



## امکان سنجی استفاده از جداکننده‌های باتری سرب-اسید به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌های پلی اتیلنی

علی قاسم خانی<sup>1</sup>، محمدرضا شجاعی<sup>2</sup>، غلامرضا پیرچراغی<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشجوی دکتری، پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11155-1639، pircheraghi@sharif.ir

### اطلاعات مقاله:

### چکیده

دریافت: 1401/09/07  
 پذیرش: 1402/01/28  
**کلیدواژگان**  
 بازیافت،  
 باتری سرب-اسید،  
 کامپوزیت،  
 خواص مکانیکی،  
 پلی اتیلن

باتری‌های سرب-اسید بخش قابل توجهی از بازار جهانی باتری‌ها هستند که با توجه به عمر کوتاه آن‌ها، با چالش‌های زیست‌محیطی جدی مرتبط با ضایعات باتری‌های سرب-اسید مواجه هستیم. یکی از اجزای این باتری‌ها جداکننده‌های آن‌ها است، که علاوه بر پلی اتیلن، سیلیکا و مقادیری از ترکیبات سرب نیز دارند. در این پژوهش از جداکننده باتری سرب اسید و پلی اتیلن به عنوان زمینه برای تهیه کامپوزیتی استفاده شد که به دلیل حضور سیلیکا می‌تواند خواص مکانیکی پلی اتیلن را بهبود بخشد. نمونه‌هایی با زمینه پلی اتیلن پرچگالی و خطی کم‌چگالی به همراه 5 تا 15 درصد وزنی جداکننده باتری سرب-اسید تهیه شده و خواص مکانیکی و حرارتی آن‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمون گرماسنجی تفاضلی روبشی، نوع پلی اتیلن در جداکننده باتری پلی اتیلن پرچگالی تعیین شد. با افزودن جداکننده باتری به زمینه پلی اتیلن پرچگالی مدول کشسانی حدود 22٪ و مدول خمشی حدود 55٪ افزایش یافت. این بهبود برای مدول کشسانی پلی اتیلن خطی کم‌چگالی تقریباً 35٪ بود. برای نمونه با زمینه پلی اتیلن پرچگالی حاوی 15 درصد جداکننده استحکام تسلیم از 1.25 مگاپاسکال به 28 مگاپاسکال و برای نمونه با زمینه پلی اتیلن کم‌چگالی حاوی 15 درصد جداکننده استحکام تسلیم از 9.11 مگاپاسکال به 13.7 مگاپاسکال افزایش یافته است. سختی و مدول برای 15 درصد جداکننده در بیشینه مقدار را دارند. بنابراین 15 درصد جداکننده مقداری بهینه برای بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها است.

## Feasibility of using lead-acid battery separators as reinforcement in polyethylene composites

Ali Ghasemkhani<sup>1</sup>, Mohammadreza Shojaei<sup>2</sup>, Gholamreza Pircheraghi<sup>1\*</sup>

1- Material Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Institute for Nanoscience Nanotechnology, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11155-1639, Tehran, Iran, pircheraghi@sharif.ir

### Keywords

Recycling  
 Lead-acid battery  
 Composite  
 Mechanical properties  
 Polyethylene

### Abstract

Lead-acid batteries are a significant part of the global battery market; however, due to limited life of these batteries, we are faced with major environmental challenges associated with lead-acid battery waste. One of their main components is the separator. In addition to polyethylene and silica, the separator of these batteries also contains lead compounds. In this research, lead-acid battery separator and polyethylene were used as a matrix for preparing a composite that could improve polyethylene's mechanical properties due to the presence of silica. Samples of HDPE and LLDPE with 5% to 15% lead-acid battery separator were prepared and their mechanical and thermal properties were evaluated and compared. By analyzing the DSC results, the type of polyethylene in the battery separator, HDPE, was determined. By adding the battery separator to HDPE matrix, elastic modulus increased by about 22% and bending modulus by about 55%. For LLDPE elastic modulus increased by approximately 35%. The yield strength of the sample, with HDPE matrix containing 15% separator has increased from 25.1 MPa to 28 MPa, and for the sample, with LLDPE matrix containing 15% separator, yield strength increased from 11.9 MPa to 13.7 MPa. Hardness and modulus for 15% of the separator are at maximum value. Consequently, 15 wt.% separator is an optimal value to improve samples' mechanical properties.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Ghasemkhani, A., Shojaei, M., Pircheraghi, G., "Feasibility of using lead-acid battery separators as reinforcement in polyethylene composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2075-2082, 2023.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1972662.1810

## 1- مقدمه

باتری‌ها را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم نمود. دسته اول شامل باتری‌های اولیه که غیرقابل شارژ هستند و دسته دوم که در بردارنده باتری‌های ثانویه بوده و قابل شارژ هستند. روند افزایشی توسعه و استفاده از لوازم الکترونیکی نسل جدید مانند انواع دوربین‌های دیجیتال، تلفن‌های همراه و لپ‌تاپ‌ها باعث افزایش تقاضا برای انواع باتری‌ها و به‌طور خاص نوع قابل شارژ آن در سال‌های اخیر شده است. این موضوع تولید حجم عظیمی از انواع باتری‌ها را به دنبال دارد. تا سال 2000 میلادی آمریکا و اروپا به ترتیب 3 و 5 میلیارد باتری تولید کردند. در بین انواع مختلف باتری‌ها، باتری‌های سرب-اسید<sup>1</sup> به دلیل خواص برجسته خود برای ساخت در مقیاس بزرگ در وسایل نقلیه مناسب هستند. این ویژگی‌ها شامل چگالی انرژی<sup>2</sup> بالا، در دسترس بودن و هزینه کم است که باعث افزایش تولید انبوه این دسته از باتری‌ها در سال‌های اخیر شده است. تولید انبوه باتری‌های سرب-اسید باعث شده است که تنها تا سال 2013 حدوداً 9 میلیون تن سرب از منابع طبیعی استخراج شود [1].

برخی از مواد مورد استفاده در باتری‌های سرب-اسید تجاری، مانند سرب، بسیار سمی و برای محیط‌زیست مضر هستند. دفع نادرست این باتری‌ها از یک طرف با توجه به ترکیبات موجود در آن‌ها مخاطرات زیست‌محیطی شدیدی را به دنبال داشته و از طرف دیگر موجب هدر رفتن یک منبع عالی از مواد اولیه می‌شود، چرا که این دورریزها حاوی درصد بالایی از مواد باارزش مانند سیلیکا، سرب، نیکل، لیتیوم و کادمیم هستند. بر این اساس و با توجه محدودیت‌های زیست‌محیطی اعمال شده در بسیاری از کشورها در برابر دفع نامناسب انواع باتری‌ها، روش‌های متعددی جهت بازیافت این مواد توسعه یافته است [2].

## 1-1- جداکننده‌های باتری سرب-اسید

اساساً باتری‌ها از چهار بخش اصلی تشکیل شده‌اند که شامل الکترودهای مثبت و منفی، الکترولیت و جداکننده هستند [3]. وظیفه جداکننده جلوگیری از تماس فیزیکی کاتد و آند با یکدیگر برای جلوگیری از اتصال کوتاه است. علاوه بر این، نیاز به غشاهایی است که مانعی برای عبور یون‌ها در حین فرآیند ایجاد نشود. برای فراهم کردن این خواص متناقض، جداکننده باید از نظر مکانیکی پایدار و در عین حال متخلخل باشد [4].

