

# تقویت پلی وینیل کلراید با اضافه کردن نانو ذرات کلسیم کربنات

شرکت پرنکار پلاستیک اسپادانا

ترجمه : سهیلا غلامعلی پور

ویرایش : دکتر جعفر خراسانی

بهمن ماه 1392

از سال های پیش استفاده از فیلر های معدنی در مواد الاستومر و پلاستیک انجام شده است. در الاستومر ها هدف اصلی ، تقویت الاستومر ها و یا ارزان سازی کامپوند با استفاده از خاک رس و مواد دیگر. ( برای مثال در الاستومر های سنتز شده با استفاده از کربن بلک و سیلیکا) برای ترموپلاستیک هایی نظیر PVC ، فیلر های ارزان به منظور سفت شدن مواد و کنترل خواص صوتی مورد استفاده قرار می گیرد. در کاربرد های مهندسی که ترکیبی از چقرمگی و سختی مدنظر می باشد (به عنوان مثال برای لوله های PVC ) اگر چه اضافه کردن ذرات نانو منجر به بهبود خواص مکانیکی همزمان با کاهش قیمت می شود اما استفاده از مقادیر زیاد فیلر های معدنی اجتناب می شود.

چقرمگی پی وی سی سخت، در صورت استفاده از اصلاح کننده ضربه، مانند ذرات پلی اتیلن کلرینه شده (CPE) یا اکریلو نیتریل بوتادین استایرن (ABS) می باشد بهبود داده می شود که در این حالت به آن M-PVC (پی وی سی اصلاح شده) گفته می شود. افزایش چقرمگی را می توان به تشکیل حفره ها در پلاستیک های لاستیک مانند به هنگام اعمال تنش نسبت داد. بنابراین تغییر فرم ماتریس به هنگام اعمال برش منجر به جذب انرژی می شود. اگر چه وجود ذرات لاستیکی باعث چقرمگی می گردد اما مدول و استحکام در نقطه تسلیم را کاهش داده و می تواند منجر به افزایش قیمت نیز بشود.

کلسیم کربنات با اندازه ذرات بزرگتر از  $1 \mu\text{m}$  معمولاً به منظور کاهش قیمت به PVC اضافه می شود که منجر به کاهش استحکام کششی و مقاومت ضربه می گردد. تحقیقات نشان می دهد اضافه کردن نانو ذرات کلسیم کربنات چقرمگی و سختی پی وی سی را همزمان افزایش می دهد ، در حالی که اثر کمی بر روی مقاومت کششی دارد. تحقیقات انجام شده در زمینه تولید ارزان نانو ذرات کلسیم کربنات نشان می دهد این فرایند جدید کاربرد های زیادی در پلیمر های پی وی سی مانند لوله ها دارد.

در این قسمت به مکانیسمی که طی آن نانو ذرات کلسیم کربنات منجر به افزایش چقرمگی می شود می پردازیم. برای یک ماتریس پلیمری با ذرات معدنی سخت ، بهبود مدول با قانون مخلوط ها قابل توجیه است. از طرف دیگر چقرمه شدن با ذرات غیر عالی اندازه میکرون توسط مکانیسم توقف ترک و یا انحراف ترک توجیه می گردد. اگر چه کاربرد این تئوری برای ذرات نانو افزایش چقرمگی در PVC را پیش بینی نمی کند چون به دلیل ریز بودن بیش از حد ذرات تماس مؤثر آن با ترک در حال رشد کم می باشد.

در زمان طراحی مواد و اجزاء تشکیل دهنده بایستی چقرمگی و سختی مواد معین گردد. چقرمگی معمولاً با استفاده از آزمون ضربه ایزود و چارپی اندازه گیری می شود. نتایج این آزمون ها بستگی به هندسه نمونه مورد آزمون دارد. نتایج به صورت انرژی جذب شده به ازای واحد پهنای نمونه گزارش می شود . نتایج آزمون متناسب با این ابعاد تغییر می کند. بنابراین مقاومت ضربه به دلیل وابستگی به اندازه نمی تواند به عنوان ویژگی ذاتی مواد در طراحی مواد و یا اجزاء تشکیل دهنده استفاده شود. یک روش برای بررسی رفتار چقرمگی یا شکنندگی توسط مارشال و همکارانش طراحی شده است. در این روش سرعت آزاد شدن انرژی کرنش (GC) به طور مستقیم از آزمون ضربه روی نمونه های مختلف با عمق ناچ متفاوت اندازه گیری می شود.

آزمون سرعت آزاد شدن انرژی کرنش (GC) برای اندازه گیری چقرمگی U-PVC و m-PVC به کار می رود. آزمون GC نشان می دهد با افزایش درصد CPE در m-PVC چقرمگی افزایش می یابد. مقادیر چقرمگی از  $2/7 \text{ kJ/m}^2$  برای u-pvc به  $4/9 \text{ kJ/m}^2$  برای m-pvc با CPE 6 phr می رسد.

در این مطالعه مکانیسم مربوط به افزایش چقرمگی در حال بررسی می باشد. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از استفاده اصلاح کننده ضربه برای تقویت چقرمگی مقایسه شده است. تولید نانو کامپوزیت پی وی سی با مقادیر مختلف نانو ذرات کلسیم کربنات با روش اختلاط مذاب

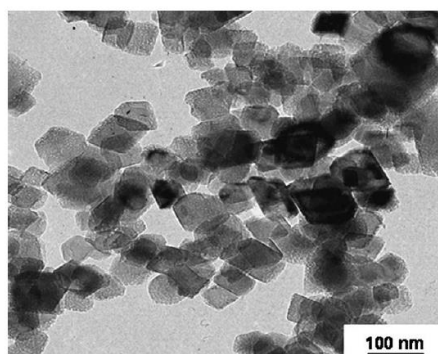
انجام می شود و رفتار چقرمگی- شکست ، مدول دینامیک و مقاومت نمونه های تولید شده اندازه گیری می شود. ساختار میکرو سطح شکست توسط دستگاه TEM (میکروسکوپ پراکنش الکترون) به منظور بررسی مکانیسم تغییر شکل مشاهده می شود.

