



تحلیل تجربی استحکام ضربه، استحکام کششی و مدول الاستیک نانوکامپوزیت‌های سه تایی پلی آمید 6 / الاستومر / نانولوله‌های کربن

سعید مظفری¹، ولی اله پناهی زاده^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* صندوق پستی 136-16785، v.panahizadeh@sru.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این تحقیق، خواص مکانیکی ترکیبات پایه پلی آمید 6 / پلی اولفین الاستومر (PA6/POE) تقویت شده با نانولوله‌های کربن مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوکامپوزیت‌ها شامل 10 و 20 درصد وزنی پلی اولفین الاستومر، 0، 1، 2 و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن (MWCNT) و 5 و 10 درصد وزنی پلی اولفین مالئیک آنیدرید ساخته شدند. برای مشاهده و بررسی کیفیت توزیع نانولوله‌ها در ماتریس پلیمری از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. تصاویر SEM نشان دادند که حضور نانولوله‌های کربن تا 2 درصد وزنی در هر دو ماتریس پلی آمید حاوی 10 و 20 درصد وزنی پلی اولفین با توزیع و پراکندگی قابل قبولی همراه شده است. در حالی که افزودن 3 درصد وزنی از نانولوله‌ها در هر دو ماتریس موجب تجمع و کلوخگی آن‌ها شده است. نتایج نشان دادند که افزودن 2 درصد وزنی نانولوله‌های کربن استحکام کششی و مدول الاستیک ترکیبات را به ترتیب به میزان‌های 21٪ و 23٪ به خوبی بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، افزودن تنها 1 درصد وزنی از نانولوله‌های کربن توانسته است استحکام ضربه ترکیبات را به میزان 9٪ افزایش دهد. از طرفی، حضور 20 درصد وزنی از پلی اولفین و 10 درصد وزنی از عامل سازگار کننده، استحکام ضربه را به ترتیب به میزان 20٪ و 16٪ افزایش داده است. همچنین، رویه‌های استخراج شده نشان دادند که عموماً بین اثر فاکتورهای ورودی بر خواص مکانیکی مورد بررسی برهم‌کنش خاصی وجود ندارد. نهایتاً، مقدار ضریب تعیین بالای 92٪ برای همه خواص مکانیکی نشان داد که همخوانی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های رگرسیون استخراج شده وجود دارد.

دریافت: 1400/09/15

پذیرش: 1400/12/09

کلیدواژگان

نانوکامپوزیت

خواص مکانیکی

پلی آمید

نانولوله‌های کربن

Experimental analysis of impact strength, tensile strength and elastic modulus of polyamide 6 / polyolefin elastomer / carbon nanotubes / carbon nanotubes

Saeed Mozaffari, Valiollah Panahizadeh*

Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16785-136, Tehran, Iran v.panahizadeh@sru.ac.ir

Keywords

Nanocomposites
Mechanical properties
Polyamide
Carbon Nanotubes

Abstract

In this research, the mechanical properties of polyamide 6/polyolefin elastomer (PA6/POE) blends reinforced with carbon nanotubes have been studied. Nanocomposites consisted of 10 and 20 wt% polyolefin elastomer, 0, 1, 2 and 3 wt% carbon nanotubes (MWCNT) and 5 and 10 wt% poly olefin elastomer maleic anhydride (POE-Gma) were made. Scanning electron microscope (SEM) were used to observe the dispersion and distribution quality of MWCNT in the matrix. SEM images showed an acceptable distribution of carbon nanotubes up to 2 wt% in both polyamide matrices with 10 and 20 wt%, while adding 3 wt% of nanotubes in both matrices was associated with nanotubes accumulation. The results showed that the addition of 2 wt% of carbon nanotubes improved the tensile strength and elastic modulus of the compounds by 21% and 23%, respectively. Moreover, the addition of only 1wt.% of carbon nanotubes has been able to increase the impact strength of the compounds by 9%. On the other hand, the presence of 20wt.% of polyolefin and 10wt.% of coupling agent increased the impact strength by 20% and 16%, respectively. The surfaces extracted from full factorial design method showed that there are no notable interaction between the input parameters in the case of mechanical properties. Finally, the *R-squared* above 92% for all mechanical properties showed that there is a good agreement between the experimental results and the extracted regression models.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Mozaffari, S., Panahizadeh, V., "Experimental analysis of impact strength, tensile strength and elastic modulus of polyamide 6 / polyolefin elastomer / carbon nanotubes / carbon nanotubes", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1668-1676, 2022.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.544381.1759

1- مقدمه

پلی آمید جزء پلیمرهای پرکاربردی است که به‌طور قابل توجه در صنایع لوازم خانگی، پزشکی و بسته‌بندی استفاده می‌شود [1,2]. استحکام و سفتی نسبتاً خوب پلی آمید باعث شده است که به‌عنوان یک پلاستیک مهندسی پرکاربرد در صنایع مختلف مورد استفاده قرار بگیرد [3]. از سوی دیگر، این پلیمر دارای معایبی همچون جذب زیاد آب، ناپایداری ابعادی و حساسیت به ترک در دمای پایین بوده و همچنین در کاربردهایی که نیاز به مقاومت ضربه‌ای بالا می‌باشند، دارای محدودیت است که این خواص منفی باعث شده کاربرد پلی آمید در برخی صنایع با مشکل مواجه شود [4]. برخی از محققان با افزودن الاستومرها به ترموپلاستیک‌ها به عنوان یک‌فاز تقویت کننده خواص مکانیکی باعث افزایش استحکام شکست و چقرمگی شدند.

