزایش می‌یابد، بنابراین تا وقتی که توده‌ای و یا کلوخه‌ای شدن اتفاق نیفتاده باشد، آن‌ها می‌توانند به راحتی تنش‌هایی که از زمینه به آن‌ها منتقل شده است را تحمل نمایند. اشکال (۵) تا (۸) نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های کامپوزیتی در شرایط دمایی و نرخ کرنش متفاوت را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای مقایسه‌ای فوق نتیجه می‌شود که با افزایش دما افت چشمگیری در استحکام تسلیم ظاهر می‌شود. از طرفی رشد استحکام را با افزایش درصد نانو ذرات می‌توان تخمین زد.



شکل ۵- مقایسه تنش تسلیم نمونه‌ها در شرایط دمای اتاق و نرخ کرنش  $1\text{-}1/\text{min}$



شکل ۶- مقایسه تنش تسلیم نمونه‌ها در شرایط دمای اتاق با نرخ کرنش  $1\text{-}5/\text{min}$



شکل ۷- مقایسه تنش تسلیم نمونه‌ها در شرایط دمای  $50^{\circ}\text{C}$  با نرخ کرنش  $1\text{-}1/\text{min}$

تغییرات آنتالپی و حجم فعال سازی افزایش یافته تا به یک مقدار ثابتی برسند تا آنجا که استنباط می شود تا افزودن نانو ذرات به میزان ۳٪ رشد ادامه یافته و پس از آن یک روند ثابتی را در هر دو دمای مورد آزمایش در پیش می گیرد. از آنجا که  $\Delta H$  حاصل از مدل ایرینگ مربوط به غلبه بر انرژی لازم برای حرکت یک مولکول بزرگ از یک موقعیت به موقعیت دیگر است، افزایش  $\Delta H$  با اضافه کردن نانو ذرات خاک رس، نشان دهنده کاهش تحرک زنجیره های پلیمری و افزایش تنش تسلیم می باشد. این نتایج بدست آمده توسط ژو و همکارانش و باقری و همکارانش مطابقت دارد [۹ و ۱۱].

## ۴-۲- ارزیابی های میکروسکوپی

### ۴-۲-۱- بررسی سطوح جانبی

به منظور بررسی خطوط برشی در حین فرآیند کشش و همچنین مشاهده نقش نانو ذرات در تغییر شکل مومسان نمونه ها از میکروسکوپ نوری استفاده شد. شکل (۱۰) این رفتار را برای پلی اتیلن خالص و پلی اتیلن تقویت شده با ۳ و ۱۰ درصد وزنی خاک رس را نمایش می دهد. بر مبنای نتایج بدست آمده این طور به نظر می رسد که نانو ذرات تقویت کننده در مقادیر درصد وزنی بالا به عنوان نواحی تمرکز تنش عمل کرده و منجر به ایجاد تنش موضعی در اطراف خود می شوند. واضح است که سفتی یا مدول الاستیک پلیمر با افزودن ذرات میکرونی یا نانویی می توانند به راحتی افزایش یابند چون به طور کلی ذرات سفت معدنی دارای استحکامی به مراتب بیشتر از زمینه پلیمری هستند. در هر صورت استحکام بستگی زیادی به انتقال تنش بین ذرات و زمینه دارد. برای ذرات با چسبندگی خوب، تنش اعمالی می تواند به طور موثر از زمینه به ذرات انتقال پیدا کند. این مکانیزم به وضوح باعث بهبود استحکام می شود. همانطور که در تصاویر میکروسکوپ نوری قابل مشاهده می باشد یکسری مناطقی تحت عنوان باندهای برشی دیده می شوند که این مناطق قابل تمایز از زمینه می باشند. شدت این باندهای برشی وابسته به میزان تنش اعمالی و مقدار نانو ذرات می باشد. در ابتدا موقعیت باندهای برشی ۴۵ درجه نسبت به راستای اعمال تنش می باشد و در ادامه تغییر شکل در جهات گوناگون (ترجیحا در راستای جهت اعمال تنش) منحرف می شوند [۱۷ و ۱۸].