### فرایند کردن مواد

گرید تجاری مواد اولیه شامل رزین PVC (K57) ، پایدار کننده حرارتی کلسیم - روی و روان کننده با 3، 6، 9، 12 و 20 قسمت وزنی نانو ذرات کلسیم کربنات در 100 قسمت پی وی سی (phr) در یک میسرکس خشک مخلوط می شود. یک نمونه نیز بدون نانو ذرات کلسیم کربنات ساخته می شود که شامل CPE 6phr می باشد نیز تهیه گردید. مخلوط پودر خشک در میکسر Papiemier تا دمای  $120^{\circ}\text{C}$  به مدت 15 دقیقه میکس می شود و پس از آن در میکسر سرد به مدت 2 دقیقه خنک می شود. مواد میکس شده در اکسترودر دو مارپیچ با سرعت مساوی مارپیچ ها در دمای  $160^{\circ}\text{C}$  تولید شده و سپس کامپوند به دست آمده خنک شده و به وسیله ماشین گرانول ساز ، گرانول می شود . پس از آن گرانول ها طی فرایند قالب گیری فشاری در دمای  $185^{\circ}\text{C}$  و فشار 2 MPa توسط دستگاه پرس به مدت 2 دقیقه فشرده شده و به شیت های مستطیل شکل تبدیل می شود.

### آنالیز ساختار میکرو

ساختار میکرو نانو ذرات کلسیم کربنات توسط TEM آنالیز می گردند. مساحت سطح نیز توسط روش اندازه گیری سطح BET در محیط نیتروژن محاسبه می شود. رطوبت ذرات قبل از اندازه گیری سطح با روش BET در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  تحت خلأ خارج می گردد. فیلم هایی با ضخامت 80-100 nm با استفاده از یک میکروتوم با تیغه الماس از روی نمونه ها برش داده می شود. سپس نمونه ها برای مشاهده توسط دستگاه TEM با مس پوشش داده می شوند. سطح شکست حاصل از آزمون خواص مکانیکی نیز با میکروسکوپ انتشار الکترونی ( FESEM ) مشاهده می شوند. نمونه ها قبل از مشاهده با کرم پوشش داده می شوند.

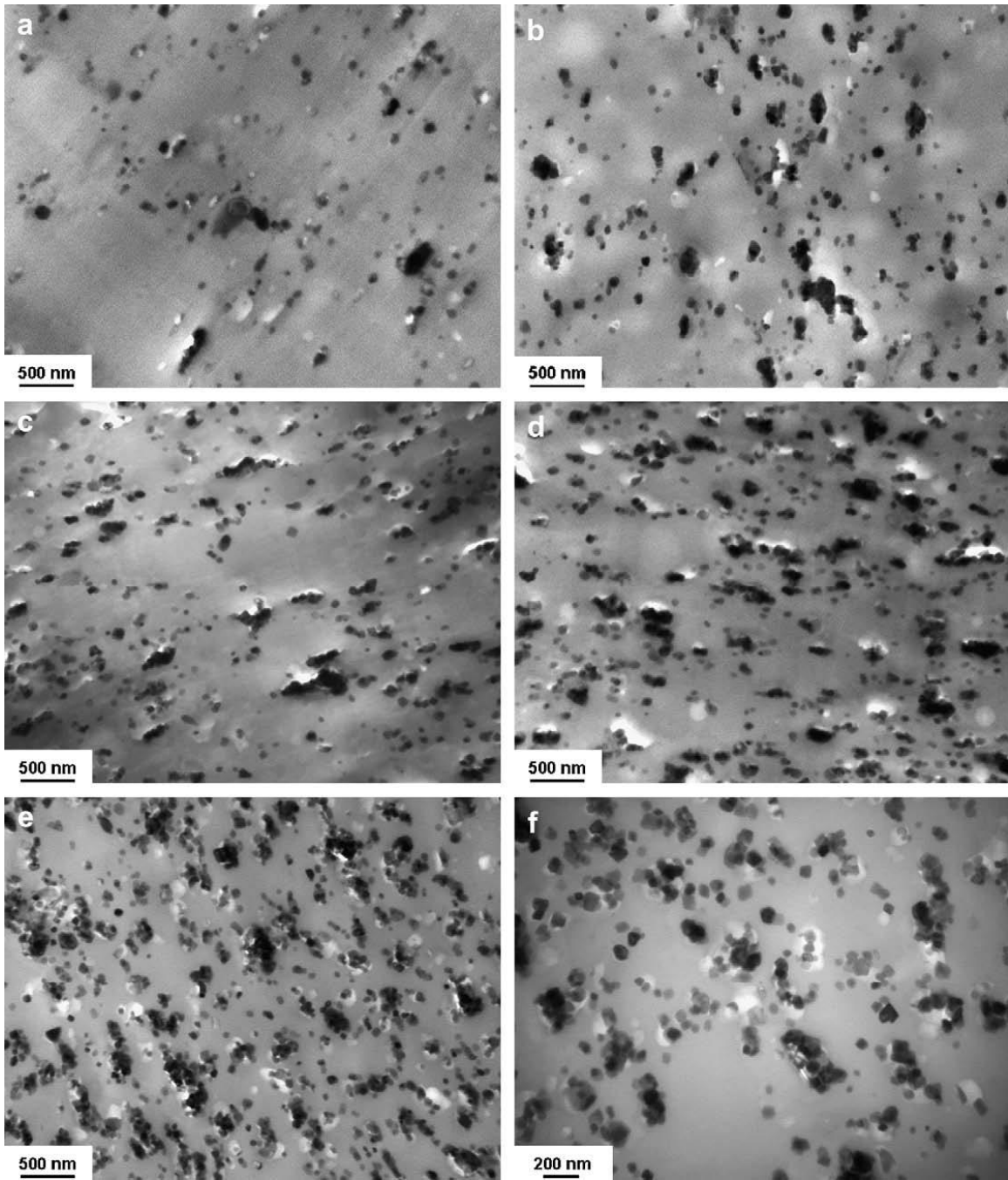


شکل 1. گراف TEM نانو ذرات کلسیم کربنات

### خواص مکانیکی

6 نمونه دمبلی کشش نوع 1 مطابق استاندارد R527:1996 از هر کامپوند تهیه می گردد. آزمون کشش مطابق استاندارد AS1145-1:2001 و با سرعت کشش 10 mm/min برای اندازه گیری مقاومت کششی انجام می شود .

نمونه های شکاف دار آزمون ضربه با ابعاد ( 100mm×12.7mm×5mm ) توسط اهر برش داده می شود و با استفاده از مته ای که در استاندارد DIS11673 توضیح داده شده شکاف داده می شود . شکاف ها با عمق 7 mm تا 0/8 ایجاد می شود. آزمون ضربه مطابق استاندارد AS1146.2-1990 با استفاده از دستگاه تست ضربه پاندول دار انجام می شود. نمونه ها در آزمایشگاه به مدت یک روز در دمای  $2^{\circ}\text{C} \pm$  قرار داده می شود. انرژی شکست نمونه توسط دستگاه تست ضربه با سرعت ضربه 2/93 m/s اندازه گیری می شود.