طبق پژوهش کولپین [5]، جداکننده‌ها باید دارای خواص تر شونده<sup>3</sup> خوب، کمترین زاویه تماس با الکترولیت و تخلخل زیاد باشند. همچنین، ساختار میکرو متخلخل<sup>4</sup> برای جذب اسید و انتقال گازهای تولیدشده و خواص مکانیکی مناسب در جداکننده باتری‌های سرب-اسید نیاز است. بهترین ماده‌ای که این الزامات را برآورده می‌کند، ماده‌ای بر پایه پلیمر، مانند پلی‌اتیلین است. امروزه بیش از 90 درصد جداکننده‌های باتری‌ها از پلی‌اتیلین ساخته می‌شوند [6]. علاوه بر پلی‌اتیلین، سیلیکای رسوبی از دیگر اجزای اصلی جداکننده باتری سرب-اسید است که معمولاً بین 50 الی 60 درصد وزنی جداکننده را تشکیل می‌دهد و وظیفه استحکام مکانیکی، پایداری ابعادی و هدایت یونی جداکننده را بر عهده دارد [7]. سیلیکا از طرفی باعث افزایش بلورینگی پلی‌اتیلین می‌شود که نتیجه آن افزایش مقاومت به خوردگی جداکننده در برابر الکترولیت اسیدی است. همچنین، تر شونده‌گی و آب‌دوستی<sup>5</sup>، با افزودن سیلیکا و با تولید یک شبکه میکرومتخلخل افزایش می‌یابد، در نتیجه تبادل یونی در باتری بهبود می‌یابد [8].

## 2-1- اهمیت مدیریت پسماند

مدیریت پسماند جامد<sup>6</sup> یک مشکل مهم است که به‌عنوان محصول جانبی تداوم رشد و توسعه اقتصادی به تدریج این مشکل بزرگ‌تر و مهم‌تر می‌شود. مواد پلیمری (پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها) سهم فزاینده‌ای از زباله‌های شهری و صنعتی را تشکیل می‌دهند که به محل دفن زباله می‌روند. بازیافت پلیمر راهی برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از تجمع زباله‌های پلیمری ناشی از کاربردهای روزانه مواد پلیمری مانند بسته‌بندی و ساخت‌وساز است. بازیافت زباله‌های پلیمری به حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند [9].

بازیافت پلیمرها، برخلاف فلزات و سرامیک‌ها، امروزه بدون حداقل کاهش خواص، تا حد زیادی غیرممکن است. از سوی دیگر، این بدان معنا نیست که هیچ چیز نمی‌تواند کیفیت محصولات ساخته‌شده از پلیمرهای بازیافتی را تا سطح مطلوب بهبود بخشد. در آینده، حجم زیاد پلیمرهای استفاده‌شده می‌تواند به منبع مهمی از مواد خام برای تولید پلاستیک، مونومر برای ساخت سایر پلیمرها و همچنین سوخت و انرژی تبدیل شود [10].

اجتناب از دفن زباله برای حفظ محیط‌زیست بسیار مهم است و همچنین باید بازیابی انرژی به حداقل برسد تا تمرکز بر بازیافت مکانیکی از یک سو یا بازیافت شیمیایی از سوی دیگر باشد. بازیافت مکانیکی فرایند بازیابی ضایعات پلاستیک جامد برای تولید مکرر پلیمر با ابزار مکانیکی مانند فناوری اکستروژن (غیرواکنشی) است. در دهه 1970، بازیافت مکانیکی، که به‌عنوان بازیافت ثانویه نیز شناخته می‌شود، رونق یافته و در ادامه تجاری شد. بنابراین یکی از رایج‌ترین روش‌های بازیافت ضایعات پلاستیکی جامد و نسبتاً شناخته‌شده است. با این وجود، بازیافت مکانیکی فقط برای ضایعاتی کاملاً تعریف‌شده و قابل‌استفاده است که به‌طور ایده‌آل از یک جزء پلیمری (خطی یا با اتصال عرضی آزاد) مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن و پلی‌استایرن تشکیل شده‌اند. علاوه بر این، میزان آلودگی ضایعات پلاستیکی جامد تأثیر قابل توجهی بر عملی بودن بازیافت مکانیکی برای دستیابی به کیفیت مطلوب محصول دارد. عملیات پرهزینه واحد مانند جداسازی، شست‌وشو و آماده‌سازی همگی برای تولید محصولات نهایی باکیفیت بالا، شفاف، تمیز و همگن ضروری هستند، و می‌تواند علت این را که چرا در کنار بازیافت مکانیکی، اغلب سوزاندن برای بازیابی انرژی هنوز در نظر گرفته می‌شود، توضیح دهد [11].

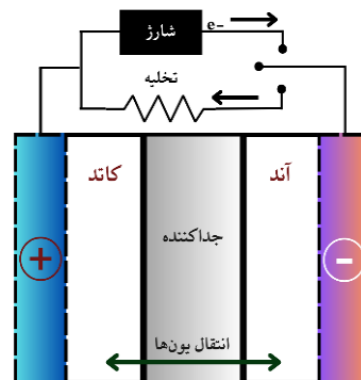


Fig. 1 The structure of a battery, including: cathode, anode and separator

شکل 1 ساختار یک باتری شامل: کاتد، آند و جداکننده

<sup>4</sup> Microporous

<sup>5</sup> Hydrophilicity

<sup>6</sup> Management of solid waste

<sup>1</sup> Lead-acid battery

<sup>2</sup> Energy density

<sup>3</sup> Wettability

از بین بروند و باعث تمرکز بیشتر تنش شوند، به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و در نتیجه، عیوب کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین استحکام ضربه‌ای کامپوزیت‌ها با افزایش مقدار نانوسیلیکا کاهش می‌یابد [17].

استحکام کششی کامپوزیت اندکی با مقدار کم سیلیکا افزایش می‌یابد و در 3 درصد وزنی سیلیکا به حداکثر می‌رسد و سپس با افزایش بیشتر مقدار سیلیکا کاهش می‌یابد. ذرات سیلیکا و زنجیره‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی از طریق پل اتصال<sup>3</sup> فاز بین سطحی به هم متصل می‌شوند و یک شبکه اتصال عرضی<sup>4</sup> سه‌بعدی را تشکیل می‌دهند که در آن ذرات سیلیکا به عنوان نقاط اتصال همراه با بلورهای پلی‌اتیلن عمل می‌کنند. هنگامی که کامپوزیت‌ها تحت تنش بیرونی هستند، نقاط اتصال می‌توانند تنش را به‌طور یکنواخت توزیع کرده و از گسیختگی مواد جلوگیری کنند. بنابراین پراکندگی بهتر تنش دلیل اصلی افزایش استحکام کششی کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی و نانوسیلیکا با مقدار کم سیلیکا است. اگر مقدار نانوسیلیکا زیر 3 درصد وزنی باشد، ازدیاد طول شکست کامپوزیت تقریباً برابر با پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی است و با افزایش سیلیکا به شدت کاهش می‌یابد. این را می‌توان با سازوکار ذکر شده قبلی نیز توضیح داد. واضح است که مدول کشسانی به‌طور چشمگیری با افزایش مقدار سیلیکا افزایش می‌یابد. این اتفاق ممکن است با مشارکت مدول بالای سیلیکا و همچنین اثر اتصال عرضی سیلیکا در زمینه تفسیر شود [17]. بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با اضافه شدن نانوسیلیکا کمی تغییر می‌کند (2.25 درصد افزایش با 10 درصد وزنی نانوسیلیکا)، به این معنی که مقدار کمی از نانوسیلیکا تأثیر کمی بر ویژگی بلوری پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی دارد. اسکات و همکاران [18]، گزارش کرده‌اند که نانوسیلیکا با اصلاح سطحی تقریباً هیچ اثر هسته‌زایی ناهمگنی روی پلی‌اتیلن ندارد. در نتیجه، بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با افزایش مقدار نانوسیلیکا تقریباً بدون تغییر باقی ماند.

