

# Optimization of Processing Conditions and Their Effects on PA6/PC/NBR Ternary Blends

Payam Abdoltajedini<sup>\*1</sup>, Ahmad Arefazar<sup>2</sup>, Gholam Reza Bakhshandeh<sup>3</sup>,  
Masoumeh Delkash<sup>1</sup>

1. South Tehran Branch, Islamic Azad University, P.O. Box: 11365-4435, Tehran, Iran

2. Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amir Kabir University of  
Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

3. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 17 June 2013, Accepted: 22 January 2014

## Abstract

The effects of processing conditions were studied for ternary polymer blends based on polyamide 6 (PA6), polycarbonate (PC) and Acrylonitrile-butadiene rubber (NBR). The ternary blends were accumulated at fixed compositions (PA6/ PC/NBR: 80/10 /10 wt%) using counter-rotating twin-screw extruder under three levels of blending sequence, die temperature, and screw speed. The experimental design was fulfilled by using Taguchi experimental analysis and the field emission scanning electron microscopy (FESEM) micrographs were used to investigate the microstructure. The mechanical properties such as tensile properties (Young's modulus and yield stress) and impact strength were highly influenced by processing conditions and the mean effects of each factor were calculated to investigate their role on mechanical properties of the blends.

## Key Words

ternary blends,  
phase morphology,  
tensile properties,  
impact strength,  
taguchi method

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: payam.tajedini@yahoo.com

## بهینه‌سازی شرایط فرایند و اثر آنها بر آمیخته سه‌تایی PA6/PC/NBR

پیام عبدالتاجدینی<sup>۱\*</sup>، احمد عارف آذر<sup>۲</sup>، غلام‌رضا بخشنده<sup>۳</sup>، معصومه دلکش

۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، صندوق پستی ۴۴۳۵-۱۱۳۶۵

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

۳- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲

در این مقاله، سه عامل از شرایط فرایند شامل دمای اختلاط، سرعت پیچ اکسترودر و ترتیب اختلاط اجزای آمیخته سه‌تایی بر پایه پلی‌آمید (PA6) و پلی‌کربنات (PC) به همراه لاستیک آکریلونیتریل بوتادی‌ان (NBR) در سه سطح مختلف متغیر واقع شدند که اثر هر یک از این شرایط فرایند بر شکل‌شناسی آمیخته و خواص مکانیکی آن بررسی شد. طراحی این آزمایش با نرم‌افزار تاگوچی انجام پذیرفت و در تمام نمونه‌های تهیه شده از آزمون میکروسکوپی الکترونی پویشی نشر میدانی (FESEM) برای بررسی ریزساختار استفاده شد. خواص مکانیکی بررسی شده استحکام ضربه‌ای و خواص کششی (مدول یانگ و تنش تسلیم) هستند که تحت تأثیر ریزساختار نتایج بسیار متغیری را در آمیخته نشان دادند.

بسیار ش

فصلنامه علمی - ترویجی

سال سوم، شماره ۴،

صفحه ۱۲-۴، ۱۳۹۲

ISSN: 2252-0449

### چکیده



پیام عبدالتاجدینی



احمد عارف آذر



غلام‌رضا بخشنده



معصومه دلکش

### واژگان کلیدی

آمیخته‌های سه‌تایی،  
شکل‌شناسی فازی،  
خواص کششی،  
استحکام ضربه‌ای،  
روش تاگوچی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

payam.tajedini@yahoo.com

## مقدمه

در دو دهه گذشته، آمیخته‌های پلیمری مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. این توجه به دلیل نیاز به مواد پلیمری جدید با خواص و کاربردهای اصلاح شده بود که موجب پژوهش‌های بسیاری در این زمینه شد. پژوهشگران در ابتدا ساخت و بررسی خواص آمیخته‌های پلیمری دو جزئی را مدنظر قرار دادند که اغلب آنها شکل‌شناسی ماتریس-پراکنده همراه با چسبندگی بین‌سطحی ضعیف نشان دادند [۴-۱]. آمیخته‌های چندجزئی که اخیراً توسعه یافته‌اند، دارای شکل‌شناسی‌های مختلفی هستند که خواص آمیخته‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر شکل‌شناسی و به دنبال آن خواص مکانیکی آمیخته‌های سه‌جزئی، ترکیب درصد، نسبت گرانروی اجزا، چسبندگی بین‌سطحی و شرایط فرایند بودند [۵-۱۰].