شکل (۱۱) تصاویر SEM از سطوح جانبی نمونه های کرنش یافته پلی اتیلن خالص و پلی اتیلن تقویت شده با ۳ و ۱۰ درصد وزنی خاک رس را نمایش می دهد. با افزایش مقدار نانو ذرات در زمینه پلیمری مشاهده می شود که مناطق تسلیم برشی با وضوح بیشتری شروع به جدایش از زمینه کرده و سیر تکاملی جدا شدن از منطقه شانه نمونه شروع و تا ناحیه ی گلویی اشاعه می یابد. همچنین واضح است که به دلیل جدایش بین فصل مشترک ذرات و زمینه جوانه زنی باندهای برشی با شدت بیشتری رخ می دهد و فراوانی باندهای برشی در جهات گوناگون بیشتر است. در حقیقت با توجه به این مکانیزم می توان گفت در اثر جدایش، تغییر شکل در اطراف نانو ذرات به میزان بیشتری رخ می دهد.

برای همه ی نمونه ها اعم از خالص و نانوکامپوزیتی، بدست آمد. با توجه به خطی بودن شیب تغییرات  $\frac{\sigma_y}{T}$  بر حسب لگاریتم نرخ کرنش، برای PE خالص و PE تقویت شده با نانو ذرات خاک رس می توان معادله ی زیر را برای خط مورد نظر متصور شد.

$$y = mx + b \quad (3)$$

از شیب خط می توان  $V^*$  بر حسب  $m^3/\text{mole}$  را بدست آورد:

$$m \times 106 = \frac{2 \times 2.303 \times 8.314}{V^*} \quad (4)$$

همچنین با استفاده از عرض از مبدا خط رسم شده می توان آنتالپی را بر حسب  $J/\text{mol}$  بدست آورد:

$$b \times 106 = \frac{2 \times \Delta H}{V^* \times T} \quad (5)$$

جدول (۳) و (۴) نتایج حاصل از مدل ایرینگ را برای نمونه های پلی اتیلن خالص و نانوکامپوزیت های آن را در دماهای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد را نمایش می دهند.

### جدول ۳- نتایج حاصل از مدل ایرینگ نمونه های خالص و نانوکامپوزیتی در دمای ۲۵ °C

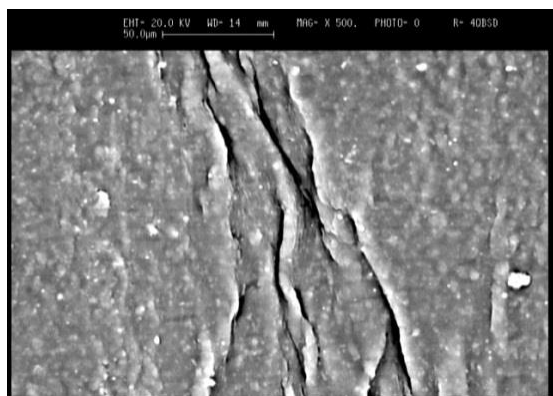
ماده	m	$V^*(\text{m}^3/\text{mol})$	b	$\Delta H(\frac{\text{Kj}}{\text{mol}})$
Pure PE	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۸۹	۶۴/۹۷
PE/1%Clay	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۹	۱۲۲
PE/3%Clay	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹۲	۱۵۱/۵
PE/5%Clay	۰/۰۰۳۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹۷	۱۵۰
PE/10%Clay	۰/۰۰۳۶	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹۹	۱۴۷/۵