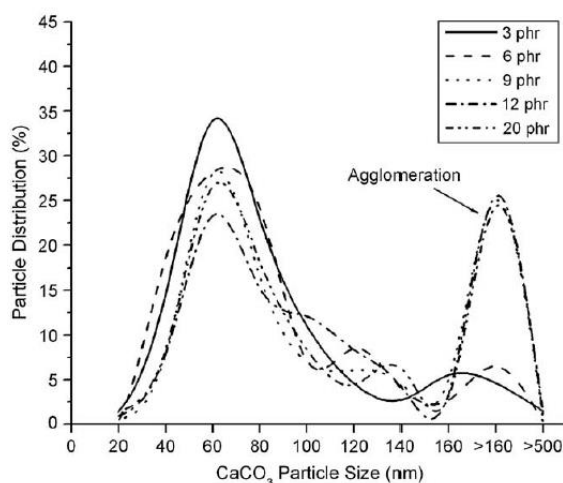


شکل 2. گراف TEM نانو کامپوزیت PVC با ( a ) 3 phr ( b ) 6phr ( c ) 9phr ( d ) 12phr ( e ) 20phr نانو ذرات کلسیم کربنات ( f ) میکروگراف TEM با بزرگنمای بالاتر برای نانو کامپوزیت با 20phr نانو ذرات کلسیم کربنات

## نتایج :

شکل 1 نتایج میکروگراف TEM نانو ذرات کلسیم کربنات استفاده شده جهت تقویت PVC را نشان می دهد. متوسط اندازه ذرات  $\pm 20 \text{ nm}$  می باشد. مساحت نمونه ها با استفاده از روش BET  $24 \text{ m}^2/\text{g}$  اندازه گیری شده است که با فرض کروی بودن ذرات و دانسیته  $2/65 \text{ g/cm}^3$  متوسط اندازه 47nm را می دهد.

شکل 2 میکروگراف TEM ماتریس PVC با 3phr نانو ذرات کلسیم کربنات که به صورت همگن در ماتریس توزیع شده است را نشان می دهد. توزیع بالای ذرات با استفاده از تنش برشی بالا در بین دو ماریچ به دست آمده است. شکل 2 (b-e) نشان می دهد که با افزایش درصد ذرات کلسیم کربنات کلوخه شدن ذرات بیشتر می شود. اثری از لایه لایه شدن بین ذرات و ماتریس در فرایند آماده سازی نمونه ها وجود ندارد.



شکل 3. توزیع اندازه ذرات با استفاده از گراف TEM

کلوخه شدن ذرات با استفاده از آنالیز تصویر در شکل 3 نشان داده شده است. از آنجا که تمامی ذرات کلسیم کربنات توزیع اندازه یکسان دارند زمانی که به ماتریس اضافه می شوند با فرض اینکه واکنشی بین آنها در طی فرایند اتفاق نمی افتد ذرات بزرگتر بیشتر کلوخه می شوند. درصد ذرات توزیع شده در ماتریس با افزایش حجم نانو ذرات کاهش می یابد و منجر به افزایش کلوخه شدن می گردد.

## خواص مکانیکی :

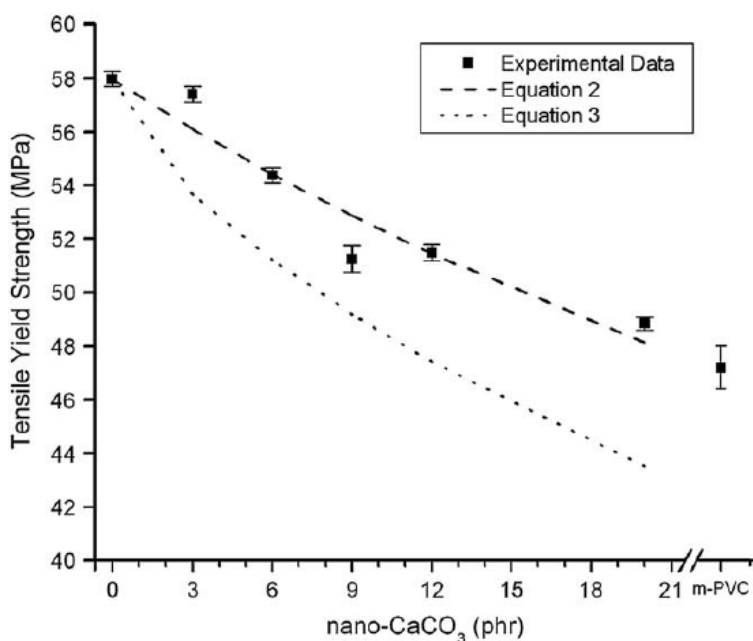
اضافه کردن نانو ذرات منجر به کاهش کمی در مقاومت کششی می شود (شکل 4) نانو ذرات معدنی سخت تنش موضعی را در ماتریس پلیمری ترویج می دهد و منجر به به هم پیوستگی حفره ها و شکست می شود. اثر درصد حجمی ذرات فیلر بر روی تنش تسلیم توسط معادله زیر مشخص می شود.

$$\sigma_{c,y} = \sigma_{m,y} (1 - \phi_p) \exp \frac{\beta \phi_p}{1 + 2.5 \phi_p}$$

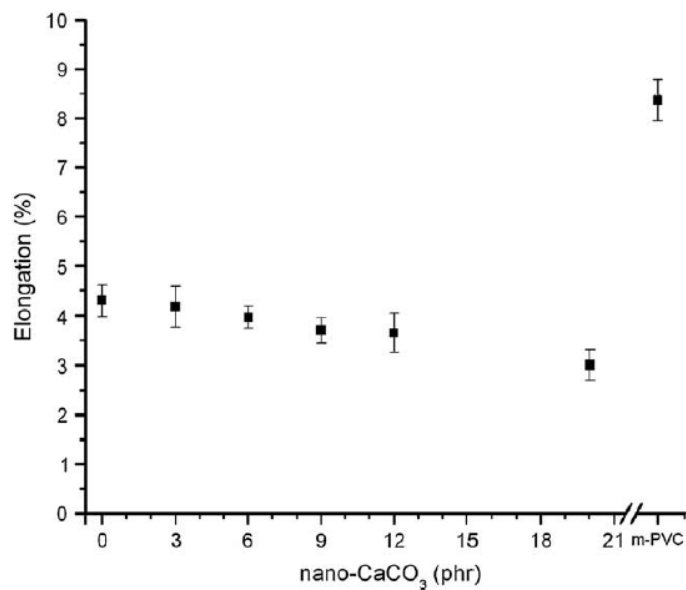
که  $\sigma_{m,y}$  تنش تسلیم ماتریس و  $\beta$  پارامتر بین سطحی، مشخص کننده فعل و انفعال ما بین ماتریس و نانو ذرات است. که با توجه به مقادیر آزمایشگاهی 1/31 می باشد. نتایج مشابهی توسط sun و همکارانش به دست آمده که نشان می دهد مقدار  $\beta$  برای PVC تقویت شده با نانو ذرات کلسیم کربنات با اندازه 80 nm برابر 1/39 می باشد. مقدار  $\beta$  با کاهش اندازه ذرات افزایش می یابد. همچنین با افزایش درصد حجمی نانو ذرات، میانگین اندازه ذرات به دلیل کلوخه شدن افزایش می یابد. بنابراین درصد حجمی بالای نانو ذرات در کامپوزیت ها منجر به مقدار کمتر  $\beta$  و در نتیجه مقدار کمتر مقاومت کششی می شود.