در پژوهش‌هایی که در باره اثر شرایط فرایند بر خواص آمیخته‌ها انجام پذیرفت، اثر چند عامل مانند دمای فرایند، سرعت پیچ اکسترودر، ترتیب اختلاط اجزا و نوع قالب‌گیری مشخص شد [۱۱]. Moini Jazani و همکاران اثر شرایط فرایند بر شکل‌شناسی و خواص مکانیکی آمیخته PP/PC/SEBS/SEBS-g-MHA را در ترکیب درصد ثابت توضیح دادند. آمیخته سه‌تایی در سه سطح از دمای حدیده (۲۳۵، ۲۴۵ و ۲۵۵°C)، سرعت پیچ اکسترودر (۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ rpm) و سه ترتیب اختلاط ( $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$ ) تهیه شد. ترتیب اختلاط  $M_1$ ، اختلاط همزمان همه اجزای آمیخته بود. ترتیب اختلاط  $M_2$ ، پیش‌اختلاط SEBS، PC و SEBS-g-MAH و افزودن آن به ماتریس PP بود و  $M_3$  پیش‌اختلاط PP و SEBS-g-MAH و افزودن آن به اجزای دیگر بود. آنها دریافتند، افزایش دما و سرعت پیچ اکسترودر خواص مکانیکی را بهبود می‌دهد و ترتیب اختلاط  $M_3$  بهترین نتایج مکانیکی و ساختار فازی را به دست می‌دهد [۱۲]. یکی دیگر از عوامل، شرایط فرایند نوع قالب‌گیری آمیخته‌هاست. Ha و همکاران گزارش کردند، پراکندگی ذرات فاز پراکنده در قالب‌گیری تزریقی بسیار بهتر از قالب‌گیری فشاری است. آنها بیان کردند، شکست قطره‌های کامپوزیتی طی قالب‌گیری تزریقی رخ می‌دهد، اما برای قالب‌گیری فشاری پدیده انعقاد قطره‌ها رخ می‌دهد [۱۳].

اثر نسبت گرانروی اجزای پراکنده در تشکیل شکل‌شناسی هسته-پوسته و اندازه قطره‌های پراکنده در سایر پژوهش‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت و بیان شد که اندازه هسته در آمیخته‌های سه‌تایی به وسیله نسبت گرانروی فاز هسته به فاز پوسته معین می‌شود. همچنین، تعیین اندازه قطره‌ها در ماتریس نیز به وسیله نسبت

گرانروی فاز پوسته به فاز ماتریس معین می‌شود [۱۴]. اثر گرانروی و کشش بین‌سطحی بر شکل‌شناسی آمیخته سه‌تایی PET/EVA/PP بررسی شد. PET به عنوان ماتریس و دو نوع درجه مختلف از EVA استفاده شدند. در این آمیخته مشخص شد، EVA در فاز هسته قرار گرفته و همراه ذرات PP شکل‌شناسی هسته-پوسته را تشکیل داده‌اند [۱۵].

در بررسی‌های گذشته اثر ترکیب درصد بر اندازه ذرات فاز پراکنده و قطره‌های با شکل هسته-پوسته مشخص شد. در پژوهشی که بر آمیخته سه‌تایی HDPE/PS/PMMA انجام گرفت، مشخص شد که اندازه قطره‌های با شکل هسته-پوسته به نسبت مقدار بین آمیخته‌های HDPE/PMMA و HDPE/PS وابسته است [۱۶].

در این پژوهش، اثر تغییرات شرایط فرایند بر شکل‌شناسی و خواص مکانیکی آمیخته PA6/PC/NBR بررسی شده است. عوامل بررسی شده شامل دمای حدیده، سرعت پیچ اکسترودر و ترتیب اختلاط اجزای آمیخته بودند که اثر آنها با استفاده از عکس‌های FESEM و آزمون‌های مکانیکی مشخص شد.

## تجربی

## مواد

سه پلیمر استفاده شده در این پژوهش، پلی‌آمید ۶ با نام تجاری Akulon-F130B، ساخت شرکت DSM هلند با چگالی  $1.3 \text{ g/cm}^3$ ، دمای ذوب  $220^\circ\text{C}$  و شاخص جریان مذاب  $0.9 \text{ g/10min}$ ، پلی‌کربنات با نام تجاری Makrolon-2800، ساخت شرکت Bayer آلمان با چگالی  $1.21 \text{ g/cm}^3$ ، دمای ذوب  $250^\circ\text{C}$  و شاخص جریان مذاب  $10 \text{ g/10min}$  و ۷-لاستیک آکریلونیتریل بوتادیان با نام تجاری Kumho Petrochemical، ساخت شرکت Kosyn-KNB 35L کره با چگالی  $0.98 \text{ g/cm}^3$ ، گرانروی مونی در  $100^\circ\text{C}$  برابر  $41 \text{ ML}(1+4)$  و مقدار آکریلونیتریل ۳۴٪ بودند.

## روش‌ها و دستگاه‌ها

## طراحی آزمایش به روش تاگوچی

در این پژوهش، سه پارامتر ترتیب اختلاط، دمای اختلاط و سرعت پیچ اکسترودر از شرایط فرایند هنگام اختلاط متغیر در نظر گرفته شده که هر یک از این شرایط در سه سطح مختلف متغیر واقع شدند (جدول ۱). ترکیب این شرایط موجب حاصل شدن تعداد زیادی مراحل آزمایش می‌شود که انجام آنها زمان‌بر و پرهزینه

جدول ۲- نمونه‌های تهیه شده در سه ترتیب اختلاط متفاوت.