### جدول ۴- نتایج حاصل از مدل ایرینگ نمونه های خالص و نانوکامپوزیتی در دمای ۵۰ °C

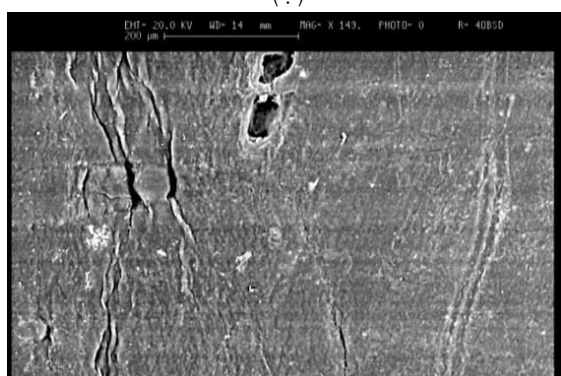
ماده	m	$V^*(\text{m}^3/\text{mol})$	b	$\Delta H(\frac{\text{Kj}}{\text{mol}})$
Pure PE	۰/۰۷۵۴	۰/۰۰۰۵	۰/۱	۸/۰۷۵
PE/1%Clay	۰/۰۶۵	۰/۰۰۰۵	۰/۱۰۱۱	۹/۶۳
PE/3%Clay	۰/۰۴۰۹	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۹۶	۱۴/۵
PE/5%Clay	۰/۰۴۸۴	۰/۰۰۰۸	۰/۱۰۳	۱۳/۱۶
PE/10%Clay	۰/۰۵۶	۰/۰۰۰۷	۰/۱۰۷	۱۱/۷۸

همانطور که از نتایج بدست آمده از بررسی مدل ایرینگ مشاهده می شود، در هریک از نمونه ها با افزودن نانو ذرات خاک رس، میزان





(ب)



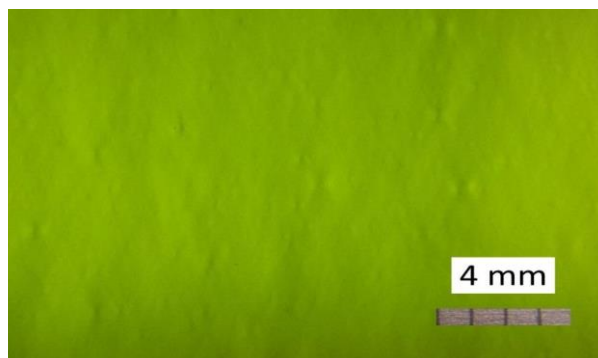
(پ)

شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح جانبی نمونه‌های کرنش یافته الف) PE خالص ب) PE/3%Clay پ) PE/10%Clay (جهت اعمال تنش کششی افقی می‌باشد)

#### ۴-۲-۲- بررسی سطوح مقاطع شکست

به منظور پیش‌بینی و تعیین مکانیزم تغییر شکل مومسان و شکست پلی‌اتیلن و نانو کامپوزیت‌های آن سطوح مقاطع شکست نمونه‌های کشیده شده با نرخ کرنش  $0.5 \text{ min}^{-1}$  بررسی شد. اشکال ۱۲-الف تا ۱۲-پ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی با بزرگنمایی-های متفاوت از سطح مقطع شکست پلی‌اتیلن خالص، پلی‌اتیلن تقویت شده با ۳ و ۱۰ درصد وزنی خاک رس را نمایش می‌دهند. دلیل عمده تفاوت سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با ۱۰ درصد وزنی خاک رس با نمونه‌ای دیگر به رفتار ترد آن که ناشی از توده‌ای شدن نانوذرات است مرتبط می‌باشد.

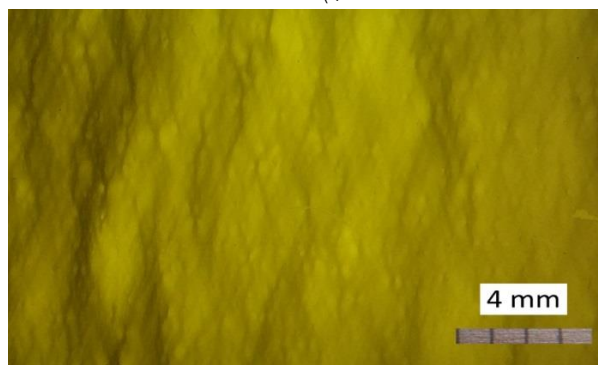
درحقیقت در اطراف ذرات ثانویه، زمینه دچار کشیدگی بیشتر و بخاطر عدم چسبندگی کافی و فصل مشترک ضعیف، حفره‌های کوچک تشکیل و در اثر استمرار تنش این حفره‌ها بزرگتر و به یکدیگر پیوسته و باعث ایجاد حفره‌های بزرگتر شده و در نتیجه تشکیل ترک صورت می‌پذیرد. درحقیقت جهت تشکیل ترک در اطراف ذرات پرکننده می‌توان به مرحله جدایش ذرات از زمینه و تشکیل حفره، کشیده شدن حفره‌ها در راستای جهت اعمال تنش به هم پیوستن حفره‌ها اشاره نمود. در مرحله اول به سبب عدم چسبندگی مناسب بین ذرات خاک رس و زمینه جدایش ایجاد می‌شود. با افزایش تغییر شکل