چیو و همکاران [5] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری پلی آمید 6 و ترموپلاستیک الاستومری پلی یورتان و سازگار کننده POE-g-MA پرداختند. با ساختن این ترکیب (80PA/20TPU/20POE-g-MA) استحکام کششی به میزان 18٪ و استحکام خمشی به میزان 42٪ کاهش یافته است. آرارات و همکاران [6] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمری پلی آمید 6 و پلی اتیلن سبک و عامل سازگار کننده LDPE-g-MH پرداختند. به‌منظور به دست آوردن ترکیبات از هر دو پلیمر به میزان 50 درصد وزنی و عامل سازگار کننده به میزان 5، 10، 15 و 20 درصد وزنی ترکیب کردند. مدول الاستیک و استحکام کششی به خاطر حضور عامل سازگار کننده به ترتیب از 241 MPA به 200 MPA و از 12.5 Mpa به 11.8 Mpa کاهش پیدا کرده‌اند. چایو و همکارانش با افزودن 5٪ POE به پلی آمید، به 36٪ افزایش استحکام ضربه، 26٪ ازدیاد طول در شکست، 15٪ کاهش مدول الاستیک، دست پیدا کردند [7]. در تحقیق دیگری وانگ و همکارانش [8] نشان دادند که حضور تنها 25 درصد وزنی از لاستیک EPDM می‌تواند استحکام ضربه پلی آمید را به مقدار چشمگیر 700٪ بهبود بخشد.

به‌طور کلی پلی آمید و لاستیک اصلاح نشده از نظر ترمودینامیکی قابل اختلاط نیستند بنابراین، دانه‌های بزرگ ذرات لاستیک در طی فرآوری مذاب تشکیل می‌شوند. لاستیک فرآوری شده همیشه گزینه خوبی برای بهبود سازگاری بین فاز لاستیک و ماتریس پلیمر است [9]. بنابراین، الاستومرهای اتیلن - پروپیلن پیوند یافته با مالنیک انیدرید، مانند POE g-MA اغلب برای سازگار شدن الاستومرها با پلی آمیدها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با توجه تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود با بهبود استحکام ضربه و چقرمه تر شدن کامپوزیت خواصی مانند مدول الاستیک و استحکام کششی کاهش داشته است. بنابراین، برای بهبود فعل و انفعال سطحی بین پلیمر ماتریس و فاز پراکنده، با معرفی یک نانوذره به عنوان جز سوم انتظار می‌رود که مدول و استحکام ترکیبات افزایش پیدا کند یا از دست دادن استحکام را به حداقل میزان کاهش دهد. گزارش شده است که افزودن 1 phr از نانولوله‌های کربن چند جداره می‌تواند مدول الاستیک و استحکام کششی پلی آمید را به ترتیب به میزان‌های 77٪ و 20٪ افزایش دهد [10]. همچنین، چن و همکارانش [11] دریافتند که با افزودن 1٪ وزنی نانولوله کربنی، مدول الاستیک، استحکام کششی و سختی پلی آمید 6 خالص به ترتیب 162٪، 149٪ و 106٪ افزایش پیدا می‌کند. اسماعیلی و همکاران [12] به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت پلی آمید 6 و نانولوله‌های کربن پرداختند. مشخص شد که درصد وزنی نانولوله‌های کربن مؤثرترین پارامتر روی استحکام کششی و سختی می‌باشد. با افزودن نانولوله‌های کربنی به ماتریس پلیمری به میزان 1 درصد، بیشترین افزایش استحکام و سختی را خواهد داشت. توشی هیروا و همکارانش

[13] در طی تحقیقی تأثیر ذرات نانولوله‌های کربن را بر ایاف پلی آمید 6 را بررسی کردند. با افزودن نانولوله‌های کربن مدول کششی 6 درصد و استحکام کششی 10٪ افزایش نشان داد. بهبود خواص مکانیکی به نسبت برهم‌کنش ذرات نانولوله‌های کربن با زنجیره پلی آمید 6 خود را نشان می‌دهد. از سوی دیگر در قسمت‌های از پلی آمید 6 فازهای سختی به دلیل کلوخه شدن نانوذرات دیده می‌شود.

برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی متعادل، ترکیبات سه‌گانه در زمینه‌های تحقیقاتی دانشگاهی و صنعتی بسیار مورد توجه بوده‌اند. برای دهه‌های طولانی پرکننده‌هایی مانند دوده و سلیکا برای جبران خواص کاهش یافته ناشی از آلیاژسازی پلیمری استفاده می‌شده است؛ اما در دو دهه گذشته، استفاده از مواد در مقیاس نانوذرات شامل خاک رس ورقه‌ای و نانولوله‌های کربن به‌عنوان پرکننده در مواد پلیمری برای این منظور مورد توجه تحقیقات دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است [14].