نمونه	دما، T (°C)	ترتیب اختلاط، M	سرعت پیچ، (rpm) R
۱	۲۳۰	M <sub>1</sub>	۷۰
۲	۲۳۰	M <sub>2</sub>	۱۰۰
۳	۲۳۰	M <sub>3</sub>	۱۳۰
۴	۲۴۰	M <sub>1</sub>	۱۳۰
۵	۲۴۰	M <sub>2</sub>	۷۰
۶	۲۴۰	M <sub>3</sub>	۱۰۰
۷	۲۵۰	M <sub>1</sub>	۱۰۰
۸	۲۵۰	M <sub>2</sub>	۱۳۰
۹	۲۵۰	M <sub>3</sub>	۷۰

نیم‌رخ ۳: ۲۲۰، ۲۴۵، ۲۵۰، ۲۵۵، ۲۵۵، ۲۵۰°C

سه سطح از سرعت پیچ اکسترودر که برای این اختلاط انتخاب شدند عبارتند از: ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ rpm. طرح‌بندی آزمایش آرایه‌های متعامد برای سه سطح از تغییرات لحاظ شده برای هر یک از شرایط فرایند در جدول ۲ آورده شده است. پس از اختلاط پلیمرها در اکسترودر، رشته‌ها از حلیده خارج و در حمام آب خنک شده، سپس به وسیله یک دستگاه گرانول‌ساز به گرانول تبدیل می‌شوند. پیش از عمل قالب‌گیری به منظور شکل‌دهی، آمیخته‌ها به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌خانه خشک شدند. نمونه‌های دمبلی‌شکل از آمیخته برای آزمون کشش و نمونه‌های شکاف‌دار استاندارد برای آزمون ضربه به وسیله PAYA injection molding machine آماده شدند. این دستگاه تزریق دارای سرعت بارگیری rpm ۴۵ و فشار تزریق ۹۵ bar بوده و مدت خنک شدن آمیخته در آن ۴۵ s است. نیم‌رخ دمایی برای ۴ منطقه گرمایی موجود در سیلندر منطقه تغذیه (قیف تغذیه)، منطقه تراکم، منطقه سنجش و منطقه حلیده (نازل) به ترتیب برابر ۱۸۰، ۲۲۰، ۲۴۰ و ۲۳۰°C بود. همچنین، دمای قالب در ۲۳۰°C نگه داشته شد. ۹ نمونه ساخته شده از PA6/PC/NBR که حاصل طراحی تاگوچی در تغییرات انجام گرفته در شرایط فرایند در جدول ۲ فهرست شده‌اند.

#### آزمون‌های مکانیکی

آزمون کشش برای قطعات دمبلی‌شکل از آمیخته PA6/PC/NBR به ضخامت ۰.۲±۰.۰۳/۵ cm با استفاده از دستگاه آزمون ضربه از استاندارد ASTM D-638 استفاده شد که در آن سرعت نمونه‌ها

جدول ۱- عوامل و سطح تغییرات آنها طبق توضیحات تاگوچی.

سطح تغییرات			عامل		
۳	۲	۱	واحد	نشانه	نام عامل
۲۵۰	۲۴۰	۲۳۰	°C	T	دمای حلیده
۱۳۰	۱۰۰	۷۰	rpm	R	سرعت پیچ
M <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	-	M	ترتیب اختلاط

است. روش مرسوم برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و در کنار آن حفظ صحت و کیفیت داده‌ها، طراحی آزمایش به روش تاگوچی است. این روش می‌تواند انتخاب مناسبی را از عوامل متغیر و مراحل تغییر آنها در آزمایش به دست دهد. افزون بر این، امکان مقایسه اثر هر یک از این عوامل نسبت به سایر آنها امکان‌پذیر است. با توجه به کارهای انجام شده در سایر پژوهش‌ها [۱۷، ۱۸]، جدول استاندارد L9 تاگوچی برای آرایه‌های متعامد این طراحی انتخاب شد. نرم‌افزار استفاده شده در این طراحی برای دست یافتن به شرایط بهینه و تجزیه و تحلیل نتایج Design-Expert 8.0.7.1 Trial بود.

#### آماده‌سازی نمونه‌ها

آمیخته‌های سه‌تایی بر پایه PA6/PC/NBR در یک اکسترودر دوپیچی ناهمسوگرد (L/D: ۱۶) با ترکیب درصد ثابت PA6/PC/NBR برابر ۸۰/۱۰/۱۰ اختلاط یافتند. اختلاط با سه ترتیب اختلاط در سه سطح از نیم‌رخ دمایی و سرعت پیچ اکسترودر انجام گرفت. سه ترتیب اختلاط به روش زیر بود:

روش ۱ (B.S1): گرانول‌های خشک شده اجزای تشکیل دهنده آمیخته به طور همزمان در اکسترودر ساخت کولین اختلاط یافتند.

روش ۲ (B.S2): گرانول‌های خشک شده که از پیش اختلاط دو فاز کمتر آمیخته (PC و NBR) به دست آمدند، در اکسترودر دوپیچی با PA6 به عنوان فاز ماتریس اختلاط یافتند.