(الف)

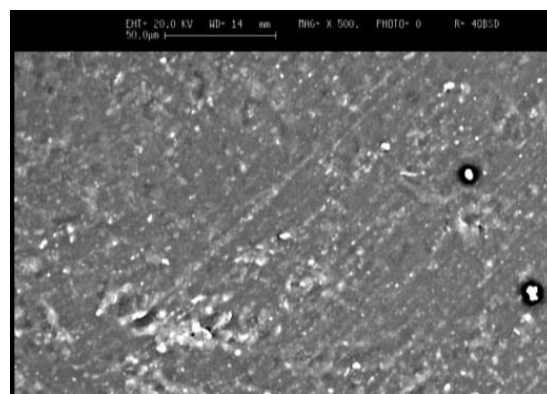


(ب)



(پ)

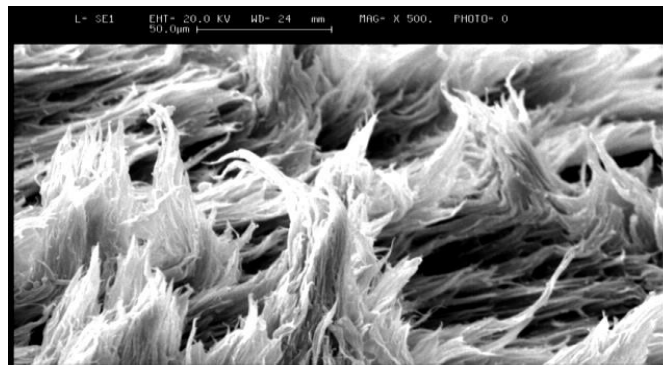
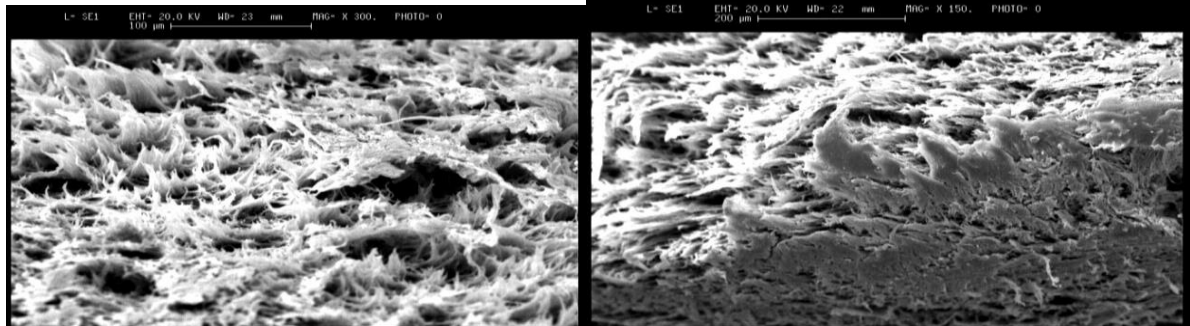
شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ نوری الف) PE خالص ب) PE/3%Clay پ) PE/10%Clay (جهت اعمال تنش کششی افقی می‌باشد)