نتایج حاصل از تحقیق میسترتا و همکارانش [15] نشان داده است که با حضور هم‌زمان پلی اتیلن و نانوذرات خاک رس در زمینه پلیمری پلی آمید، مدول الاستیک به میزان 22٪ و استحکام کششی به میزان 20٪ افزایش می‌یابد و از طرفی ازدیاد طول در شکست ترکیبات دچار کاهش 78 درصدی شده است. بیکشامای و همکاران [16] به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت سه‌تایی PA6/PMMA/MWCNT در حضور هیدروکسیل و اسید کربوکسیلیک با نسبت‌های متفاوت پرداختند. مدول کششی با افزایش درصد وزنی پلی متیل متاکریلات در مخلوط‌ها از 810 MPa به 1335 MPa افزایش یافت. همچنین نانوکامپوزیت PA6/PMMA با حضور 1٪ وزنی از نانولوله‌های کربن بیشترین مدول کشش به مقدار 1298 MPa را به نمایش گذاشت. در جدیدترین تحقیق انجام شده توسط دانش پایه و همکاران [17] مشخص شد حضور الاستومر تا 20 درصد وزنی در ماتریس پلی لاکتیک اسید موجب افزایش 120 درصدی استحکام ضربه و کاهش 23 درصدی استحکام کششی شده است. همچنین، نتایج آن‌ها نشان داد حضور هم‌زمان نانولوله‌های کربن و در زمینه پلیمری مذکور باعث ایجاد یک تعادل مناسب در استحکام و چقرمگی ترکیبات شده است. به طور کلی بررسی و مقایسه تحقیقات پیشین در زمینه نانوکامپوزیت‌های سه تایی با زمینه متشکل از دو پلیمر نشان می‌دهد که الاستومر و نانولوله‌های کربن می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای بهبود خواص مکانیکی پلی آمید 6 باشند.

در مقاله حاضر نانوکامپوزیت‌های سه‌تایی پلی آمید 6/ الاستومر/نانولوله‌های کربن توسط یک مخلوط‌کن داخلی تهیه شدند. درصد‌های وزنی مختلفی از (10 و 20)، عامل سازگار کننده (5 و 10) و نانولوله‌های کربن (0، 1، 2 و 3) در ماتریس پایه پلی آمید 6 استفاده شدند. آنگاه تأثیر غلظت نانولوله‌های کربن، الاستومر و عامل سازگار کننده بر خواص مکانیکی (شامل استحکام کششی، استحکام ضربه و مدول الاستیک) پلی آمید 6 به کمک روش عاملی کامل بررسی شدند.

2- مطالعات آزمایشگاهی**2-1- طراحی آزمایش**

طراحی کامل فاکتوریل با استفاده از همه‌ی ترکیبات احتمالی سطوح عوامل در هر آزمایش یا تکرار کامل آزمایش، نقاط تجربی ایجاد می‌کند. نقاط طراحی آزمایشی در یک طرح کامل فاکتوریل، رأس‌های یک ابر مکعب در فضای طراحی n بعدی است که با حداقل و حداکثر مقادیر هر یک از عوامل تعریف شده است. این نقاط تجربی را نقاط فاکتوریل نیز می‌نامند. به عنوان مثال، برای عامل دارای b سطحی از هر عامل، با در نظر گرفتن طرح کامل فاکتوریل،

پس از آماده شدن همه‌ی ترکیبات به کمک مخلوط‌کن داخلی، به کمک یک دستگاه پرس داغ به شکل ورقه با ضخامت مشخص درآمدند. دمای دستگاه پرس داغ 190°C تنظیم می‌شد. هر ترکیب به کمک قالب‌های مخصوص و کاغذهای نسوز بین دو فک پرس داغ قرار می‌گرفتند. هر ترکیب در ابتدا با اعمال یک فشار اولیه و به مدت 5 دقیقه تحت همان فشار گرم می‌شد؛ و در ادامه جهت خارج شدن حباب‌های ایجاد شده به مدت 2 دقیقه تحت یک فشار نهایی قرار می‌گرفتند. در نهایت ترکیب ورقه شده از پرس داغ خارج شده و بلافاصله توسط یک پرس دیگر سرد شده و ترکیب نهایی به شکل یک ورقه مهیا می‌شد. در آخرین مرحله از هر ورقه (ترکیب) بر اساس استانداردهای ASTM D638 برای آزمون کشش و ASTM D256 برای آزمون ضربه، پنج نمونه به کمک یک دستگاه پانچ مخصوص استخراج شد. به‌طور کلی مواد اولیه در 16 حالت اختلاط مطابق با جدول 1 ساخته شدند.

2-3- آزمون‌ها و روش‌ها

برای انجام آزمون کشش دستگاه زویبیک رول Z100 ساخت آلمان مورد استفاده قرار گرفت و این آزمون در دمایی اتاق و با سرعت فک متحرک 5 mm/min و تعداد 5 تکرار از هر ترکیب انجام شد. کشش نمونه‌ها تا زمان گسیختگی کامل آن‌ها ادامه پیدا می‌کرد. آزمون ضربه توسط دستگاه زویبیک مدل ML2953 ساخت کشور آلمان با وزنه 2 ژول در دمایی اتاق انجام شد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت کره جنوبی با ولتاژ 25 kw و جریان 3 A تا 2.5 A جهت شناسایی فازهای پلیمر زمینه پلی آمید 6 و نحوه توزیع و پراکندگی نانولوله‌های کربن و میزان از هم باز شدن صفحات استفاده شد. برای انجام بهتر آنالیز، نمونه‌های مورد بررسی در نیتروژن مایع شکسته شدند. برای این منظور نمونه‌ها ابتدا یک دقیقه در نیتروژن مایع غوطه‌ور شد و سپس شکسته شدند. برای جلوگیری از تجمع الکترونی و افزایش هدایت الکترونی و برای جلوگیری از پالس‌های زائد، سطح شکست نمونه‌ها توسط طلا به ضخامت 15 nm روکش دهی شدند.