روش ۳ (B.S3): گرانول‌های خشک شده که از پیش اختلاط دو فاز پلاستیکی آمیخته (PA6 و PC) به دست آمدند، در اکسترودر دوپیچی با NBR اختلاط یافتند.

سه سطح از نیم‌رخ دمایی بر پایه دمای حلیده اکسترودر برای ۶ ناحیه گرمایی سیلندر، از ناحیه خوراک‌دهی تا ناحیه حلیده به ترتیب به شکل زیر است:

نیم‌رخ ۱: ۲۳۰°C، ۲۳۵، ۲۳۵، ۲۳۰، ۲۲۵، ۲۰۰

نیم‌رخ ۲: ۲۴۰°C، ۲۴۵، ۲۴۵، ۲۴۰، ۲۳۵، ۲۱۰

در حین کشش ۵۰ mm/min است. مقدار نیروی وارد شده بر دمبل‌های آمیخته، به مقدار ۲۰۰۰ kg تنظیم شد. همچنین، به منظور اندازه‌گیری مقدار مقاومت نمونه‌ها در برابر اعمال ضربه، برای تمام نمونه‌های آمیخته آزمون ضربه به روش ایزود طبق استاندارد ASTM D 256 با استفاده از KARL Frank pendulum-type tester انجام شد. زاویه شکاف در همه نمونه‌ها ثابت و برابر ۴۵° و عمق آنها ۲/۵±۰/۰۱ mm بود.

### شکل‌شناسی

بررسی ریزساختار نمونه‌های آمیخته سه تایی PA6/PC/NBR، با میکروسکوپ الکترونی پویشی (FESEM) HIT S4160 انجام پذیرفت. پیش از تصویربرداری، نمونه‌ها در نیتروژن مایع خشک شده و سطح آنها با لایه نازکی از طلا به منظور ایجاد رسانش الکتریکی در سطح آمیخته‌ها پوشیده شد.

### نتایج و بحث

نتیجه آزمون‌های مکانیکی نمونه‌هایی که در شرایط انتخابی به روش تاگوچی تهیه شدند، در جدول ۳ درج شده‌اند. این نتایج تجربی نمایانگر اثر هر یک از شرایط فرایند شامل دمای حدیده، ترتیب اختلاط و سرعت پیچ اکسترودر بر خواص مکانیکی آمیخته PA6/PC/NBR هستند. همچنین، در این جدول نتایج آزمون‌های مکانیکی PA6 خالص نیز برای نشان دادن اثر آمیخته‌سازی بر

ماتریس PA6 آمده است.

برای نشان دادن اثر هر یک از شرایط فرایند بر خواص مکانیکی، نمودارهای دوگانه از دو خاصیت مکانیکی آمیخته، به شکل تابعی از نمونه‌های تهیه شده رسم شدند. شکل ۱ دو خاصیت مکانیکی تنش تسلیم و ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌هایی را که در شرایط دمایی مختلف دسته‌بندی شده‌اند، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، در تمام نمونه‌ها تنش تسلیم به نسبت PA6 خالص کاهش داشته است. این امر به دلیل اثر منفی NBR در فاز ماتریس است. حد نهایی تنش تسلیم در آمیخته‌ها به وسیله قانون مخلوط‌ها [۱۹،۲۰] به دست آمد که چسبندگی کامل بین فازها را نشان می‌دهد:

$$\sigma_{yb} = \sigma_{ym}(1 - \phi_d) + \sigma_{yd}\phi_d \quad (1)$$

که  $\sigma_{yb}$ ،  $\sigma_{yb}$  و  $\sigma_{ym}$  به ترتیب تنش تسلیم آمیخته، ماتریس و فاز پراکنده و  $\phi_d$  کسر حجمی فاز پراکنده هستند. در این پژوهش، مقدار تنش تسلیم برای PA6 و PC با استفاده از نمودار تنش- کرنش برابر ۴۱/۵۸ و ۶۲/۲۳ MPa حاصل شد. در حالی که مقدار تنش تسلیم محاسبه شده به طور نظری برای آمیخته PA6/PC/NBR برابر ۴۳/۶۴ به دست آمد. بیشترین انحراف از این قانون (معادله (۱)) مقدار افت چسبندگی اجزای آمیخته و به وجود آمدن نقص در نمونه را نشان می‌دهد، که دلیلی بر اثر منفی افزودن فازهای پراکنده و به ویژه فاز NBR است.

در بررسی نمودار تنش تسلیم در شکل ۱ مشهود است، در نمونه‌های اختلاط یافته با ترتیب  $M_2$  در هر سه دمای فرایند افزایش

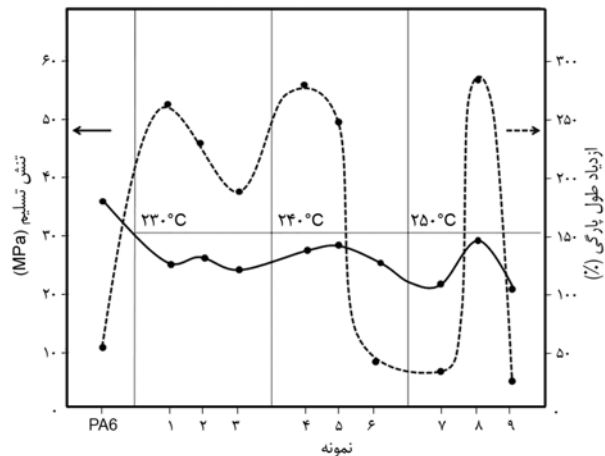
جدول ۳- نتایج آزمون‌های مکانیکی برای آمیخته‌های PA6/PC/NBR.