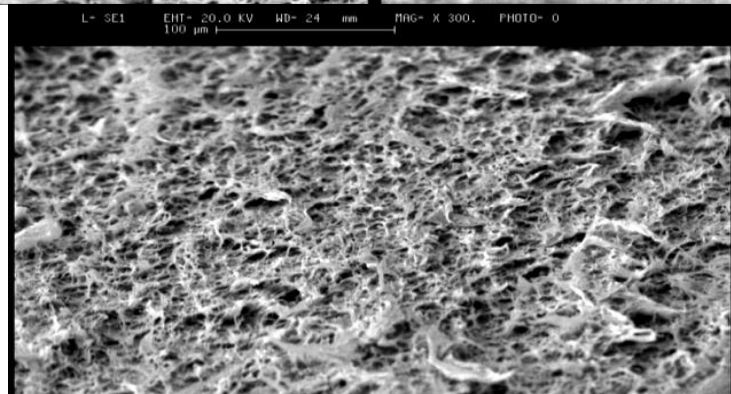
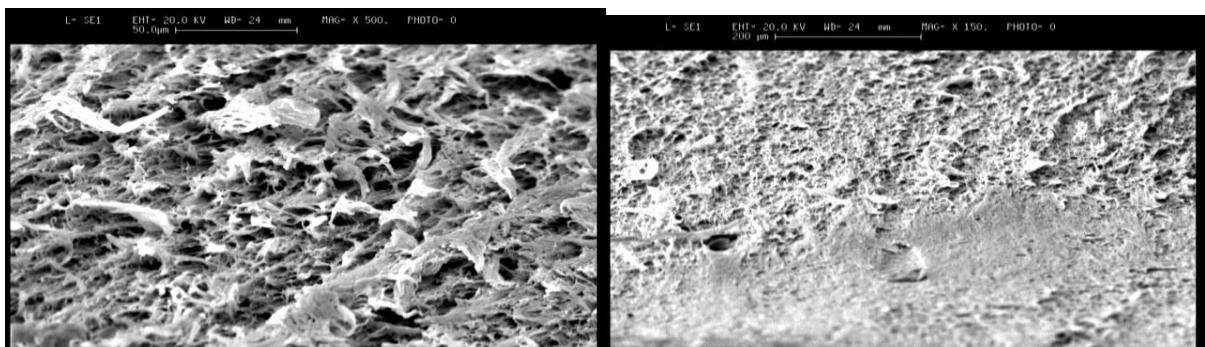
(الف)

سبب پیوستن حفره‌ها به یکدیگر می‌گردد. به هم پیوستن حفره‌ها منشا ایجاد ترک در زمینه و در نهایت شکست نمونه می‌باشد [۱۵] و [۱۹].