3- نتایج و بحث

3-1- مطالعات ریخت‌شناسی

جهت بررسی کیفیت توزیع و پراکندگی نانولوله‌های کربن در زمینه دوتایی پلی آمید 6، از سطح شکست نمونه‌های ساخته شده تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شدند. شکل 1 الف تا ج تصاویر سطح شکست نمونه‌های شامل 1، 2 و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه پلیمری پلی آمید حاوی 10 درصد وزنی را نشان می‌دهد. همچنین، شکل 1 د تا و تصاویر سطح شکست نمونه‌های شامل 1، 2 و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه پلیمری پلی آمید حاوی 20 درصد وزنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از قسمت‌های مختلف شکل 1 مشخص است، نانولوله‌های کربن به‌صورت لوله‌های کوتاه و با رنگ روشن‌تر نسبت به زمینه قابل مشاهده هستند.

قسمت‌های الف و ب شکل 1 نشان می‌دهند که افزودن 1 و 2 درصد وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه دوتایی پلی آمید 6/10 درصد وزنی با توزیع و پراکندگی خوبی همراه شده است. در حالی که افزودن 3 درصد وزنی آن‌ها در زمینه مذکور (شکل 1-ج) با تجمع نانولوله‌ها در برخی مکان‌ها همراه شده است. محل تجمع نانولوله‌ها و کلوخه‌های تشکیل شده به کمک دایره‌های در شکل 1-ج مشخص شده‌اند.

باید تعداد آزمایش انجام شود. اگر n تکرار از آزمایش‌های کامل وجود داشته باشد، در این صورت n بار آزمایش‌های تک تکراری وجود خواهد داشت. در آزمایش، اگر همه فعل و انفعالات احتمالی در مدل گنجانده شود، باید حداقل دو تکرار داشته باشد تا مجموع مربع‌ها را به دلیل خطا تعیین کند [18]. در تحقیق حاضر، در دو سطح 10٪ و 20٪ درصد وزنی، نانولوله‌های کربن در چهار سطح 0، 1، 2 و 3 درصد وزنی و عامل سازگار کننده در دو سطح 5 و 10 درصد وزنی تغییر می‌کنند. بنابراین، باید بر اساس طرح عاملی کامل تمامی حالت‌های اختلاط به تعداد $2 \times 4 \times 2 = 16$ ساخته شوند. تمامی حالت‌های اختلاط بر پایه روش عاملی کامل در جدول 1 ارائه شده‌اند.

جدول 1 فرمولاسیون نانو کامپوزیت‌های تهیه شده

Table 1 Sample formulations of materials

| شماره ترکیب | درصد وزنی نانولوله‌ها | درصد وزنی POE g-MA | درصد وزنی POE | درصد وزنی پلی آمید 6 |
|-------------|-----------------------|--------------------|---------------|----------------------|
| 1 | 0 | 5 | 10 | 85 |
| 2 | 1 | 5 | 10 | 84 |
| 3 | 2 | 5 | 10 | 83 |
| 4 | 3 | 5 | 10 | 82 |
| 5 | 0 | 10 | 10 | 80 |
| 6 | 1 | 10 | 10 | 79 |
| 7 | 2 | 10 | 10 | 78 |
| 8 | 3 | 10 | 10 | 77 |
| 9 | 0 | 5 | 20 | 75 |
| 10 | 1 | 5 | 20 | 74 |
| 11 | 2 | 5 | 20 | 73 |
| 12 | 3 | 5 | 20 | 72 |
| 13 | 0 | 10 | 20 | 70 |
| 14 | 1 | 10 | 20 | 69 |
| 15 | 2 | 10 | 20 | 68 |
| 16 | 3 | 10 | 20 | 67 |

2-2- مواد

در این تحقیق از پلی آمید 6 با نام تجاری F223-D محصول شرکت آکولن با چگالی 31.113 g/cm^3 ساخت کشور هلند به‌عنوان ماتریس زمینه استفاده شد. ماده الاستومر مورد استفاده در این تحقیق از نوع LC370 ساخت شرکت LG CHAMS کره جنوبی با چگالی 0.87 g/cm^3 و شاخص جریان مذاب 3 g/10 min می‌باشد. همچنین نانولوله‌های کربن ساخت کشور چین با چگالی 2.1 g/cm^3 و درجه خلوص بالای 98 درصد تهیه شده است. بر اساس اطلاعات داده شده توسط شرکت سازنده قطر ذرات 10 nm و طول آن‌ها $30 \mu\text{m}$ می‌باشد.