از آنجا که بلورینگی و مورفولوژی بلوری پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی تأثیر زیادی بر خواص مکانیکی و نوری کامپوزیت‌ها دارد، نتایج به دست آمده قبل، تأیید می‌کند که بهبود مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌ها عمدتاً از عملکرد پل اتصال نانوسیلیکا ناشی می‌شود. در عین حال، عوامل اصلی مؤثر بر خواص نوری کامپوزیت‌ها، مقدار و قابلیت پخش نانوسیلیکا در زمینه است [17].

تنش تسلیم کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن پرچگالی<sup>5</sup> به همراه سیلیکا در غیاب یک سازگارکننده با افزایش مقدار سیلیکا تغییر نمی‌کند. استفاده از سازگارکننده پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید<sup>6</sup> برای دستیابی به مدول بالاتر ضروری است. در حضور سازگارکننده پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید، تنش تسلیم تقریباً به صورت خطی با مقدار سیلیکا افزایش می‌یابد، اما این افزایش خیلی قابل توجه نیست [19]. تمام نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی آزمایش‌شده افزایش مدول یانگ با افزایش افزودنی معدنی را نشان می‌دهند. استفاده از کامپوزیت حاوی 2 درصد وزنی سیلیکا 1.13 برابر مدول بالاتر نسبت به مدول نمونه بدون سازگارکننده و 1.18 برابر مدول بالاتر از پلی‌اتیلن خالص نشان می‌دهد. افزایش مدول کشسانی کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن و سیلیکا به همراه سازگارکننده می‌تواند با بهبود اتصال سطحی بین زمینه پلی‌اتیلن و نانوذرات مرتبط باشد و درجه پراکندگی ذرات را افزایش دهد. افزودن سیلیکا بر ازدیاد طول تأثیر منفی دارد. کاهش تدریجی ازدیاد طول در هنگام شکست با افزایش سیلیکا مشاهده می‌شود. علاوه بر این، افت این پارامتر برای

پژوهش‌های اندکی در زمینه بازیافت و بازیابی جداکننده‌های باتری سرب-اسید انجام شده است. تمرکز همه پژوهش‌ها بر بازیافت سیلیکا از جداکننده‌های پسماند بوده است. برای مثال در پژوهش انجام شده توسط پیرچراغی و همکاران [2] از سیلیکای بازیافت شده برای ساخت مجدد جداکننده‌های باتری سرب اسید استفاده شده است. یا در پژوهشی دیگر توسط نعمتی و همکاران [12] از سیلیکا برای ساخت کامپوزیتی پلیمری استفاده شده است. همچنین در پژوهش انجام شده توسط شجاعی [13] و همکاران از سیلیکای بازیافتی برای ساخت آمیزه‌های لاستیکی استفاده شده است. هرچند نتایج همه پژوهش انجام شده برای بازیافت سیلیکا از جداکننده‌های باتری سرب-اسید موفقیت‌آمیز بوده است اما به دلیل سوزانده شدن بخش پلیمری اثرات منفی زیست‌محیطی به وجود می‌آید. به همین علت استفاده نمودن مستقیم جداکننده‌ها در کامپوزیت‌های مختلف می‌تواند رویکرد جدیدی برای استفاده از این پسماند باشد که آسیب‌های زیست‌محیطی به حداقل برسد.

## 2- سیلیکا

### 2-1- اثر سیلیکا بر خواص مکانیکی پلی‌اتیلن

پلی‌اتیلن مهم‌ترین عضو پلی‌اولفین‌ها و پرمصرف‌ترین پلیمر در دنیاست [14]. پلی‌اتیلن‌ها خانواده‌ای از گرمانرم‌ها<sup>1</sup> هستند. پلی‌اتیلن شامل ساختاری بسیار ساده‌ای است، به‌طوری‌که ساده‌تر از تمام پلیمرهای تجاری است. پلی‌اتیلنی که تعداد زنجیره‌های جانبی آن کم و طول آن‌ها کوتاه باشد، پلی‌اتیلن سنگین (پلی‌اتیلن خطی) نامیده می‌شود. در این حالت هیچ شاخه‌ای در مولکول وجود ندارد. پلی‌اتیلن خطی سخت‌تر (دارای خواص مکانیکی بهتر) از پلی‌اتیلن شاخه‌ای است، اما پلی‌اتیلن شاخه‌ای آسان‌تر و ارزان‌تر ساخته می‌شود [15، 16]. مقدار کمی از ذرات نانوسیلیکا اصلاح‌شده سطحی می‌تواند به‌طور مؤثر مدول، تنش تسلیم، استحکام و چقرمگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی<sup>2</sup> را بهبود بخشد. چنین بهبودی در خواص کلی پلیمرها به ندرت در کامپوزیت‌های معمولی با ذرات میکرو قابل مشاهده است. برای نانوکامپوزیت‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی مقدار بهینه سیلیکا 4 درصد وزنی گزارش شده است. این مقدار می‌تواند باعث بهبود قابل توجه خواص و صرفه‌جویی در کامپوزیت‌ها شود. به‌طور کلی، بیش از 20 درصد از ذرات با اندازه میکرومتر برای دستیابی به عملکرد مشابه مورد نیاز است. مقدار سیلیکای بیشتر هیچ بهبود قابل توجهی در خواص ایجاد نمی‌کند، در حالی که به هزینه کامپوزیت می‌افزاید. سیلیکا بالای 8 درصد بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها اثر منفی دارد [17].

استحکام ضربه با زیاد شدن سیلیکا افزایش می‌یابد و با 3 درصد وزنی سیلیکا به حداکثر خود می‌رسد، سپس با افزایش بیشتر مقدار سیلیکا کاهش می‌یابد. با مقدار کمتر، نانوسیلیکا پراکندگی خوبی در زمینه و اتصال سطحی خوب با زمینه نشان می‌دهد. طبق نظریه لانگ، ذرات معدنی می‌توانند تقسیم و تفکیک ترک‌ها را تحت تنش در کامپوزیت‌ها تسریع کنند. علاوه بر این، فاز سطحی بین زمینه و پرکننده، که از زنجیره‌های ماکرو مولکولی متصل به سطح پرکننده از طریق جذب فیزیکی یا شیمیایی تشکیل شده است، هنگامی که کامپوزیت‌ها تحت تنش قرار می‌گیرند، می‌تواند بیشتر انرژی جنبشی و انرژی کرنش را در نوک ترک به انرژی تغییر شکل مرزی ناپیوسته تبدیل کند. بنابراین رشد ترک‌ها را متوقف می‌کنند. این دو عامل باعث افزایش انرژی شکست می‌شوند. در نتیجه استحکام شکست کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. در مقابل، با افزایش نانوسیلیکا، مقدار کلوخه‌های بزرگ که می‌توانند به راحتی تحت تنش

<sup>4</sup> Cross-linking network

<sup>5</sup> High-density polyethylene (HDPE)

<sup>6</sup> Maleic anhydride grafted polyethylene

<sup>1</sup> Thermoplastics

<sup>2</sup> Linear low-density polyethylene (LLDPE)

<sup>3</sup> Bridge-connection

### 3- بخش تجربی

#### 3-1- مواد اولیه

تأثیر جداکننده‌های باتری سرب-اسید به عنوان تقویت کننده برای بهبود خواص مکانیکی دو نوع پلی‌اتیلن پرچگالی (EX3) و خطی کم‌چگالی (209) همچون مدول کشسانی، استحکام کششی، سختی و روند تغییر خواص مکانیکی در درصد‌های وزنی مختلف از جداکننده بررسی شد. جهت جلوگیری از تخریب نمونه‌ها حین فرایندها از آنتی‌اکسیدان Irgafos168 به میزان 1000 ppm استفاده شد.