رابطه متداول مورد استفاده برای ذرات صلب با اندازه میکرون در معادله 3 داده شده است. همانگونه که در شکل 4 نشان داده شده است همبستگی داده های تجربی و معادله مذکور کم است. Nakamura و همکارانش کاهش جزئی را در مقاومت کششی کامپوزیت PVC تقویت شده با نانو ذرات کلسیم کربنات (اندازه 0/4 تا 0/6  $\mu\text{m}$ ) گزارش کرده اند در حالی که کامپوزیت های PVC با ذرات بزرگتر کلسیم کربنات کاهش قابل توجهی در مقاومت کششی دارد.

$$\sigma_{c,y} = \sigma_{m,y} (1 - 1.21\phi_p^{2/3})$$



شکل 4. تأثیر نانو ذرات کلسیم کربنات بر روی مقاومت کششی نانو کامپوزیت PVC

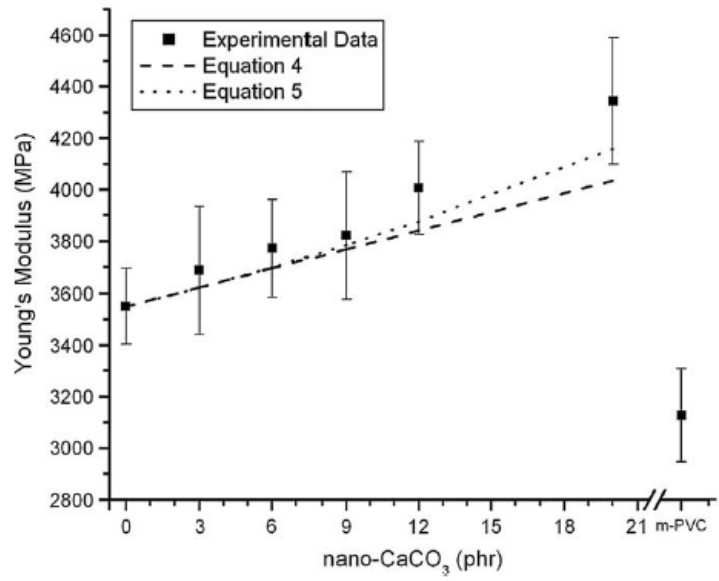


شکل 5. تأثیر نانو ذرات کلسیم کربنات بر روی کرنش در شکست نانو کامپوزیت PVC

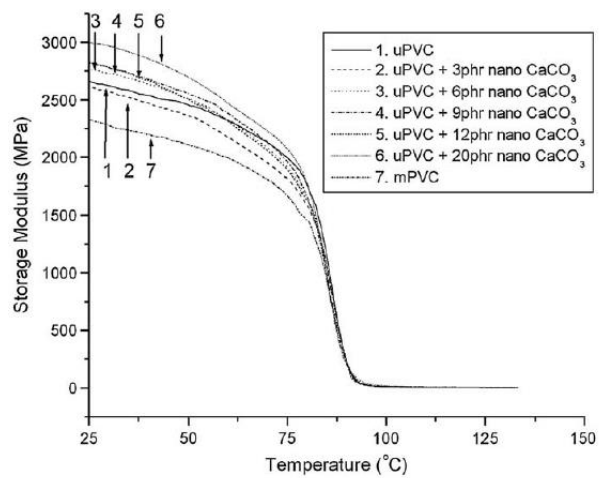
نانو ذرات در مقایسه با ذرات اندازه میکرون پیوند بهتری را با فاز ماتریس برقرار می کند که به دلیل سطح تماس بیشتر آن است و بنابراین نیاز به تنش بیشتری برای تشکیل حفره ها می باشد. اگر چه مقاومت کششی با افزایش درصد فیلر کاهش می یابد ، تنش تسلیم نانو کامپوزیت با 20phr نانو ذرات کلسیم کربنات بالاتر از تنش تسلیم m-pvc با 6 phr ، CPE می باشد.

کرنش در نقطه شکست با افزایش نانو ذرات کربنات کاهش می یابد (شکل 5) کاهش کرنش در نقطه شکست در PVC تقویت شده با ذرات کلسیم کربنات اندازه میکرون نیز مشاهده می شود. اگر چه این نتیجه با مشاهدات اخیر بر روی PVC تقویت شده با نانو ذرات کلسیم کربنات که نشان دهنده افزایش از دیاد طول در نقطه شکست است متناقض می باشد که مربوط به تشکیل حفره های بیضی شکل و در نتیجه انعطاف پذیری در کشش می باشد. این اختلاف ممکن است مربوط به متفاوت بودن تکنیک های تولید و یا افزودنی های مورد استفاده باشد که منجر به تأخیر در به هم پیوستن حفره ها در ماتریس نرم تر با مقاومت پایین تر می شود .

نتایج تست کشش نشان می دهد که افزایش نانو ذرات منجر به افزایش سفتی می شود(در شکل 6 نشان داده شده است) علاوه بر آن آنالیز مکانیکی- دینامیکی (شکل 7) افزایش مدول با افزایش درصد نانو ذرات کلسیم کربنات را در زیر دمای انتقال شیشه ای نشان می دهد. شکل 8 نشان می دهد مدول ذخیره در دمای محیط ۲۵ °C با افزایش نانو ذرات افزایش می یابد و نسبت به PVC و m-pvc بالا تر است. نتایج مشابهی توسط Xie و همکارانش ارائه شده است که سفت تر شدن PVC را با افزودن نانو ذرات کلسیم کربنات به PVC نشان می دهد.