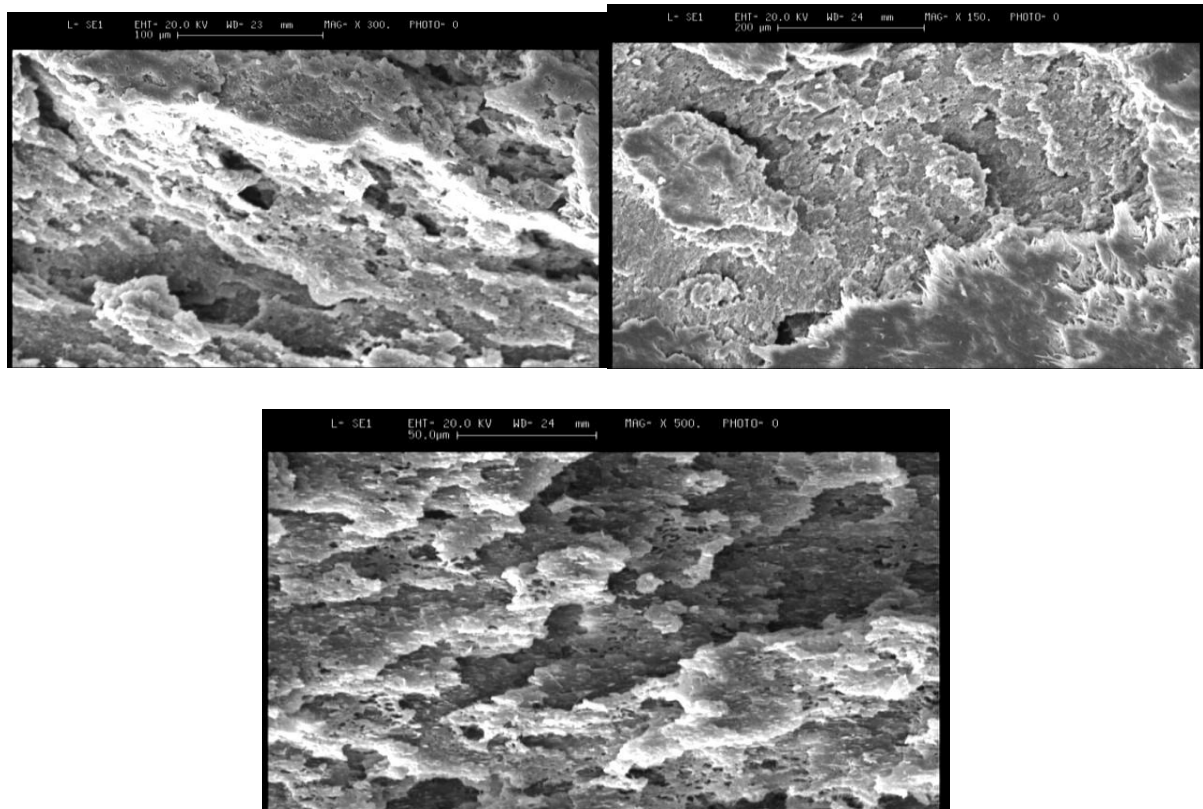
موسمان مرحله دوم آغاز و حفره‌های ایجاد شده در جهت تنش کشیده می‌شوند. در این مرحله حفره‌ها به پایداری ابعادی رسیده و شرایط برای گلویی شدن زمینه مابین آنها مهیا می‌باشد. در مرحله سوم بخاطر ایجاد تنش‌های برشی که با جهت تنش اعمالی زاویه ۴۵ درجه می‌سازند تغییر شکل برشی در زمینه صورت می‌پذیرد. این تغییر شکل



الف



ب



(پ)

شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی متفاوت از سطح مقطع شکست  
الف) Pure PE (ب) PE/3%Clay (پ) PE/10%Clay

### نتیجه گیری

- نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های PE خالص و نانو کامپوزیتی انجام شد و نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو ذرات خاک رس سبب کاهش درصد ازدیاد طول و در مقابل افزایش در استحکام تسلیم و مدول یانگ می‌گردد.
- با بررسی مدل ایرینگ بر روی نمونه‌های خالص و نانو کامپوزیتی مشخص شد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات خاک رس، آنتالپی افزایش می‌یابد که مرتبط با کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمری و افزایش تنش تسلیم می‌باشد.
- نتایج ارزیابی میکروسکوپی نشان می‌دهد که در اطراف ذرات خاک رس، پلی‌اتیلن دچار کشیدگی شدید می‌شود که دلیل آن را به فصل مشترک ضعیف می‌توان نسبت داد.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

انجام آزمایش‌ها: مصطفی عباس‌زاده  
تحلیل داده‌ها و نتایج: محمد هادی مقیم، سید مجتبی زبرجد  
نگارش نهایی: محمد هادی مقیم، سید مجتبی زبرجد