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (MPa)	استحکام ضربه‌ای (J/m)	ازدیاد طول (%)
۱	۲۶/۹۲±۰/۱۵	۸۵۸/۰±۱۳۵/۰۹	۱۳۲/۱۲±۱/۲۰	۲۵۸
۲	۲۷/۱۱±۰/۱۳	۸۶۷/۰±۱۳۵/۰۹	۱۴۳/۵۶±۱/۵۷	۲۲۷
۳	۲۶/۸۳±۰/۴۸	۸۵۹/۰±۱۷/۳۴	۱۳۷/۳۴±۰/۹۴	۱۸۲
۴	۲۸/۰۵±۰/۵۵	۸۷۸/۵±۱۰۸/۳۰	۱۴۷/۲۴±۰/۱۸	۲۷۳
۵	۲۸/۵۱±۰/۴۷	۸۸۱/۵±۷۷/۳۶	۱۴۷/۱۶±۰/۸۵	۱۹۴
۶	۲۶/۷۶±۰/۱۳	۸۳۶/۵±۲۴/۷۸	۱۲۴/۰۰±۱/۱۰	۴۱
۷	۲۲/۱۴±۰/۵۹	۸۰۳/۵±۷۵/۳۱	۱۲۱/۸۳±۱/۱۸	۳۷
۸	۲۹/۰۸±۰/۲۸	۸۹۴/۰±۲۷/۰۰	۱۵۷/۷۱±۱/۱۲	۲۸۳
۹	۲۱/۰۱±۰/۲۱	۷۰۲/۰±۲۳/۴۱	۱۰۶/۳۱±۱/۳۰	۲۱
PA6	۴۱/۵۸±۰/۲۶	۱۰۲۵/۰±۴۷/۵۳	۳۶/۱۷±۰/۴۳	۵۰

در ترتیب اختلاط  $M_3$ ، فاز NBR به مستریج ساخته شده از PA6 و PC اضافه شده است. بنابراین، پراکندگی و چسبندگی بین سطحی مناسبی برای NBR حاصل شده و تنش تسلیم در نمونه‌های ۳، ۶ و ۹ اختلاط یافته با ترتیب  $M_3$  در هر سه دمای فرایند کاهش یافته است. بررسی عکس‌های FESEM نمونه‌ها در شکل ۲ تأیید می‌کند که در هر سه دمای فرایند، نمونه‌هایی که با ترتیب اختلاط  $M_2$  تهیه شده‌اند (نمونه‌های ۲، ۵، ۸) دارای کمترین تعداد حفره با کوچک‌ترین قطر هستند. این نتایج در جدول ۴ که حاصل تجزیه و تحلیل عکس‌ها با نرم‌افزار بوده کاملاً مشخص است.

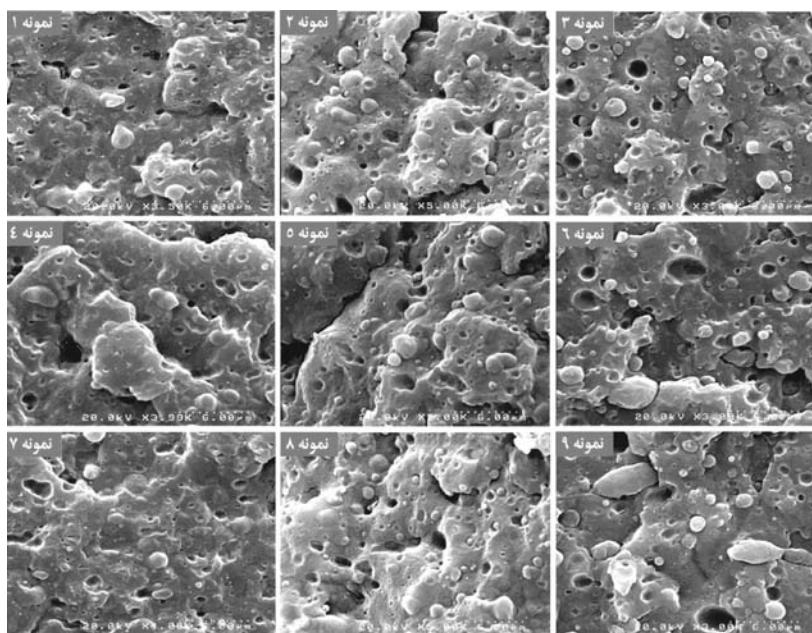
در تخمین اثر دمای حدیده بر تنش تسلیم فازهای پراکنده مشاهده می‌شود، در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  تنش تسلیم بیشترین مقدار را دارد که حاکی از نقش دمای فرایند بر چسبندگی بین سطحی است. اما در همین دما، افت تنش تسلیم حتی نسبت به دو دمای دیگر نیز مشاهده می‌شود. این کاهش با اثر سرعت پیچ اکسترودر بر زمان اقامت پلیمر در اکسترودر و بنابر این در گرما دارد، قابل توجه است. بررسی شکل ۲ این موضوع را تأیید می‌کند که با افزایش دما به  $250^{\circ}\text{C}$  تعداد ذرات کمتری از سطح نمونه‌ها جدا شده‌اند و تعداد حفره‌ها به طور نسبی در این نمونه‌ها کاهش یافته است. تجزیه و تحلیل این عکس‌ها که در جدول ۴ آمده است، تعداد کمتر حفره‌ها را با قطر کمتر در نمونه‌های فرایند شده در دمای  $250^{\circ}\text{C}$  تأیید می‌کند.