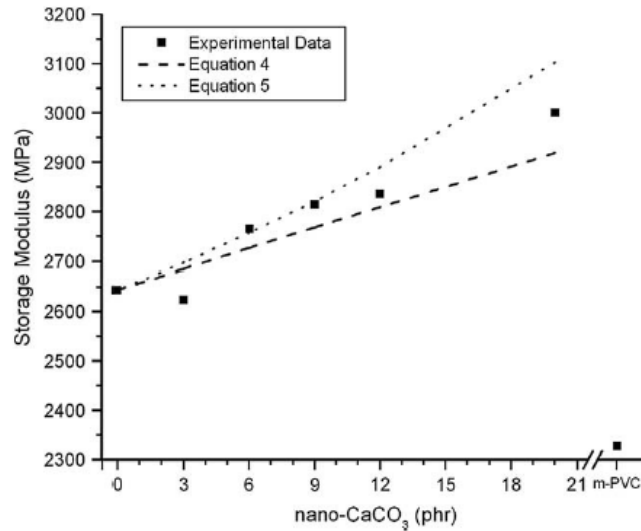


شکل 6. تأثیر نانو ذرات کلسیم کربنات روی مدول یانگ نانو کامپوزیت pvc در دمای 25 ° c



شکل 7. تغییرات مدول ذخیره نانو کامپوزیت PVC با درصد های مختلف نانو ذرات کلسیم کربنات با دما





شکل 8. تأثیر نانو ذرات کلسیم کربنات روی مدول ذخیره نانو کامپوزیت PVC در دمای 25 °C

افزایش مدول یانگ و مدول ذخیره در کامپوزیت های تقویت شده با ذرات سخت معدنی با قانون مخلوط ها بیان می شود :

$$E = \left( \frac{E_p E_m}{(1 - \phi_p) E_p + \phi_p E_m} \right)$$

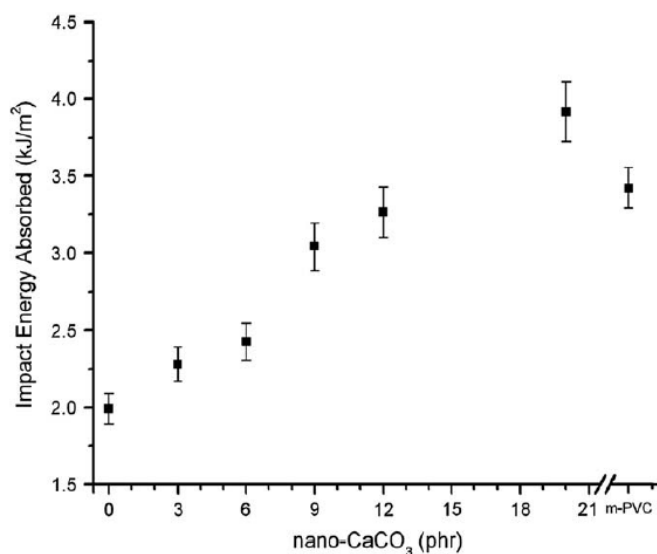
که  $\phi$  در صد حجمی و اندیس  $m$  و  $p$  به ترتیب فاز ماتریس و ذرات را نشان می دهد. با در نظر گرفتن  $E_p = 179 \text{ GPa}$  و  $E_m = 3.56 \text{ GPa}$ . مقدار قابل پیش بینی برای مدول یانگ به صورت خط تیره در شکل 10 نشان داده شده است. در مقادیر بالای درصد حجمی ذرات افزایش مدول بیشتر از مقدار پیش بینی شده با معادله است. اختلاف بین داده های تجربی و پیش بینی شده توسط معادله به دلیل قانون مخلوط ها می باشد که برای کامپوزیت های با ساختار لامینیت مناسبتر از کامپوزیت های تقویت شده با ذرات است و توزیع ذرات را در نظر نمی گیرد. رابطه اصلاح شده برای مدول یانگ کامپوزیت ها با در نظر گرفتن هندسه و درصد فشردگی (رابطه Nielson) به صورت زیر است :

$$E_c = E_m \left( \frac{1 + AB\phi_p}{1 - B\psi\phi_p} \right)$$

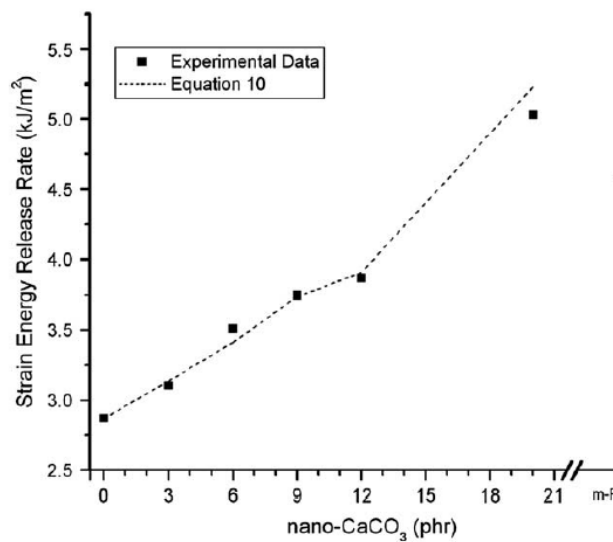
که  $A$  مقدار ثابتی بوده و بستگی به هندسه ذرات و نسبت پویسون فاز ماتریس دارد.  $B$  مقدار ثابت است و بستگی به سفتی ماتریس و ذرات دارد و  $\psi$  بستگی به درصد فشردگی ذرات دارد. نسبت پویسون ماتریس را  $0/4$  در نظر بگیرید. مقدار  $A$   $1/25$  و  $B$  نزدیک به  $1$  محاسبه شده است (به دلیل نسبت مدول بالای فیلر به ماتریس) و درصد فشردگی را برای کلوخه های تصادفی  $0/37$  در نظر بگیرید. مقدار محاسبه شده با استفاده از معادله به صورت خط چین در شکل 6 نشان داده شده است.