در پژوهش حاضر از جداکننده باتری سرب-اسید تازه و استفاده نشده یا به عبارتی دیگر اسید نخورده، برای ساخت کامپوزیت مورد نظر استفاده شده است. لازم به ذکر است برای حذف ناخالصی‌های احتمالی، جداکننده‌ها با روش پیشنهادی پیرچراغی و همکاران [2] اسیدشویی و خالص‌سازی شده‌اند.

#### 3-2- روش تهیه کامپوزیت

برای آماده‌سازی نمونه‌ها از مخلوط‌کن داخلی<sup>3</sup> ساخت شرکت Brabender استفاده شد. اختلاط نمونه‌ها در دمای 180 درجه سانتی‌گراد و با سرعت چرخش 60 rpm و به مدت 5 دقیقه انجام شد. پس از اضافه کردن گرانول‌های پلی‌اتیلن پرچگالی یا پودر پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی، 3 دقیقه زمان داده شد تا ذوب صورت بگیرد و سپس جداکننده‌ها اضافه شدند. برای بررسی تغییر خواص مکانیکی و به منظور مقایسه، از هر نوع پلی‌اتیلن یک نمونه بدون جداکننده نیز تهیه شد. سپس نمونه‌ها با استفاده از روش قالب‌گیری فشاری<sup>4</sup> در دمای 180 درجه سانتی‌گراد و فشار 200 بار با قالب‌های استاندارد آماده شدند. نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها مطابق جداول 1 و 2 است.

جدول 1 ترکیب نمونه‌های تهیه شده با زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی

Table 1 Composition of samples prepared with HDPE matrix

نمونه‌ها	پلی‌اتیلن پرچگالی (wt.%)	جداکننده استفاده نشده (wt.%)
HDPE	100	0
H-5FS	95	5
H-10FS	90	10
H-15FS	85	15

جدول 2 ترکیب نمونه‌های تهیه شده با زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

Table 2 Composition of samples prepared with LLDPE matrix

نمونه‌ها	پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی (wt.%)	جداکننده استفاده نشده (wt.%)
LLDPE	100	0
L-5FS	95	5
L-10FS	90	10
L-15FS	85	15

#### 3-3- روش انجام آزمون‌ها

جهت بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تهیه شده، از آزمون‌های کشش<sup>5</sup>، خمش<sup>6</sup> و سختی سنجی<sup>7</sup> استفاده شد. آزمون‌های کشش و خمش با استفاده از دستگاه کشش H10KS Hounsfield و به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D790 و ASTM D638 – Type V انجام شد. سختی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D2240 D اندازه‌گیری شد. از آزمون گرماسنجی روشی تفاضلی مطابق با استاندارد ASTM D3418-03 برای بررسی خواص حرارتی نمونه‌ها استفاده شد.

کامپوزیت‌های با پلی‌اتیلن پیوند شده با انیدرید مالئیک به عنوان سازگار کننده بسیار کمتر است. در حضور پلی‌اتیلن پیوند شده با مالئیک انیدرید، کامپوزیت با 6 درصد وزنی سیلیکا 66 درصد از ازدیاد طول پلی‌اتیلن بدون سیلیکا و کامپوزیتی با همان مقدار پرکننده بدون حضور سازگار کننده تنها 27 درصد ازدیاد طول نسبت به پلی‌اتیلن بدون سیلیکا نشان می‌دهد. محل‌های تجمع پرکننده می‌توانند به عنوان مکانی برای تمرکز تنش عمل کنند، به طوری که در نمونه بدون سازگار کننده به علت تمرکز تنش ازدیاد طول در هنگام شکست کاهش بیشتری می‌یابد [19].

الغامدی و همکاران [20]، موفق به تهیه و عامل‌دار کردن نانوذرات سیلیکا همراه با پلی‌اتیلن با استفاده از روش پلی‌همولوژی شروع شده با سطح<sup>1</sup> شدند. سپس به روش اختلاط مذاب نانوکامپوزیت‌های پلی‌الفین با نسبت‌های مختلف نانوذرات سیلیکا و نانوذرات سیلیکا همراه با پلی‌اتیلن در زمینه‌های پلی‌اتیلن با چگالی کم خطی و پلی‌اتیلن با چگالی کم ساختند.

اثر بخشی بیشتر پرکننده سیلیکا همراه با پلی‌اتیلن برای بهبود رفتارهای کشسانی و پلاستیک پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی در مقایسه با پرکننده‌های سیلیکا از پراکندگی خوب و منطقه بین‌فازی در نانوذرات سیلیکای همراه با پلی‌اتیلن (مورفولوژی مشابه پوسته- هسته<sup>2</sup>) ناشی می‌شود که اتصال بین پرکننده و زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی را تقویت می‌کند. اساساً، پلی‌اتیلن پیوند شده بر روی سطح نانوذرات سیلیکا به تقویت اتصال سطحی کمک کرده و امکان پراکندگی همگن در سطح مولکولی نانوذرات سیلیکای همراه با پلی‌اتیلن در زمینه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی را فراهم می‌کند [20].

به منظور بهبود پراکندگی و افزایش سازگاری، ذرات سیلیکا را می‌توان با اتصال گروه‌های عاملی به سطح خود اصلاح کرد. یکی از اصلاح‌کننده‌های پرکاربرد سیلیکا سیلان است که در صنایع لاستیک، رنگ و رزین نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [21]. همچنین برای افزایش برهمکنش بین بستر پلی‌اتیلن و ذرات تقویت کننده می‌توان از پلی‌اتیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید استفاده نمود [19].

#### 2-2- خطرات محیط‌زیستی باز یافت نانوسیلیکا

باز یافت جداکننده‌های باتری سرب-اسید برای تهیه نانوسیلیکا با روش سوزاندن بخش پلیمری با چالش‌های زیست‌محیطی فراوانی همراه است. ارائه راهکاری جهت مدیریت جداکننده‌های باتری سرب-اسید بدون آسیب جدی به محیط‌زیست ضروری است. استفاده مستقیم از جداکننده‌های باتری سرب-اسید به عنوان تقویت کننده برای بهبود خواص مکانیکی دو نوع پلی‌اتیلن پرچگالی و پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی همچون مدول کشسانی، استحکام کششی، سختی و انرژی جذب شده در آزمون ضربه می‌تواند ایده‌ای مناسب باشد. چگونگی تغییر خواص مکانیکی با استفاده از جداکننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. وجود سیلیکا در جداکننده‌های باتری می‌تواند دلیلی برای این بررسی باشد. با توجه به کاربردهای گسترده پلی‌اتیلن و اهمیت باز یافت، استفاده از جداکننده‌ها برای کاربردهایی که خواص مکانیکی اهمیت دارد می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. هدف اصلی پروژه حاضر، به نظر می‌رسد راهکار پیشنهادی از جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی مزیت‌های متعددی نسبت به روش باز یافت جداکننده‌ها دارد. بنابراین امکان استفاده مستقیم جداکننده‌های باتری در زمینه‌های پلیمری بررسی می‌شود.