در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های اختلاط یافته در



شکل ۱- نمودار دوگانه تنش تسلیم و ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌های تهیه شده.

تنش تسلیم مشاهده می‌شود. مشخص شده است، تنش تسلیم به چسبندگی بین سطحی اجزای آمیخته بسیار وابسته است که با افزایش دمای فرایند، این چسبندگی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، ازدیاد تنش تسلیم آمیخته‌ها در ترتیب اختلاط  $M_2$  می‌تواند به دلیل افزایش کشش بین سطحی میان فاز پراکنده و فاز ماتریس باشد که با افزودن مستریج ساخته شده از PC و NBR به فاز ماتریس حاصل شود. زیرا دوبار اختلاط که برای فازهای پراکنده در ترتیب اختلاط  $M_2$  انجام گرفته است، سبب دو بار گرمادهی فازها در فرایند شده که این امر چسبندگی بین سطحی را تا حدودی افزایش داده است. اما



شکل ۲- ریزنگارهای FESEM از آمیخته‌های PA6/PC/NBR در شرایط فرایندی مختلف طبق جدول ۱.

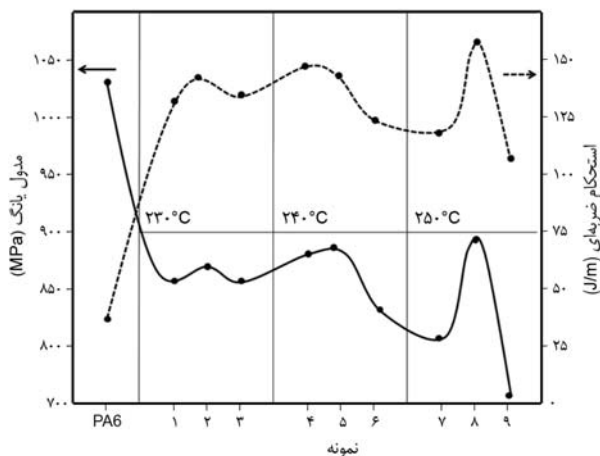
جدول ۴- نتایج تجزیه FESEM نمونه‌های آمیخته PA6/PC/NBR

نمونه	میانگین قطر ذرات ( $\mu\text{m}$ )	تعداد ذرات منفرد	میانگین قطر حفره‌ها ( $\mu\text{m}$ )	تعداد حفره‌ها
۱	۱/۸۹	۲۲	۰/۹۸	۴۲
۲	۲/۱۷	۴۰	۱/۱۸	۴۶
۳	۲/۲۳	۳۱	۱/۷۵	۴۷
۴	۲/۹۶	۱۷	۱/۳۲	۳۴
۵	۲/۲۴	۴۹	۱/۱۸	۳۲
۶	۳/۱۲	۲۲	۲/۱۱	۴۱
۷	۱/۹۲	۲۸	۱/۱۵	۳۳
۸	۱/۲۳	۵۷	۰/۸۳	۳۱
۹	۱/۸۹	۲۲	۰/۹۸	۴۲

است که برای PC انجام گرفته است که سبب کاهش وزن مولکولی PC شده است. بنابراین، مدول یانگ در  $M_2$  نسبت به ترتیب اختلاط  $M_1$  و  $M_3$  افزایش یافت.

همچنین، افزایش مدول یانگ نمونه ۸ در  $250^\circ\text{C}$  مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مدول را در بین نمونه‌ها دارد. این افزایش به علت کاهش گرانشی PC به عنوان تقویت کننده در نمونه ۸ است که ناشی از افزایش دما تا  $250^\circ\text{C}$  است. این پدیده سبب جهت‌یافتگی PC به هنگام اختلاط در اکسترودر دوپیچی می‌شود که این پدیده با افزایش سرعت پیچ در نمونه ۸ به مقدار  $130\text{ rpm}$  تشدید می‌شود. بنابراین، کاهش مدول ناشی از تخریب احتمالی PA6 و کاهش وزن مولکولی آن تا حدودی جبران شده است.

در شکل ۳ نمودار استحکام ضربه‌ای آمیخته‌ها دیده می‌شود که



شکل ۳- نمودار دوگانه مدول یانگ و استحکام ضربه‌ای نمونه‌های تهیه شده.