تفاوت قانون مخلوط ها و معادله Nielsen این است که معادله مخلوط ها هندسه ذرات را در نظر نگرفته است، اما به طور کلی در هر دو معادله مدول با کاهش درصد ذرات افزایش می یابد. زمانی که در معادله Nielson درصد فشردگی  $0/37$  در نظر گرفته شود مدول یانگ پیش

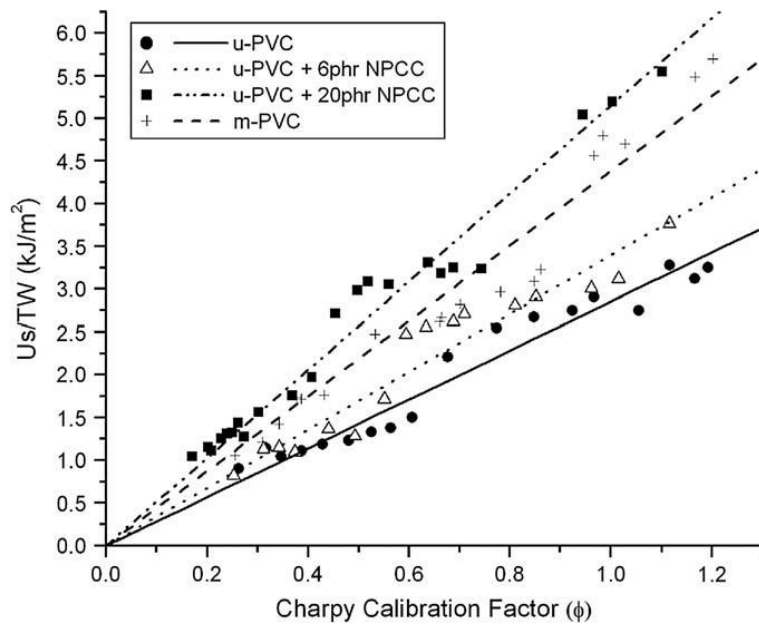
بینی شده از معادله، منطبق بر داده های تجربی می شود. (شکل 6) کلوخه شدن ذرات در درصد های بالاتر که در تصاویر TEM قابل مشاهده است نیز تأیید کننده این رفتار است. (شکل 2)



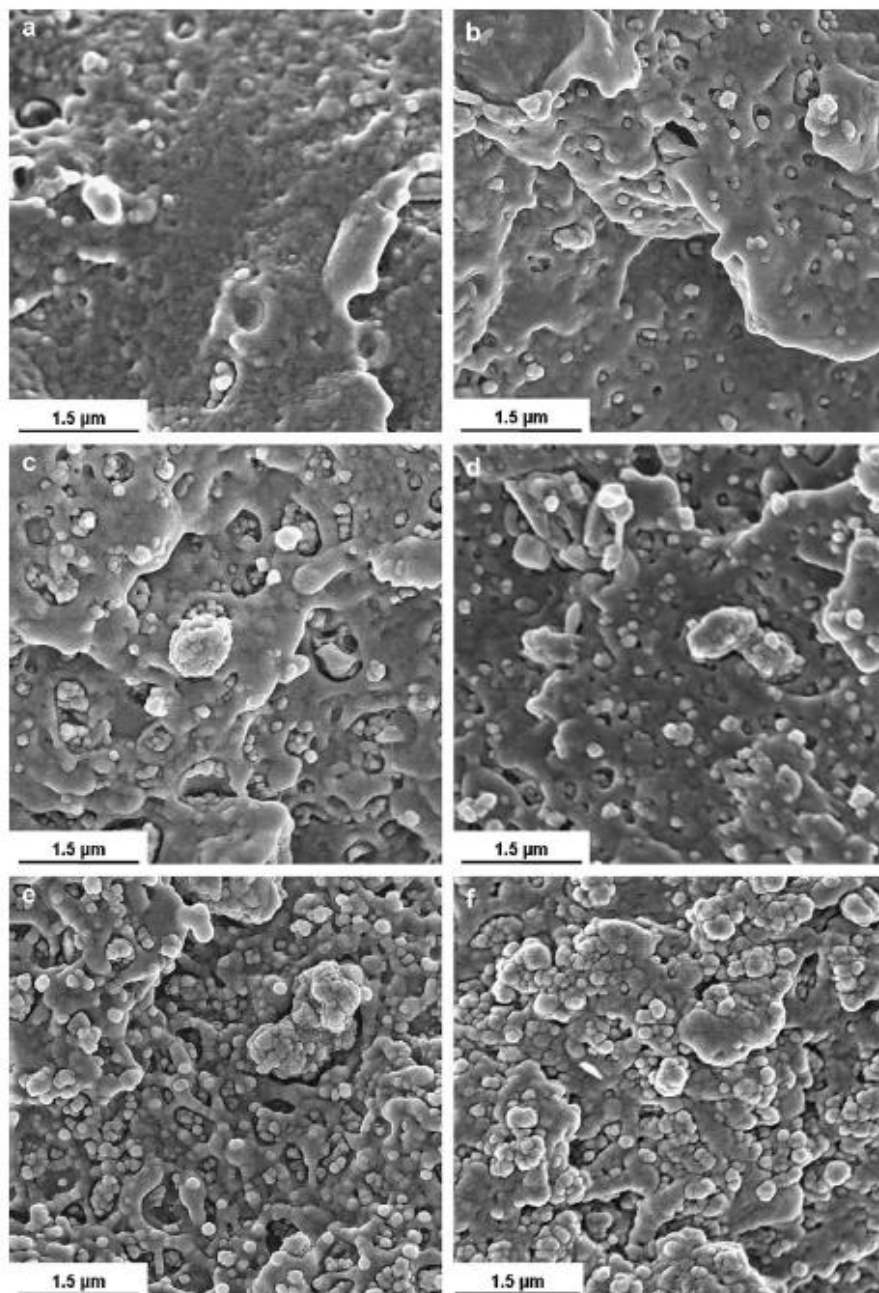
شکل 9. تأثیر نانو ذرات کلسیم کربنات روی انرژی ضربه چارپی به ازای واحد سطح شکست در نانو کامپوزیت PVC



شکل 10. تأثیر نانو ذرات کلسیم کربنات روی چقرمگی - شکست (سرعت آزاد شدن انرژی کرنش) در نانو کامپوزیت PVC



شکل 11. نتایج آزمایشگاهی از تست سرعت آزاد شدن انرژی کرنش



شکل 12. گراف FESEM سطح شکست تست ضربه برای نانو کامپوزیت PVC با (a) u-pvc (b) 3 phr (c) 6phr (d) 9phr (e) 12phr (f) 20phr نانو ذرات کلسیم کربنات

انرژی ضربه چارپی با استفاده از 20phr نانو ذرات کربنات 95٪ افزایش در مقایسه با pvc اصلاح نشده دارد و بالاتر از m-pvc نیز می باشد(شکل 9) . افزایش چقرمگی در نانو کامپوزیت بسیار بیشتر از کامپوزیت های حاوی ذرات کلسیم کربنات با اندازه بزرگ می باشد. اضافه کردن 20 phr وزنی کلسیم کربنات با اندازه 3μm در pvc سخت تنها منجر به 53٪ افزایش در مقاومت ضربه می گردد.