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

## References

- 1- B. Deng, L. Chen, Y. Zhong, X. Li, Z. Wang, "The effect of temperature on the structural evolution of ultra-high molecular weight polyethylene films with pre-reserved shish crystals during the stretching process" *Polymer*, 2023; 267, 125690.
- 2-M. Abareshi, S. M. Zebarjad, E. K. Goharshadi "Study of the morphology and granulometry of polyethylene-clay nanocomposite powders", *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2010; 16, 90-97.
- 3-S. Sahebian, S. M. Zebarjad, S. A. Sajjadi, "The Effect of Temperature and Nano-sized Calcium Carbonate on Tensile Properties of Medium Density Polyethy" *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 2008; 21, 133-140.
- ۴- سید مجتبی زبرجد، الهام کتوئی زاده، نانو کامپوزیت های اپوکسی- رس، ناشر: تخت جمشید شیراز 1399 -
- 5-S. M. Zebarjad, S. A. Sajjadi "On the strain rate sensitivity of HDPE/CaCO<sub>3</sub> nanocomposites" *Materials Science and Engineering: A*, 2008; 475 (1-2), 365-367.
- 6- N. G. McCrum, C. P. Buckley, C.B. Bucknall "Principles of Polymer Engineering" 2003; 2nd Ed., Oxford Science Publications.
- 7- A. Dasari, R. S. K. Misra, "The role of micrometric wollastonite particles on stress whitening behavior of polypropylene composites" *Acta Mater* 2004; 52, 1683-1697.
- 8-A. Dasari, R. D. K Misara, "On strain rate sensitivity of high density polyethylene and polypropylene ," *Material Science and Engineering*, 2003; A358, 356-371.
- ۹- زهرا باقری، سید مجتبی زبرجد، محمد محسن مشکسار " بررسی رفتار حرارتی و مکانیکی نانوکامپوزیت پلی پروپیلن -خاک رس تولید شده به روش نورد محدود شده" دومین همایش فناوری نانو از تئوری تا کاربرد ایران، آبان، اصفهان، ۱۳۹۲.
- ۱۰- زهرا باقری، سید مجتبی زبرجد، محمد محسن مشکسار " بررسی رفتار مکانیکی پلی پروپیلن تحت تاثیر نرخ کرنش متفاوت با استفاد از مدل ایرینگ" دومین همایش بین المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گری ایران، آبان ۱۳۹۲.
- 11- Y. Zhou, V. Rangari, H. Mahfuz, S. Jeelani, P.K. Mallick, "Experimental study on thermal and mechanical behavior of polypropylene, talc/propylene and polypropylene/clay nanocomposites," *Materials Science and Engineering A*, 2005; 402, 109-117.
- ۱۲- محمد هادی مقیم؛ سید مجتبی زبرجد " بررسی تاثیر نرخ کرنش بر خواص کششی پلی یورتان با استفاده از مدل ایرینگ " مواد نوین، دوره ۷، شماره ۲۵، مهر ۱۳۹۵، ۲۳-۳۰.
- 13-M. Farjamfar, S. M. Zebarjad, E. BAhrololoom, R. Bazargan Lari, Effect of strain rate on the tensile properties of PMMA/Hydroxyapatite composite, *Iranian Journal of Materials Forming*, 2023; 2, 35-43.
- 14- k. Saminathan, p. Selvakkumar, n. Nhatnagar, "Fracture studies of polypropylene/nanoclay composite," *polymer testing*, 2008; 27, pp. 453-458.
- ۱۵- سید مجتبی زبرجد، هادی مقیم مقدمه ای بر نانو کامپوزیت های پلیمری، انتشارات یوکابد، چاپ اول تابستان ۱۳۹۴.
- 16- S. M. Zebarjad, S. Golmakanioon. Influence of Strain Rate on the Toughening Effect of CaCO<sub>3</sub> in Polypropylene/CaCO<sub>3</sub> Composites *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2013; 19 (4), 271-275.
- 17- Y. Wang, T. Wu, F. Qiang, "Competition of shearing and cavitation effects on the deformation behavior of isotactic

polypropylene during stretching, *Polymer*, 2023; 273, 125888

18- Z. Chen, B. Xiong, Z. Li, “Cavitation behavior of polypropylene / polyethylene multilayer films during uniaxial tensile deformation: In-situ synchrotron X-ray study” *Polymer*, 2032; 265, 125599.

19-C. Ren, Z. Jiang, X. Du, Y. Men, T. Tang “Microstructure and Deformation Behavior of Polyethylene/Montmorillonite Nanocomposites with Strong Interfacial Interaction” *J. Phys. Chem. B*, 2009; 113(43), 14118–14127.