شرایط مناسب، ازدیاد طول تا پارگی آمیخته به مقداری بین ۴ تا ۵ برابر نسبت به PA6 خالص افزایش یافته است. این مسئله از دلایل روشن افزودن فاز لاستیکی NBR و دست یافتن به شکل‌شناسی مناسب در آمیخته است. اما در بین نمونه‌ها، نمونه ۸ در دمای  $250^\circ\text{C}$  که در ترتیب اختلاط  $M_2$  و سرعت پیچ  $130\text{ rpm}$  فرورش یافته است، بیشترین ازدیاد طول مشاهده می‌شود. این در حالی است که در دو نمونه دیگر در همین دما به علت کاهش سرعت پیچ در حین فرایند به  $100\text{ rpm}$  و  $70\text{ rpm}$ ، زمان اقامت پلیمرها در اکسترودر افزایش یافته است. همچنین، تخریب گرم‌مکانیکی برای اجزای آمیخته، به‌ویژه PA6، رخ داده و افت خواص و به طور مشخص افت ازدیاد طول تا پارگی در آمیخته‌ها را سبب شده است.

در شکل ۳ نمودار دوگانه‌ای از مدول یانگ و استحکام ضربه‌ای برای نمونه‌های تهیه شده رسم شده که آثار مثبت و منفی آمیخته‌سازی در آنها نسبت به PA6 خالص قابل مشاهده است. در نمودار مربوط به مدول یانگ، افت مدول در همه نمونه‌ها نسبت به PA6 خالص مشاهده می‌شود، اما در نمونه‌های تهیه شده از آمیخته سه‌تایی PA6/PC/NBR قابل مشاهده است که در هر سه دمای  $230^\circ\text{C}$ ،  $240^\circ\text{C}$  و  $250^\circ\text{C}$  نمونه‌های تهیه شده با ترتیب اختلاط  $M_2$  (نمونه‌های ۲، ۵ و ۸) دارای بیشترین مقدار مدول نسبت به باشد که در ترتیب اختلاط  $M_2$ ، فاز NBR به علت دو بار اختلاط با PC زمان کافی را برای قرار گرفتن در فاز پوسته به دور قطره‌های PC دارد. بنابراین، تعداد ذرات با شکل‌شناسی هسته-پوسته افزایش می‌یابد. اثر بعدی ترتیب اختلاط  $M_2$ ، افزایش احتمال جهت‌گیری PC به دلیل ساخت مستریج از PC و NBR و دو مرحله اختلاطی

از روش تاگوچی انجام شد. نرم‌افزار نیز بهترین شرایط اختلاط را برای آمیخته سه‌جزئی PA6/PC/NBR در ترتیب اختلاط  $M_2$ ، دمای  $250^{\circ}\text{C}$  و سرعت  $130\text{ rpm}$  تأیید کرد.

### نتیجه‌گیری

اختلاط مذاب آمیخته PA6/PC/NBR در سه سطح از شرایط فرایند شامل ترتیب اختلاط، نیم‌رخ دمایی و سرعت پیچ اکسترودر انجام پذیرفت تا اثر این پارامترهای فرایند بر خواص مکانیکی و ریزساختار آمیخته مشخص شود. خواص مکانیکی شامل خواص کششی و استحکام ضربه‌ای آمیخته سه‌تایی به وسیله شرایط فرایند تحت تأثیر قرار می‌گیرد و نقش هر یک از عوامل به کمک نمودار تحلیل شد. نتایج آزمون کشش و آزمون ضربه‌ای نشان داد، ازدیاد طول تا پارگی، تنش تسلیم، مدول یانگ و استحکام ضربه‌ای آمیخته‌های سه‌تایی در ترتیب اختلاط  $M_2$  و  $250^{\circ}\text{C}$  افزایش یافت که تحلیل نتایج به روش تاگوچی نیز این شرایط را به عنوان شرایط مناسب اختلاط تأیید کرد.