<sup>5</sup> Tensile test

<sup>6</sup> Bending

<sup>7</sup> Hardness

<sup>1</sup> surface-initiated polyhomologation

<sup>2</sup> Core - shell

<sup>3</sup> Internal mixer

<sup>4</sup> Compression molding

جدول 3 خواص حرارتی نمونه‌ها (نتایج حاصل از DSC)

Table 3 Composition of samples prepared with LLDPE matrix

T <sub>m</sub> (°C)	X <sub>c</sub> (%)	T <sub>c</sub> (°C)	نمونه
128.6	-	114.6	Fresh Separator
130.7	51.2	114.6	HDPE
130.2	49.9	114.7	H-5FS
130.5	47.7	114.2	H-10FS
130.1	43.2	114.0	H-15FS
123.6	23.8	111.1	LLDPE
124.1	24.9	109.4	L-5FS
123.5	25.0	110.6	L-10FS
124.2	25.1	111.2	L-15FS

#### 2-4- کشش

نتایج آزمون کشش در جدول 4 آورده شده است. همان‌طور که در جدول گزارش شده است، با افزایش مقدار جداکننده به زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی، مدول کشسانی نمونه حاوی 15 درصد جداکننده باتری حدوداً 21.8٪ و تنش تسلیم حدوداً 11.3٪ افزایش یافته‌اند. از طرفی همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، برای کامپوزیت‌ها با زمینه پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی مدول کشسانی با اضافه شدن 5، 10 و 15 درصد وزنی جداکننده پسماند روند افزایشی دارد. مدول کشسانی برای نمونه‌های L-15FS از 220 مگاپاسکال به 296 مگاپاسکال افزایش داشته است. همچنین، تنش تسلیم این نمونه از 11.9 مگاپاسکال به 13.7 مگاپاسکال افزایش یافته است. به نظر می‌رسد دلیل روند افزایشی مدول کشسانی و تنش تسلیم حضور سیلیکا در جداکننده‌ها و همچنین ایجاد پیوندهای ضعیف از نوع جذب فیزیکی و پیوند کوالانسی است. به عبارتی دیگر، بین زنجیره‌های پلیمر زمینه و جداکننده حاوی سیلیکا، شبکه‌هایی ایجاد می‌شود که نتیجه این پدیده افزایش سفتی و استحکام زمینه در راستای عدم حرکت راحت زنجیره‌های زمینه است.

با توجه به جدول 4 درصد ازدیاد طول با اضافه شدن 5، 10 و 15 درصد وزنی جداکننده پسماند برای همه نمونه‌ها روند کاهشی دارد. برای نمونه H-15FS ازدیاد طول در نقطه شکست از 518 به 18 درصد کاهش یافته است. همچنین برای نمونه L-15FS ازدیاد طول در نقطه شکست از 674 به 263 کاهش یافته است.

با توجه به درصد بلورینگی پلی‌اتیلین پرچگالی که 51.2٪ است میزان ناحیه آمورف در مقایسه با پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی کمتر است و نواحی بلورین بیشتری وجود دارند و احتمال قرار گرفتن ذرات جداکننده‌ی حاوی سیلیکا بین بلورها افزایش یافته که می‌تواند هنگام تسلیم در زمینه تمرکز تنش لازم برای شکست را فراهم آورد. در واقع محصور شدن ذرات جداکننده بین بلورهای پلی‌اتیلین پرچگالی سبب افت شدید کرنش در نقطه شکست شده است.

نمونه‌های پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی به همراه جداکننده در مقایسه با نمونه‌های پلی‌اتیلین پرچگالی کرنش در شکست بیشتری داشتند. درصد بلورینگی پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی 23.8٪ است که به معنای نواحی آمورف بیشتر است و شاهد اتفاقی که در پلی‌اتیلین پرچگالی رخ داده است، در این نوع پلی‌اتیلین نخواهیم بود. علاوه بر مسئله‌ی درصد بلورینگی، تنش تسلیم دو نوع پلی‌اتیلین هم متفاوت بوده و می‌تواند دلیلی برای تفاوت کرنش شکست نمونه‌ها در نمونه‌های پلی‌اتیلین پرچگالی و پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی باشد. پلی‌اتیلین موجود در جداکننده‌های باتری از نوع پلی‌اتیلین پرچگالی است و تنش تسلیم این نوع پلی‌اتیلین از پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی بیشتر است. به عبارتی دیگر تنش وارد شده به نمونه‌های پلی‌اتیلین پرچگالی هنگام تسلیم بیشتر از نمونه‌های پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی است.

با هدف مشاهده اتصال جداکننده‌ها به زمینه و نحوه توزیع آن‌ها، میکروسکوپ الکترونی روبشی بکار رفت. برای مطالعه مقدماتی رفتار رئولوژیکی، آزمون تعیین شاخص جریان مذاب<sup>1</sup> با استفاده از وزنه‌ی 5 Kg و در دمای 190°C مطابق با استاندارد ISO 1133 انجام شد.

#### 4- نتایج و بحث

##### 1-4- گرماسنجی روبشی تفاضلی

جهت بررسی خواص حرارتی و درصد بلورینگی نمونه‌ها آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی<sup>2</sup> با دستگاه Q100 شرکت TA Instrument انجام شد. برای هر نمونه، یک چرخه گرمایش و سرمایش تحت اتمسفر نیتروژن (جریان گاز 20 میلی‌لیتر بر دقیقه) از دمای 40 تا 200 درجه سانتی‌گراد با نرخ 10 درجه بر دقیقه انجام شد.

نتایج آزمون DSC از نمونه‌ها در جدول 3 آورده شده است. با توجه به نتایج نمونه جداکننده استفاده نشده که دمای ذوب 128 درجه سانتی‌گراد دارد. در جداکننده‌ی باتری معمولاً دو نوع پلی‌اتیلین با وزن مولکولی بسیار بالا و پلی‌اتیلین پرچگالی مورد استفاده قرار می‌گیرند که با توجه به دمای ذوب و T<sub>c</sub> به نظر می‌رسد در جداکننده باتری مورد استفاده در این پژوهش از پلی‌اتیلین پرچگالی (HDPE) استفاده شده است. درصد بلورینگی (X<sub>c</sub>) کامپوزیت‌های دارای زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی با افزودن جداکننده کاهش یافته است. جداکننده‌ها تا حدودی مانع تشکیل بلورهای با ابعاد بزرگ شده‌اند. در نمونه‌های پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی با افزایش مقدار جداکننده‌های باتری افزایش درصد بلورینگی مشاهده می‌شود. در این نمونه‌ها ذرات جداکننده‌ی باتری، که در نواحی آمورف قرار گرفته‌اند، تا حدودی گره‌خوردگی‌ها را کاهش داده و موجب افزایش نظم در ساختار شده‌اند. مطابق نتایج پژوهش فلامدی و همکاران [20] ذرات سیلیکا با افزایش جوانه‌زنی ناهمگن موجب افزایش درصد بلورینگی پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی می‌شوند. از طرف دیگر پلی‌اتیلین موجود در جداکننده از نوع پلی‌اتیلین پرچگالی بوده اما به دلیل فرایند تولید جداکننده بلورینگی کمتری نسبت به زمینه دارد بنابراین با افزودن جداکننده به زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی شاهد کاهش درصد بلورینگی هستیم. با توجه به این که در این آزمون، نمونه وزن بسیار کمی در حد چند میلی‌گرم دارد و بخشی از جداکننده باتری شامل سیلیکا و سایر موادی است که پلیمری نیستند، درصد بلورینگی برای جداکننده‌ی باتری داده‌ی معتبر و ارزشمندی نیست و گزارش نشده است.

در کامپوزیت‌های پلیمری، اثرات هسته‌زایی<sup>3</sup> و تحدید<sup>4</sup> هر دو می‌توانند نقش مهمی در تعیین خواص کامپوزیت داشته باشند. هسته‌زایی به فرآیندی اطلاق می‌شود که طی آن بلورها یا فازهای جدید در زمینه پلیمری تشکیل می‌شوند، در حالی که اثر تحدید به محدودیت تحرک زنجیره‌های پلیمری به دلیل وجود فاز تقویت‌کننده مانند نانوذرات یا الیاف اشاره دارد. رقابت بین اثرات هسته‌زایی و تحدید در کامپوزیت‌های پلیمری به عوامل مختلفی مانند اندازه و شکل فاز تقویت‌کننده، خواص زمینه پلیمری و شرایط فرآیند بستگی دارد. به نظر می‌رسد در نمونه‌های با زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی اثر تحدید نقش بیشتری در خواص کامپوزیت داشته است در حالی که در پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی اثر هسته‌زایی مشهودتر است در نتیجه بلورینگی در کامپوزیت با زمینه پلی‌اتیلین پرچگالی کاهش و در زمینه پلی‌اتیلین خطی کم‌چگالی افزایش یافته است.