2-3- تهیه نمونه‌ها

برای تهیه ترکیبات از دستگاه مخلوط‌کن داخلی HBI SYS90 شرکت هک ساخته شده کشور آمریکا استفاده شده است. ظرفیت هر بار ترکیب کردن مخلوط‌کن داخلی 55 g گزارش شده است. بر همین اساس هر ترکیب 50 گرم در نظر گرفته شد. برای شروع کار ترکیب‌سازی، دستگاه روی دمای 220°C ، سرعت چرخش مارپیچ 1/min 60 تنظیم شد. بر اساس ترکیب پایه 50 g، توزین مواد بر اساس مقدار هر مورد نیاز برای حالت انجام شد. در ادامه، ابتدا پلیمرهای پایه هر ترکیب به مدت 3 دقیقه مخلوط شده و زمانی که کاملاً به شکل مخلوط یکدست و ساختار خمیری شکل درآمدند نانوذرات به ترکیب پلیمری اضافه می‌شدند و عملیات ترکیب شدن مجموعه 7 دقیقه دیگر ادامه پیدا می‌کرد. در انتها، دستگاه مخلوط‌کن خاموش می‌شد و نانو کامپوزیت حاصل به‌صورت یک ترکیب نرم و خمیری به سرعت جمع‌آوری شده و با کمک یک گلتک ورقه می‌شدند.

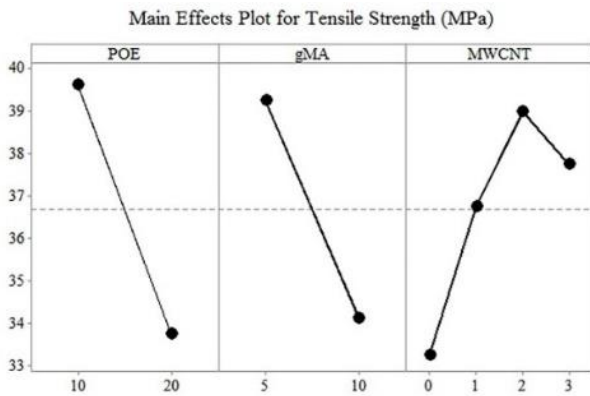


Fig. 2 Main effect plots for Tensile strength

شکل 2 نمودار اثر اصلی برای استحکام کششی

همان‌طور که از شکل 2 مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن از 0 تا حدود 2 درصد وزنی موجب افزایش استحکام کششی ترکیبات پایه از 34 تا حدود 40 MPa شده است. و در ادامه با افزایش 3 درصد وزنی از آن‌ها استحکام کششی ترکیبات اندکی دچار کاهش شده است. دلیل این افزایش در استحکام کششی به توزیع و پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در زمینه پلیمری مربوط می‌شود. هرگاه نانولوله‌های کربن با سطح ویژه زیاد و نسبت ابعاد بالا به خوبی در زمینه‌های پلیمری پراکنده شوند یک برهم‌کنش قوی بین آن‌ها و زمینه ایجاد می‌شود که به دنبال آن استحکام زمینه دچار افزایش می‌شود [19]. نتایج و تفسیرهای مشابهی در مورد افزایش استحکام کششی پلی آمید به دلیل حضور نانولوله‌های کربن در تحقیقات جداگانه‌ای ارائه شده‌اند [12,20].

از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رفت افزودن هر مقداری از و عامل سازگار کننده استحکام کششی ترکیبات را ضعیف‌تر کرده است. به طوری که، افزودن 20 درصد وزنی و 10 درصد وزنی عامل سازگار کننده به ترتیب استحکام کششی ترکیبات را 15% و 12% کاهش داده‌اند. کاملاً واضح است که هرگاه یک پلیمر با خاصیت الاستومری و استحکام پایین‌تر با یک پلیمر پایه با استحکام بالاتر ترکیب شود ترکیب حاصل نسبت به پلیمر پایه استحکام کمتری خواهد داشت [21]. نتایج حاصل از کار دانش پایه [17] و همکاران نشان می‌دهد که افزودن الاستومر به زمینه‌های پلیمری منجر به کاهش استحکام کششی آن‌ها می‌شود.

برهم‌کنش‌های دو به دو فاکتورهای ورودی بر استحکام کششی ترکیبات پایه در قالب رویه‌هایی در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 3-الف مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن تا 3 درصد وزنی در حضور هر مقداری از به زمینه پلی آمید یک روند ثابت و بدون تغییر در استحکام کششی را نشان می‌دهد به گونه‌ای ابتدا استحکام کششی افزایش یافته و سپس دچار اندکی کاهش شده است. روند افزایش - کاهش مشابهی از حضور هم‌زمان نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده در شکل 3-ب قابل مشاهده است. بنابراین، در مورد استحکام کششی ترکیبات پایه می‌توان گفت که بین نانولوله‌های کربن- و نانولوله‌های کربن-عامل سازگار کننده برهم‌کنشی وجود ندارد. همچنین، قسمت‌های الف و ب شکل 3 نشان می‌دهند که بیشترین استحکام کششی زمینه در حضور کمترین سطوح و عامل سازگار کننده و مقدار 2 درصد وزنی نانولوله‌ها حاصل شده است.