### مراجع

1. Kudva R.A., Keskkula H., and Paul D.R., Morphology and Mechanical Properties of Compatibilized Nylon6/Polyethylene Blends, *Polymer*, **40**, 6003-6021, 1999.
2. Yan L., Yong Z., and Zhang Y., Morphology and Mechanical Properties of HDPE/SRP/Elastomer Composites: Effect of Elastomer Polarity, *Polym. Test.*, **23**, 83-90, 2004.
3. Oshinski A.J., Keskkula H., and Paul D.R., Rubber Toughening of Polyamides with Functionalized Block Copolymers: 1. Nylon-6, *Polymer*, **33**, 268-283, 1992.
4. Kayano Y., Keskkula H., and Paul D.R., Effect of Polycarbonate Molecular Weight and Processing Conditions on Mechanical Behaviour of Blends with a Core-Shell Impact Modifier, *Polymer*, **37**, 4505-4518, 1996.
5. Hobbs S.Y., Dekkers M.E., and Watkins J.V.H., Effect of Interfacial Forces on Polymer Blend Morphologies, *Polymer*, **29**, 1598-1602, 1988.
6. Ravati S. and Favis B.D., Morphological States for a Ternary Polymer Blend Demonstrating Complete Wetting, *Polymer*, **51**, 4547-4561, 2010.
7. Hassan A., Wahit M.U., and Yern Chee C., Mechanical and Morphological Properties of PP/NR/LLDPE Ternary Blend-Effect of HVA-2, *Polym. Test.*, **22**, 281-290, 2003.
8. Omonov T., Harrats S.C., and Groeninckx G., Co-continuous and Encapsulated Three Phase Morphologies in Uncompatibilized and Reactively Compatibilized Polyamide 6/Polypropylene/ Polystyrene Ternary Blends Using Two Reactive Precursors, *Polymer*, **46**, 12322-12336, 2005.
9. Cheng T.W., Keskkula H., and Paul D.R., Property and Morphology Relationships for Ternary Blends of Polycarbonate, Brittle Polymers and an Impact Modifier, *Polymer*, **33**, 1606-1619, 1992.
10. Tchomakov K.P. and Favis B.D., Composite Droplets with Core/Shell Morphologies Prepared From HDPE/PS/PMMA Ternary Blends by Twin-Screw Extrusion, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 749-759, 2004.
11. Shokoohi S.H. and Arefazhar A., A Review on Ternary Immis-



- cible Polymer Blends: Morphology and Effective Parameters, *Polym. Adv. Tech.*, **20**, 433-447, 2009.
12. Moini Jazani O., Arefazar A., Saeb M.R., and Ghaemi A., Evaluation of Mechanical Properties of Polypropylene/Polycarbonate/SEBS Ternary Polymer Blends Using Taguchi Experimental Analysis, *J. Appl. Polym. Sci.*, **116**, 2312-2319, 2010.
  13. Ha M.H., Kim B.K., and Kim E.Y., Effects of Dispersed Phase Composition on Thermoplastic Polyolefins, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 179-188, 2004.
  14. Luzinov I., Pagnouille C., Xi K., Huynh G., and Jermo R., Composition Effect on the Core-shell Morphology and Mechanical Properties of Ternary Polystyrene/Styrene-butadiene rubber/Polyethylene Blends, *Polymer*, **40**, 2511-2520, 1999.
  15. Abolhasani M.M., Arefazar A., and Shokoohi S.H., PET/EVA/PP Ternary Blends: An Investigation of Extended Morphological Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **112**, 1716-1728, 2009.
  16. Reignier J. and Favis B.D., Control of the Subinclusion Microstructure in HDPE/PS/PMMA Ternary Blends, *Macromolecules*, **33**, 6998-7008, 2000.
  17. Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
  18. Hajian M., Koohmareh G.A., and Rastgoo M., Investigation of Factors Affecting Synthesis of Polyvinyl Butyral by Taguchi Method, *J. Appl. Polym. Sci.*, **115**, 3592-3597, 2010.
  19. Kolarik J., Lednický F., Pukanaszky B., and Pegoraro M., Blends of Polycarbonate with Poly(methyl Methacrylate)-Miscibility, Phase Continuity, and Interfacial Adhesion, *Polym. Eng. Sci.*, **32**, 886-893, 1992.
  20. Pukanaszky B., Interfacial Interactions in Particulate Filled Thermoplastics: Mechanism, Strength, Properties, *Macromol. Chem.*, **70/71**, 213-223, 1993.
  21. Huang J.J., Keskkula H., and Paul D.R., Elastomer Particle Morphology in Ternary Blends of Maleated and Non-maleated Ethylene-based Elastomers with Polyamides: Role of Elastomer Phase Miscibility, *Polymer*, **47**, 624-638, 2006.
  22. Huang J.J., Keskkula H., and Paul D.R., Rubber Toughening of an Amorphous Polyamide by Functionalized SEBS Copolymers: Morphology and Izod Impact Behavior, *Polymer*, **45**, 4203-4215, 2004.
  23. Kim B.K., Kim M.S., and Kim K.J., Viscosity Effect in Polyolefin Ternary Blends and Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **48**, 1271-1278, 1993.
  24. Hemmati M., Nazokdast H., and Shariat Panahi H., Study on Morphology of Ternary Polymer Blends. II. Effect of Composition, *J. Appl. Polym. Sci.*, **82**, 1138-1146, 2001.
  25. Tchomakov K.P., Favis B.D., Huneault M.A., Champagne M.F., and Tofan F., Compositodroplets with Core/Shell Morphologies Prepared from HDPE/PS/PMMA Ternary Blends by Twin-screw Extrusion, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 749-759, 2004.
  26. MoiniJazani O., Arefazar A., Jafari S.H., Beheshty M.H., and Ghaemi A., A Study on the Effects of SEBS-g-MAH on the Phase Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Polycarbonate/SEBS Ternary Polymer Blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, **121**, 2680-2687, 2011.
  27. Abolhasani M.M., Arefazar A., and Mozdianfard M., Effect of Dispersed Phase Composition on Morphological and Mechanical Properties of PET/EVA/PP Ternary Blends, *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, **48**, 251-259, 2010.