<sup>3</sup> nucleation

<sup>4</sup> confinement effect

<sup>1</sup> Melt flow index (MFI)

<sup>2</sup> Differential Scanning Calorimetry (DSC)

و علت تفاوت بلورینگی آن‌ها ساختار زنجیره‌ها است که برای پلی‌اتیلن پرچگالی خطی بوده و برای پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی دارای شاخه است. تفاوت بلورینگی موجب تفاوت سختی و تنش تسلیم این دو نوع پلی‌اتیلن نیز می‌شود و می‌توان گفت که پلی‌اتیلن پرچگالی خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی دارد. از طرفی به دلیل اینکه سیلیکا ذاتاً ماده‌ای با سختی زیاد است، سختی میانگین کامپوزیت طراحی شده با افزایش مقدار جداکننده افزایش می‌یابد.

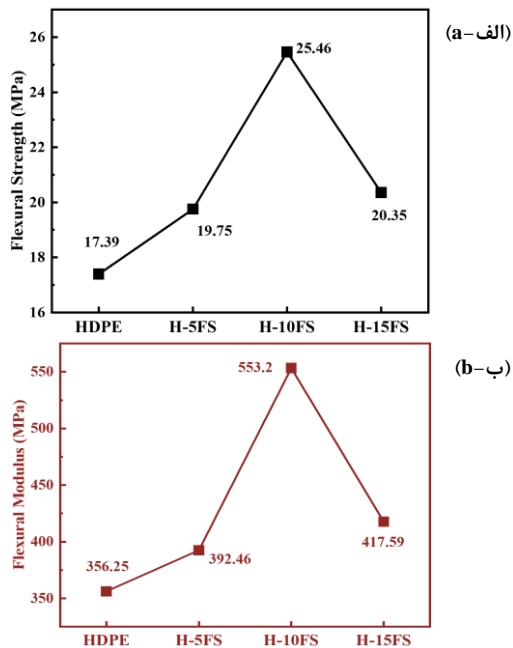


Fig. 2 a) Flexural strength and b) flexural modulus of HDPE samples  
شکل 2 الف) استحکام خمشی و ب) مدول خمشی نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی

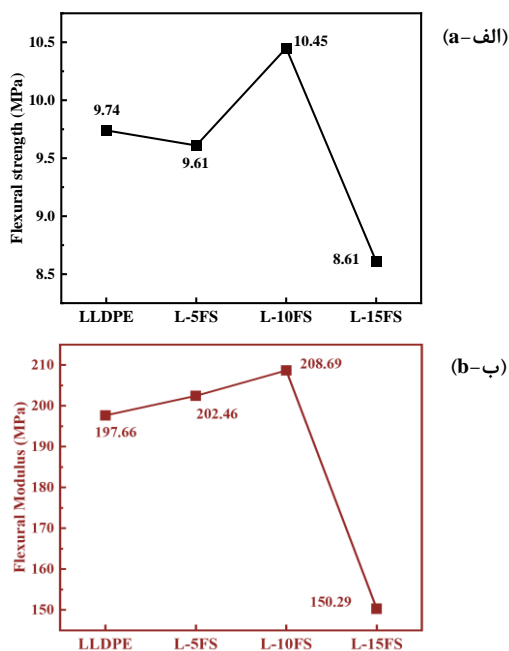


Fig. 3 a) Flexural strength and b) flexural modulus of LLDPE samples  
شکل 3 الف) استحکام خمشی و ب) مدول خمشی نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

جدول 4 نتایج آزمون کشش کامپوزیت‌ها

Table 4 Results of tensile test for composites

نمونه	مدول کشسانی (MPa)	ازدیاد طول در نقطه شکست (%)	تنش تسلیم (MPa)
HDPE	830	518	25.1
H-5FS	932	63	25.2
H-10FS	972	41	26.5
H-15FS	1011	18	28.0
LLDPE	220	674	11.9
L-5FS	237	437	12.9
L-10FS	282	300	12.6
L-15FS	296	263	13.7

### 3-4- خمش

نتایج مربوط به آزمون خمش در شکل‌های 2 و 3 آورده شده است. با توجه به نتایج خمش، بیشترین استحکام و مدول خمشی برای دو نوع پلی‌اتیلن مربوط به نمونه‌های H-10FS و L-10FS است.

استحکام و مدول خمشی نمونه H-10FS نسبت به نمونه پلی‌اتیلن پرچگالی 47 و 55 درصد به ترتیب افزایش یافته‌اند. همچنین استحکام و مدول خمشی برای نمونه L-10FS نسبت به نمونه پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی حدوداً 11 و 6 درصد به ترتیب افزایش یافته‌اند. بنابراین، اثر جداکننده پسماند بر رفتار خمشی زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی بهتر مشخص می‌شود. نقش اصلی را در بهبود استحکام و مدول خمشی ذرات سیلیکا موجود در جداکننده‌های باتری دارند. سیلیکا ماده‌ای سرامیکی بوده و مدول بیشتری از زمینه دارد و با اضافه شدن به زمینه پلیمری مدول کشسانی و خمشی را با استفاده سازوکار پل زدن بهبود می‌بخشد [17]. با افزودن جداکننده‌های باتری افزایش در مدول کشسانی در آزمون کشش نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده این است که جداکننده‌های باتری سبب افزایش سفتی پلی‌اتیلن شده‌اند. مقدار بهبود خواص خمشی در زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی قابل‌توجه‌تر و بیشتر است. در آزمون کشش نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی افت کرنش کمتری داشتند و می‌توان گفت نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی برای کاربردهایی که خواص خمشی اهمیت دارد (مانند لوله‌ها) و نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی برای کاربردهایی که خواص کششی مطرح است، مناسب‌تر هستند.

همان‌طور که در شکل‌های 2 و 3 مشاهده می‌شود، استحکام و مدول خمشی برای تمامی نمونه‌ها حاوی 15 درصد جداکننده خردشده کاهش چشمگیری داشته است. به نظر می‌رسد با افزایش درصد جداکننده خردشده پدیده‌ی کلوخه‌ای شدن تشدید شده و تمرکز تنش موضعی عاملی برای این اتفاق است. بنابراین، با توجه به نتایج مقدار بهینه برای افزایش مدول و استحکام خمشی 10 درصد وزنی جداکننده است.

### 4-4- سختی سنجی

برای تمام نمونه‌ها آزمون سختی با 6 مرتبه تکرار انجام شد. در شکل 4 نتایج سختی نمونه‌ها نشان داده شده است. برای هر دو زمینه نمونه‌های با 15 درصد جداکننده بیشترین سختی را دارند. سختی همه نمونه‌ها با اضافه شدن جداکننده خردشده روند افزایشی دارد که مشابه با روند مدول در آزمون کشش است. با افزودن جداکننده باتری سختی پلی‌اتیلن پرچگالی در نمونه H-15FS تقریباً 6.43٪ و سختی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی در نمونه L-15FS تقریباً 15.75٪ نسبت به زمینه بدون جداکننده افزایش یافته است. روند افزایش سختی مشابه با مدول کشسانی است که چنین شباهتی در پژوهش‌های دیگر نیز مشاهده شده است [13]. زنجیره‌های دو نوع پلی‌اتیلن ماهیت یکسانی دارند

بلورینگی پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی کمتر است نواحی بلورین در این نمونه چندان قابل تفکیک و مشاهده نیستند. خردایش جداکننده‌های باتری به علت حضور پلی‌اتیلن با چالش همراه بوده و اندازه ذرات نمی‌تواند از یک حدی بیشتر کاسته شود و همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود ریزترین ذره جداکننده‌ی باتری ابعادی حدود 240 nm دارد. لازم به ذکر است اندازه‌ی تمام ذرات در همین حدود نبوده و ابعاد اکثر ذرات در محدوده میکرومتر قرار دارد.