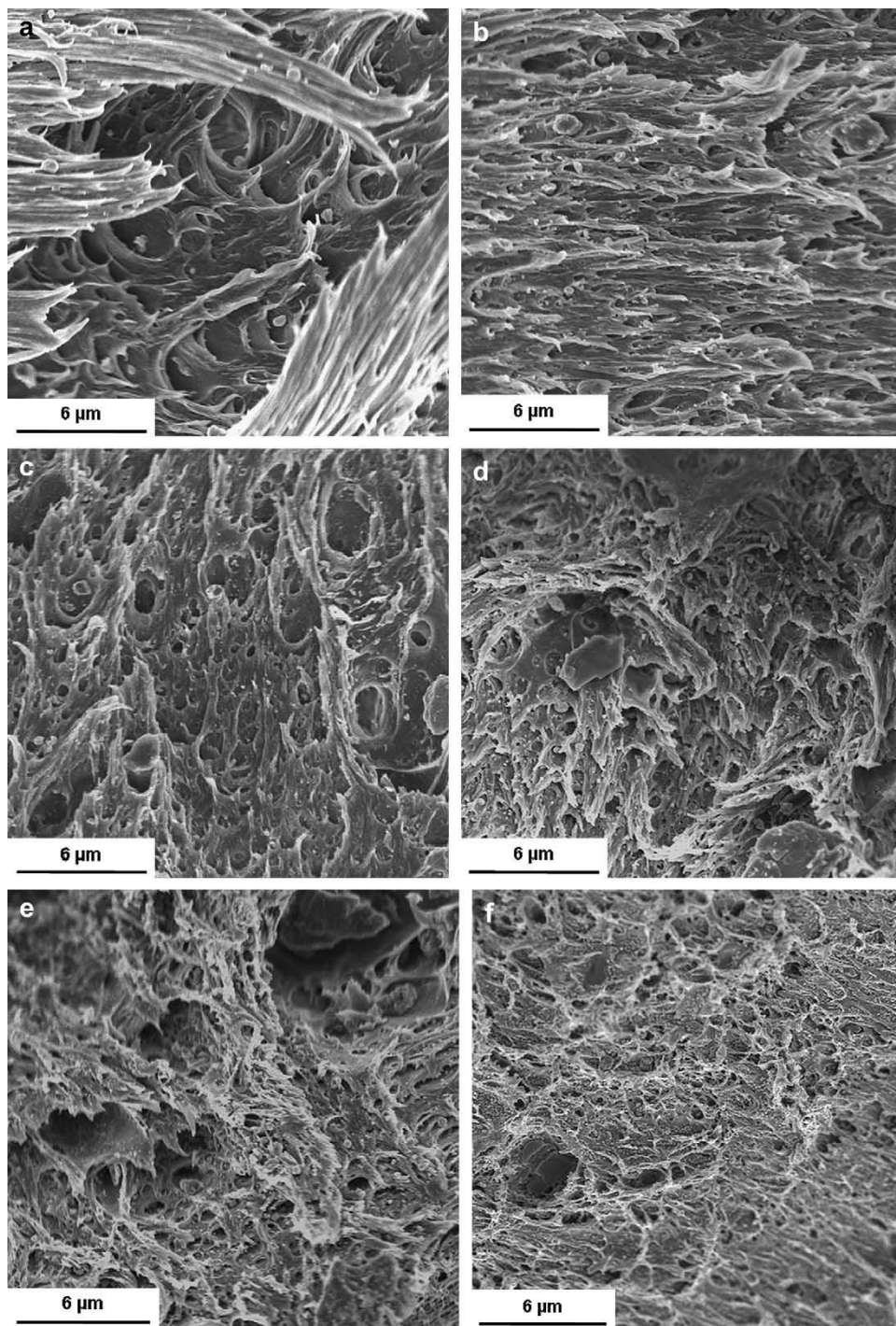
سرعت آزاد شدن انرژی کرنش (GC) توسط آزمون ضربه مشخص می شود و توسط رابطه زیر به دست می آید.

$$G = \frac{U_s}{TW} \cdot \left( \frac{dC}{C d\alpha} \right) = \frac{U_s}{TW \Phi(\alpha)}$$

که w پهنای نمونه و T ضخامت نمونه و  $U_s$  انرژی ضربه جذب شده می باشد. فاکتور تصحیح  $\Phi(\alpha)$  پارامتر هندسی می باشد که به مقدار C و نسبت طول ترک به پهنای نمونه  $\alpha (=a/w)$  بستگی دارد و با استفاده از روش Plati و Williams محاسبه می شود.

رسم نمودار انرژی جذب شده تحت نیروی ضربه ( $U_s$ ) تقسیم بر سطح مقطع نمونه (TW) بر حسب فاکتور تصحیح  $\Phi(\alpha)$  یک گراف خطی تشکیل می دهد که شیب آن GC می باشد. تغییرات GC با افزایش درصد نانو ذرات کلسیم کربنات در شکل 10 نشان داده شده است. معادله 6 بهترین خط عبوری از نقاط گراف می باشد. البته اتلاف های انرژی دیگری مانند انرژی جنبشی نمونه در حال حرکت وجود دارد . در این مطالعه فرض می شود که اتلاف های انرژی دیگر ثابت هستند. نتایج در شکل 11 نشان داده شده است.

GC با افزایش نانو ذرات کلسیم کربنات از مقدار  $2/89 (kj/m^2)$  برای PVC تا مقدار  $5/03 (kj/m^2)$  برای PVC با 20 درصد نانو ذرات کلسیم کربنات افزایش می یابد که در مقایسه با  $4/79 (kj/m^2)$  برای m-pvc به میزان قابل توجهی بالاتر است (شکل 10). افزایش چقرمگی در نتایج آزمون ضربه در شکل 9 نشانگر بهبود چقرمگی کامپوزیت با حضور نانو ذرات کلسیم کربنات می باشد.