در شکل 3-ج تغییرات استحکام کششی در برابر الاستومر و عامل سازگار کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این رویه ملاحظه می‌شود، افزایش مقدار عامل سازگار کننده (از 5 تا 10 درصد وزنی) در حضور هر مقداری از

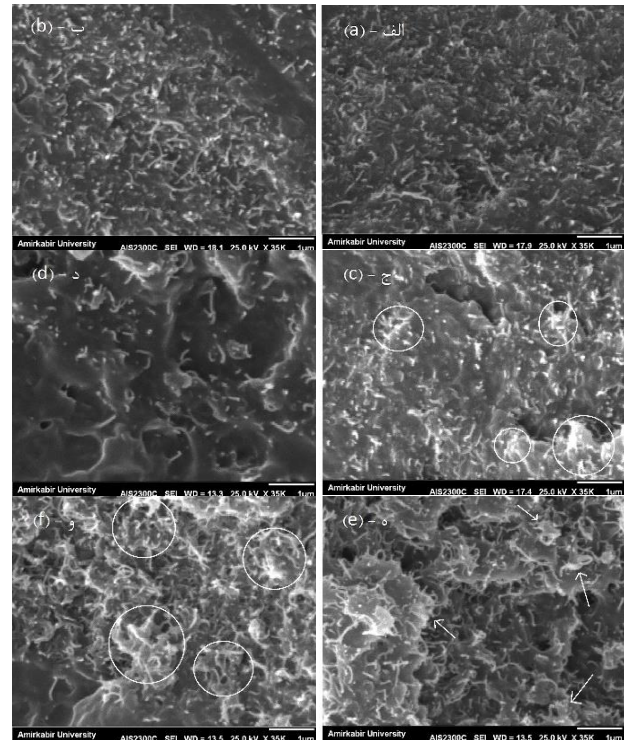


Fig. 1 Images from samples based PLA/10POE including a) 1 wt.% CNT, b) 2 wt.% CNT, c) 3 wt.% CNT and samples based PAL/20POE including d) 1 wt.% CNT, e) 2 wt.% CNT, f) 3 wt.% CNT

شکل 1 تصویر نمونه‌های پایه PA6/10POE شامل الف) 1٪ نانولوله‌ها، ب) 2٪ نانولوله‌ها، ج) 3٪ نانولوله‌ها و نمونه‌های پایه PA6/20POE شامل د) 1٪ نانولوله‌ها، ه) 2٪ نانولوله‌ها، و) 3٪ نانولوله‌ها.

از طرف دیگر، کیفیت پراکندگی نانولوله‌های کربن در زمینه پلی آمید حاوی 20٪ وزنی نسبت به زمینه پلی آمید حاوی 10٪ وزنی نانولوله‌ها ضعیف‌تر می‌باشد. به گونه‌ای که تنها حضور 1٪ وزنی نانولوله‌ها در زمینه پلی آمید حاوی 20٪ وزنی (شکل 1-د) از توزیع و پراکندگی خوبی برخوردار است و در ادامه با افزودن 2٪ وزنی نانولوله‌ها به زمینه مذکور (شکل 1-ه) به هم چسبیدگی نانولوله‌ها در حجم کم شروع شده است. محل‌های چسبیدگی نانولوله‌ها در حجم کم در قسمت ه شکل 1 به کمک فلش‌هایی مشخص شده‌اند. نهایتاً، در شکل 1-و کلوخگی شدید 3٪ وزنی نانولوله‌های کربن در زمینه پلی آمید حاوی 20٪ وزنی به وضوح قابل مشاهده است. حجم زیادی از تجمع شدید نانولوله‌های کربن در زمینه دوتایی پلی آمید 20/6 درصد وزنی در شکل 1 قسمت و به کمک دایره‌هایی مشخص شده است. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که نانولوله‌های کربن تا بارگذاری 2 درصد وزنی در روش اختلاط مذاب موقع شکسته شدن نمونه نه تنها از زمینه خارج نشده‌اند بلکه به خوبی به زمینه پلیمری دوتایی چسبیده‌اند. و این مسئله می‌تواند نویدبخش بهبود خواص مکانیکی پلیمر هدف به خاطر حضور نانولوله‌های کربن باشد.

3-2- استحکام کششی

برای بررسی تأثیر میزان بارگذاری پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی شامل نانولوله‌های کربن، و عامل سازگار کننده و همچنین برای بررسی برهم‌کنش‌های بین آن‌ها از نمودارهای استخراج شده از روش عاملی کامل استفاده شده است. شکل 2 استحکام کششی ترکیبات در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد.

با افزودن نانولوله‌های کربن (با وجود توزیع و پراکندگی مناسب) منجر به افزایش مناسب مدول الاستیک آن می‌شود.