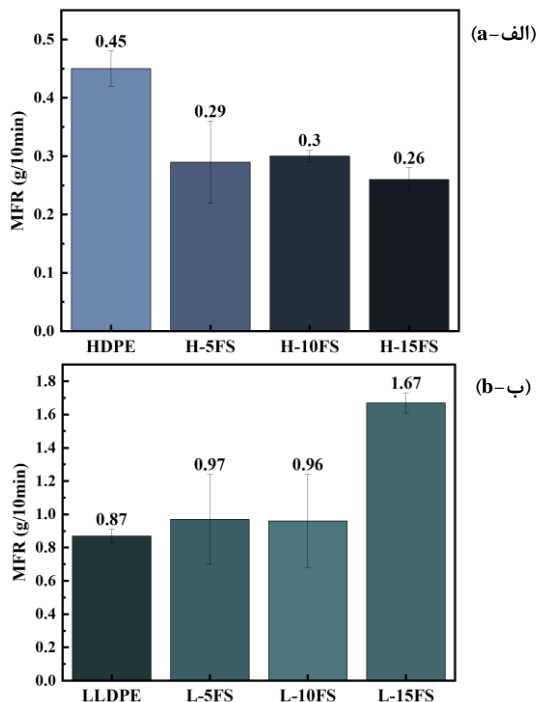


Fig. 5 The results of the melt flow index test of a) HDPE and b) LLDPE samples

شکل 5 نتایج آزمون تعیین شاخص جریان مذاب نمونه‌های الف) پلی‌اتیلن پرچگالی و ب) پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

### 5- جمع‌بندی

بازار قابل توجه باتری‌های سرب-اسید و طول عمر کم این نوع باتری‌های موجب شده تا با حجم پسماند قابل توجهی از این نوع باتری روبه‌رو باشیم. بیشتر اجزای باتری‌ها بازیافت شده یا مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرند تا به چرخه مصرف بازگردند. به علت وجود پلی‌اتیلن و ترکیبات سرب بازیافت جداکننده‌های باتری سرب-اسید با چالش بیشتری همراه است. از طرف دیگر وجود سیلیکا که ماده‌ای سرامیکی است در جداکننده‌های باتری سرب-اسید می‌تواند موجب تقویت خواص مکانیکی پلی‌اتیلن شود. با اضافه شدن جداکننده باتری سرب-اسید به پلی‌اتیلن پرچگالی تنش تسلیم و مدول برای بهترین نمونه با 15 درصد وزنی جداکننده به ترتیب 28 و 1011 مگاپاسکال است. همچنین سختی برای این نمونه 61 واحد Shore D گزارش شده است. رفتار مدول خمشی این نمونه در 10 درصد وزنی افزایش چشمگیری تا 553 مگاپاسکال است. برای نمونه با زمینه پلی‌اتیلن کم‌چگالی رفتار مکانیکی تقریباً مشابه است. به طوری که تنش تسلیم و مدول به ترتیب 13 و 298 مگاپاسکال گزارش شده‌اند. همچنین سختی برای این نمونه 46 واحد Shore D است. رفتار مدول خمشی این نمونه در 10 درصد جداکننده به بیشینه حالت 208 مگاپاسکال رسیده است. بنابراین اضافه شدن جداکننده باتری به عنوان تقویت‌کننده امکان بهبود نسبی خواص مکانیکی زمینه پلیمری را می‌دهد.

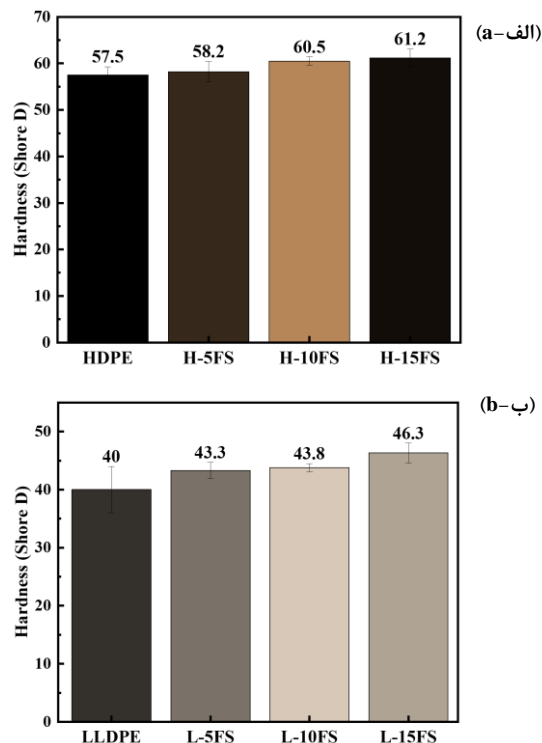


Fig. 4 Hardness test results of a) HDPE and b) LLDPE samples

شکل 4 نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌های الف) پلی‌اتیلن پرچگالی و ب) پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی

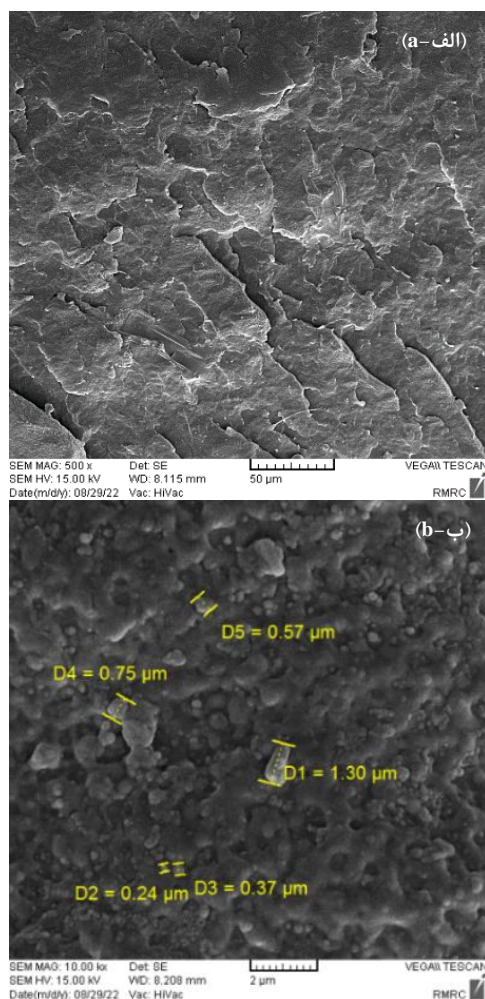
### 5-4- تعیین شاخص جریان مذاب

آزمون در دمای 190°C و با استفاده از وزنه‌ی 5 kg انجام شد. نتایج آزمون تعیین شاخص جریان مذاب در شکل 5 قابل مشاهده است. روند تغییر شاخص جریان مذاب با افزایش درصد وزنی جداکننده‌ی باتری برای کامپوزیت‌های با زمینه پلی‌اتیلن پرچگالی با کاهش و برای نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی با افزایش همراه است. با افزودن 15 درصد وزنی جداکننده‌ی باتری شاخص جریان مذاب نمونه‌های پلی‌اتیلن پرچگالی کاهش یافته (42%) و در نمونه‌های پلی‌اتیلن خطی کم‌چگالی این شاخص زیاد شده است (92%). روند مشاهده‌شده می‌تواند ناشی از خواص رئولوژیکی متفاوت پلی‌اتیلن پرچگالی و کم‌چگالی استفاده‌شده و همچنین جداکننده خردشده باشد. همچنین سازگاری و امتزاج‌پذیری در حالت مذاب ناشی از خواص رئولوژیکی متفاوت اجزای استفاده‌شده نیز می‌تواند دلیل این موضوع باشد. می‌توان تصور نمود سازگاری بیشتر در حالت مذاب بین پلی‌اتیلن پرچگالی و جداکننده (به دلیل وجود بستر پلی‌اتیلن پرچگالی) وجود داشته و این موضوع باعث برهمکنش بیشتر پلیمر جداکننده با بستر و کاهش شاخص جریان مذاب در نمونه‌های پرچگالی می‌شود. با این حال این موضوع نیازمند تحقیق بیشتر و در نظر گرفتن سازوکارهای تخریب شامل شکست زنجیر و شبکه‌ای شدن پلی‌اتیلن هنگام آمیزه‌سازی است که در مطالعات آتی انجام خواهد شد.