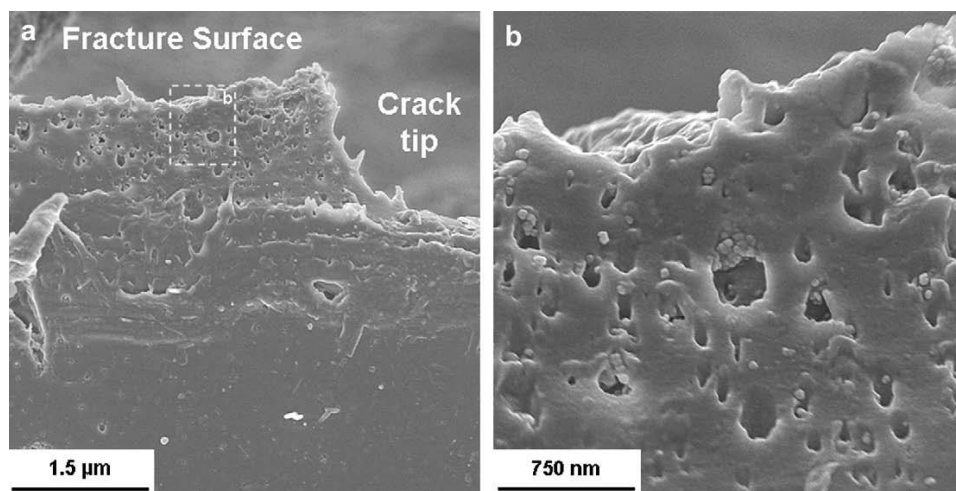


شکل 13. گراف FESEM سطح شکست تست کشش برای نانو کامپوزیت PVC با (a) u-pvc (b) 3 phr (c) 6phr (d) 9phr (e) 12phr (f) 20phr نانو ذرات کربنات کلسیم

## مشاهده سطح شکست

مشاهده سطح شکست آزمون ضربه نشان می دهد افزودن نانو ذرات، رفتار شکست را در مقایسه با PVC سخت بهبود می دهد. (شکل 12) در حالی که PVC سخت سطح شکست ترد و نسبتاً صافی دارد (شکل 12a) نانو ذرات کلسیم کربنات به وضوح روی سطح شکست کامپوزیت دیده می شود (شکل 12 b-f) و به طور واضح از فاز ماتریس جدا شده است. چنین جدایشی مابین ذرات کربنات و ماتریس در ساختار میکرو کامپوزیت ها پس از تست مکانیکی مشاهده نمی شود (شکل 2) که نشانگر جدایش دو فاز ماتریس و ذرات تحت تنش مکانیکی می باشد. اندازه و تعداد حفره ها با افزایش درصد نانو ذرات افزایش می یابد. تشکیل حفره ها اطراف ذرات فیلر نتیجه تمرکز تنش می باشد.

سطح شکست PVC سخت، تحت آزمون کشش در مقایسه با سطح صاف شکست در آزمون ضربه (شکل 12a) یک سطح الیافی ناشی از شکست نرم می باشد (شکل 13a). اضافه کردن نانو ذرات منجر به تغییر سطح شکست با حضور حفره ها در سطح می شود. (شکل 13 (b-e)) سطح الیافی و تعداد حفره ها با افزایش نانو فیلر افزایش می یابد و تشکیل حفره ها اطراف نانو ذرات باعث ترویج تنش می شود.



شکل 14. گراف FESEM نمونه های برش داده شده با میکروتوم از سطح شکست نمونه های آزمون ضربه برای نانو کامپوزیت PVC با 9 phr نانو ذرات کلسیم کربنات

(a) بزرگنمایی پایین (b) بزرگنمایی بالا

آنالیز SEM روی مقطع عرضی سطح شکست نشان دهنده وجود حفره ها در نزدیکی ترک های ایجاد شده در تست شکست می باشد. حفره ها و نواحی ضعیف با دور شدن از ناحیه شکست کاهش می یابد (شکل 14a). شکل (14b) با بزرگنمایی بالاتر حضور ذرات فیلر در هر حفره را نشان می دهد که مکانیسم تغییر شکل در جایی که حفره ها در ناحیه ترک تشکیل می شود را تأیید می کند.

نتیجه گیری :

1- اکسترودر دو مارپیچ می تواند توزیع یکنواختی از ذرات را در کامپوزیت های پی وی سی- نانو کلسیم کربنات به وجود آورد. با افزایش درصد ذرات کلوخه شدن ذرات بیشتر می شود.

2- افزایش نانو ذرات منجر به افزایش مقاومت ضربه، چقرمگی و مدول می شود اما کاهش کمی در استحکام کششی دارد.

3- کامپوزیت های با ذرات معدنی سایز نانو منجر به افزایش چقرمگی ، سختی و همچنین افزایش کمی در استحکام کششی پی وی سی نسبت به m-pvc با CPE 6phr می شود.

آنالیز سطح شکست نشان می دهد :

4- بزرگی تنش به کار برده شده برای تغییر شکل پلاستیک بستگی به حضور ذرات فیلر و فاصله ذرات مجاور دارد.

5- تغییر شکل پلاستیک اطراف ذرات به صورت بیضی بوده و سایز آن متناسب با قطر ذرات بوده و با درصد و فاصله ذرات مجاور تغییر می کند.

6- دلیل افزایش چقرمگی و مقاومت ضربه ، تشکیل حفره های سایز میکرو توسط نانو ذرات می باشد که به صورت موضعی منجر به تغییر شکل ماتریس اطراف ذرات می گردد.

7- حفره های موجود در ناحیه شکست مربوط به نانو ذرات کلسیم کربنات می باشد. تشکیل حفره ها از تغییر شکل پلاستیک جلوگیری کرده و منجر به تقویت چقرمگی می شود. تشکیل حفره ها منجر به کاهش استحکام کششی و کرنش در نقطه شکست نیز می شود.

مراجع

- [1] Voet A. J Polym Sci Part D Macromol Rev 1980;15(1):327-73.
- [2] Katz HS, Milewski JV. Handbook of fillers for plastics. Springer; 1987.
- [3] Sumita M, Tsukihi H, Miyasaka K, Ishikawa K. J Appl Polym Sci 1984;29(5):1523-30.
- [4] Sumita M, Tsukumo Y, Miyasaka K, Ishikawa K. J Mater Sci 1983;18(6):1758-64.
- [5] Mishra S, Perumal GB, Naik JB. Polym Plast Technol Eng 1997;36(4):489-500.
- [6] Wu DZ, Wang XD, Song YZ, Jin RG. J Appl Polym Sci 2004;92(4):2714-23.
- [7] Whittle AJ, Burford RP, Hoffman MJ. Plast Rubber Compos 2001;30(9):434-40.
- [8] ISO R527:1966, Plastic - determination of tensile properties.
- [9] Nielsen LE. J Polym Sci Part B Polym Phys 1979;17(11):1897-901.
- [10] Erhard G. Designing with plastics. Hanser Publishers; 2006.
- [11] Wetzel B, Rosso P, Hauptert F, Friedrich K. Eng Fract Mech 2006;73(16F):2375-98.