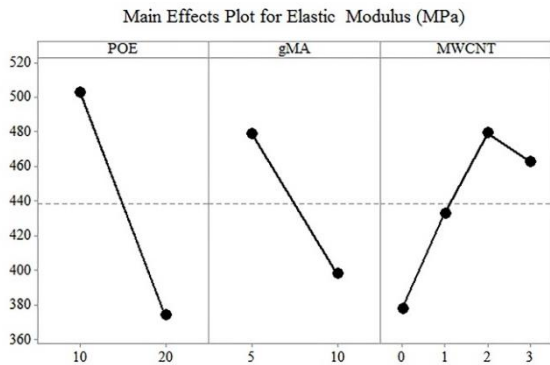


Fig. 4 Main effect plots for Elastic Modulus

شکل 4 نمودار اثر اصلی برای مدول الاستیک

از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رفت افزودن هر مقداری از و عامل سازگار کننده مدول الاستیک ترکیبات را ضعیف‌تر کرده است. به طوری که، افزودن 20 درصد وزنی و 10 درصد وزنی عامل سازگار کننده به ترتیب مدول الاستیک ترکیبات را 24٪ و 20٪ کاهش داده‌اند. کاملاً واضح است که هرگاه یک پلیمر با خاصیت الاستومری و مدول الاستیک پایین‌تر با یک پلیمر پایه با مدول الاستیک بالاتر ترکیب شود ترکیب حاصل نسبت به پلیمر پایه مدول الاستیک کمتر خواهد داشت [24]. نتایج مشابهی از تأثیر بر استحکام کششی زمینه‌های پلیمری گزارش شده است [25].

تغییرات مدول الاستیک زمینه در مقابل - نانولوله‌های کربن، عامل سازگار کننده- نانولوله‌های کربن و -عامل سازگار کننده به ترتیب در قسمت‌های الف، ب و ج شکل 5 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل 5-الف مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن تا 3 درصد وزنی در حضور هر مقداری از به زمینه پلی آمید یک روند ثابت و بدون تغییر در مدول الاستیک را نشان می‌دهد به گونه‌ای ابتدا مدول الاستیک افزایش یافته و سپس دچار اندکی کاهش شده است. روند افزایش - کاهشی مشابهی از حضور هم‌زمان نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده در شکل 5-ب قابل مشاهده است. بنابراین، در مورد مدول الاستیک ترکیبات پایه می‌توان گفت که بین نانولوله‌های کربن- و نانولوله‌های کربن-عامل سازگار کننده برهم‌کنشی وجود ندارد. همچنین، قسمت‌های الف و ب شکل 5 نشان می‌دهند که بیشترین مدول الاستیک زمینه در حضور کمترین سطوح و عامل سازگار کننده و مقدار 2 درصد وزنی نانولوله‌ها حاصل شده است.

نهایتاً شکل 5-ج نشان می‌دهد که افزودن عامل سازگار کننده از 5 تا 10 درصد وزنی در حضور 10 درصد وزنی موجب ایجاد یک روند کاهشی در مدول الاستیک ترکیبات شده است. در حالی که این روند کاهشی ناشی از حضور عامل سازگار کننده در حضور 20 درصد وزنی به یک روند بی‌اثر (اثر کاهشی بسیار ضعیف) تبدیل شده است. بنابراین، همان‌طور که از شکل 5-ج مشاهده می‌شود حضور هم‌زمان مقادیر بالای سازگار کننده و در زمینه پلیمری مدول الاستیک آن را با شدت کمتری کاهش داده است و این بدین معنی است که در مورد مدول الاستیک ترکیبات بین عامل سازگار کننده و یک برهم‌کنش مثبت وجود دارد.

استحکام کششی زمینه را دچار کاهش می‌کند. بنابراین، می‌توان گفت که در مورد استحکام کششی زمینه بین این دو فاکتور برهم‌کنش خاصی وجود ندارد.

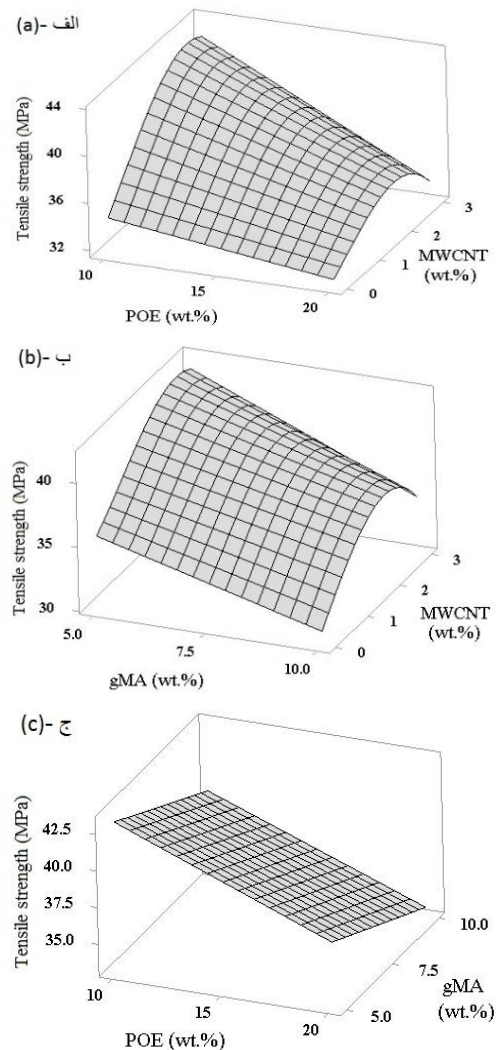


Fig. 3 Surfaces related to tensile strength versus (a) Carbon and polyolefin elastomer nanotubes (b) Carbon nanotubes and compatible agent (c) Elastomeric polyolefin and compatible agent

شکل 3 رویه‌های مربوط به استحکام کششی در مقابل (الف) نانولوله‌های کربن و الاستومر (ب) نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده (ج) الاستومر و عامل سازگار کننده