### 6-4- بررسی توزیع جداکننده باتری در زمینه پلی‌اتیلن کم‌چگالی خطی

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه L-15FS را نشان می‌دهد. اندازه ذرات جداکننده‌ی باتری در حدود یک میکرومتر و اندکی کمتر است. طبق شکل 6 (ب)، توزیع و پراکنش ذرات جداکننده‌ی باتری در زمینه چندان یکنواخت و منظم نیست اما به دلیل وجود پلی‌اتیلن در جداکننده‌ی باتری سرب-اسید اتصال ذرات به زمینه قابل قبول و مناسب است. از آن جا که درصد

- [5] Culpin, B., "Separator Design for Valve-regulated Lead-acid Batteries," *Journal of Power sources*, Vol 53, No.1, pp. 127-135, 1995.
- [6] Toquet, F., "Study of the Combined Roles of the Silica.Oil.UHMWPE Formulation and Process Parameters on Morphological and Electrical Properties of Battery Separators," PhD Thesis., Université de Lyon, France, 2017.
- [7] Rand, D.A.J., Holden, L.S., May, G.J., Newnham, R.H., Peters, K., "Valve-regulated Lead-acid Batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 191-197, 1996.
- [8] Wei, X., Nie, Z., Luo, Q., Li, B., Chen, B., Simmons, K., Sprengle, V., Wang, W., "Nanoporous Polytetrafluoroethylene.Silica Composite Separator as A High-performance All-vanadium Redox Flow Battery Membrane," *Advanced Energy Materials*, Vol. 3, No. 9, pp. 1215-1220, 2013.
- [9] Burillo, G., Clough, R.L., Czvikovszky, T., Guven, O., Le Moel, A., Liu, W., Singh, A., Yang, J., Zaharescu, T., "Polymer Recycling: Potential Application of Radiation Technology," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 64, No. 1, pp. 41-51, 2002.
- [10] Ignatyev, Igor A, Wim Thielemans., Bob Vander Beke., "Recycling of Polymers: A Review." *ChemSusChem*, Vol. 7, No. 6, pp. 1579-1593, 2014.
- [11] Moens, E.K., De Smit, K., Marien, Y.W., Trigilio, A.D., Van Steenberge, P.H., Van Geem, K.M., Dubois, J.L., D'hooge, D.R., "Progress in Reaction Mechanisms and Reactor Technologies for Thermochemical Recycling of Poly (Methyl Methacrylate)," *Polymers*, Vol. 12, No. 8, pp. 1667, 2020.
- [12] Nemati, S., Pircheraghi, G., "Fabrication of a form-stable phase change material with green fatty acid and recycled silica nanoparticles from spent lead-acid battery separators with enhanced thermal conductivity." *Thermochimica Acta*, Vol. 693, No. 1, pp. 178781, 2020.
- [13] Shojaei, M.R., Pircheraghi, G., Alinoori, A., "Sustainable SBR/silica nanocomposites prepared using high-quality recycled nanosilica from lead-acid battery separators." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 370, No. 2, pp. 133316, 2022.
- [14] Shirkevand, M., Azizi, H., Ghasemi, I., Karabi, M., Rashedi, R., "Correlation Between Microstructure and Rheological Properties in High Density Polyethylene with Broad Distribution of Molecular Weigh." In Persian, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 28, No. 1, 27-38, pp. 3-12, 2015.
- [15] Vosoghifar, H, rahbaripour, A., "Examination of High Density Polyethylene," In Persian, *Promotional Scientific Journal of Mechanical* Vol. 20, No. 80, pp. 49-56, 2011.
- [16] Moghaddam, M, K., Shabaniyan, M., "A Review on Evolution of Polyethylene Pipes: Production Methods and Standards," In Persian, *Polymerization*, Vol. 5, No. 4, pp. 84-91, 2015.
- [17] Hua, Y.Q., Zhang, Y.Q., Wu, L.B., Huang, Y.Q., Wang, G.Q., "Mechanical and Optical Properties of Polyethylene Filled with Nano SiO<sub>2</sub>." *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, Vol. 44, No. 2, pp. 149-159, 2005.
- [18] Scott, C., Ishida, H., Maurer, F.H.J., "Melt State Dynamic Mechanical Properties of Polyethylene.EPDM.silicon Dioxide Composites," *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 10, No. 5, pp. 463-476, 1991.
- [19] Bula, K., Jesionowski, T., "Effect of Polyethylene Functionalization on Mechanical Properties and Morphology of PE.SiO<sub>2</sub> Composites." *Composite Interfaces*, Vol. 17, No. 5-7, pp. 603-614, 2010.
- [20] Alghamdi, R.D., Yudhanto, A., Lubineau, G., Abou-Hamad, E., Hadjichristidis, N., "Polyethylene Grafted Silica Nanoparticles Via Surface-initiated Polyhomologation: A Novel Filler for Polyolefin Nanocomposite," *Polymer*, Vol. 254, No. 2, pp. 125029, 2022.
- [21] Jesionowski, T., Krysztalkiewicz, A., "Influence of silane coupling agents on surface properties of precipitated silicas," *Applied Surface Science*, Vol. 172, No. 1-2, pp. 18-32, 2001.



**Fig. 6** Scanning electron microscope images in a)500x and b)1000x magnification

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی الف) 500 برابر و ب) 1000 برابر

## 6- تقدیر و تشکر

از آقای روح‌الله شامی زاده، نیما رشیدی، خانم یکتا رضایی و خانم نیلوفر افشاری و سایر اعضای محترم گروه تحقیقاتی مواد پلیمری دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف (PMRG) که در مسیر این پروژه یاری‌رسان و راهنما بودند، کمال تشکر را دارم.

## 7- مراجع

- [1] Bernardes, A.M., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.S., "Recycling of Batteries: A Review of Current Processes and Technologies," *Journal of Power sources*, Vol. 130, No. 1-2, pp. 291-298, 2004.
- [2] Pircheraghi, G., Nowrouzi, M., Nemati, S., "Fabrication of Polyethylene Separator for Lead-acid Batteries from Waste and Recycled Silica and Investigation of its Performance," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 250, No. 1-2, pp. 119535, 2020.
- [3] Palacin, M. R., "Recent Advances in Rechargeable Battery Materials: A Chemist's Perspective," *Chemical Society Reviews*, Vol 38, No. 9, pp. 2565-2575, 2009.
- [4] Zhang, W., Tu, Z., Qian, J., Choudhury, S., Archer, L.A., Lu, Y., "Design Principles of Functional Polymer Separators for High-energy, Metal-Based Batteries," *Small*, Vol. 14, No. 11, pp. 1703001, 2018.