3-3-مدول الاستیک

مدول الاستیک ترکیبات در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن از 0 تا حدود 2 درصد وزنی موجب افزایش مدول الاستیک ترکیبات پایه از 380 تا حدود 500 MPa شده است. و در ادامه با افزایش 3 درصد وزنی از آن‌ها مدول الاستیک ترکیبات اندکی دچار کاهش شده است. دلیل این افزایش در مدول الاستیک به توزیع و پراکندگی مناسب نانولوله‌ها در زمینه پلیمری مربوط می‌شود. هرگاه پراکندگی مناسبی در جهت‌های تصادفی همراه زمینه پلیمری اضافه شوند و با پراکندگی مناسبی در جهت‌های تصادفی همراه باشد سفتی زمینه پلیمری به خوبی دچار افزایش خواهد شد. [22] در تحقیق مشابهی پالاری [23] و همکارانش نشان دادند که مدول الاستیک پلی آمید 6

همان‌طور که از شکل 6 مشاهده می‌شود افزودن نانولوله‌های کربن از 0 تا 1 درصد وزنی موجب افزایش اندک 4 درصدی استحکام ضربه ترکیبات پایه از حدود 45 J/m تا حدود 47 J/m شده است. در ادامه با افزایش مقادیر بیشتر از 2 درصد وزنی از آن‌ها استحکام ضربه ترکیبات دچار کاهش شدیدی شده است. دسا و همکارانش [26] در یک تحقیق نشان دادند که افزودن نانولوله‌های کربن چند جداره در بارگذاری‌های کم به زمینه پلیمری پلی لاکتیک توانسته است استحکام ضربه پلیمر هدف را اندکی افزایش دهد.

از طرف دیگر، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، افزودن هر مقداری از و عامل سازگار کننده، خاصیت تردی زمینه را کاهش داده و استحکام ضربه ترکیبات را بهبود بخشیده است. به طوری که، افزودن 20 درصد وزنی و 10 درصد وزنی عامل سازگار کننده به ترتیب استحکام ضربه ترکیبات را 27٪ و 13٪ افزایش داده‌اند. کاملاً واضح است که هرگاه یک پلیمر با خاصیت الاستومری و چقرمه‌تر با یک پلیمر پایه با خاصیت شکنندگی بیشتر ترکیب شود ترکیب حاصل نسبت به پلیمر پایه استحکام ضربه بیشتری خواهد داشت [27]. به طور کلی، افزودن با خاصیت الاستومری بسیار بالا به زمینه‌های پلیمری شکننده، باعث افزایش استحکام ضربه و چقرمگی آن‌ها می‌شود [28].

شکل 7 رویه‌های استخراج شده اثر دو به دو فاکتورهای ورودی بر استحکام ترکیبات زمینه را نشان می‌دهد. شکل 7-الف استحکام ضربه بر اساس دو متغیر نانولوله‌های کربن و الاستومر را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حضور 10 و 20 درصد الاستومر، با افزایش نانولوله‌های کربن از 0 تا 3 درصد وزنی استحکام ضربه ابتدا اندکی افزایش یافته و سپس دچار کاهش شده است. روند مشابهی از تأثیر هم‌زمان نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده بر استحکام ضربه پلیمر زمینه در شکل 7-ب قابل مشاهده است. بنابراین، هیچ برهم‌کنشی بین - نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده- نانولوله‌های کربن برای استحکام ضربه وجود ندارد.

در شکل 7-ج تغییرات استحکام ضربه در برابر الاستومر و عامل سازگار کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این رویه مشاهده می‌شود، افزایش هر مقدار از عامل سازگار کننده در حضور هر مقداری از استحکام ضربه زمینه را به خوبی بهبود می‌بخشد. بنابراین، می‌توان گفت که در مورد استحکام ضربه زمینه بین این دو فاکتور یک برهم‌کنش مثبت وجود دارد. این برهم‌کنش مثبت بین و عامل سازگار کننده منجر به یک هم‌افزایی مناسب در استحکام ضربه شده است.

5-3- پیش‌بینی خواص مکانیکی

برای تحلیل مدل‌های رگرسیون در روش فول فاکتوریل نرم‌افزار مینی تب جدول آنالیز واریانس و ضریب تعیین مورد بررسی قرار می‌گیرند. جدول آنالیز واریانس یک روش آماری است که مجموعه‌ای نتایج ضروری را بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های تجربی ارائه می‌دهد. در این جدول F به عنوان نرخ واریانس فیشر¹ است که مقدار آن معیار تغییر در داده‌ها در مورد میانگین است. مقدار احتمال (P-value) به عنوان پایین‌ترین سطح اهمیت منجر به رد فرضیه در نظر گرفته می‌شود. به گونه‌ای که، اثر یک پارامتر بر یک پاسخ خروجی زمانی معنی‌دار است که مقدار P آن برابر یا کمتر از 0.05 باشد [29]. همچنین مقدار 0.05 برای P یعنی مدل برازش شده با اطمینان 95٪ مورد تأیید است. مقادیر P و F مربوط به آنالیز واریانس و تحلیل آماری خواص مکانیکی در جدول 2 ارائه شده است.

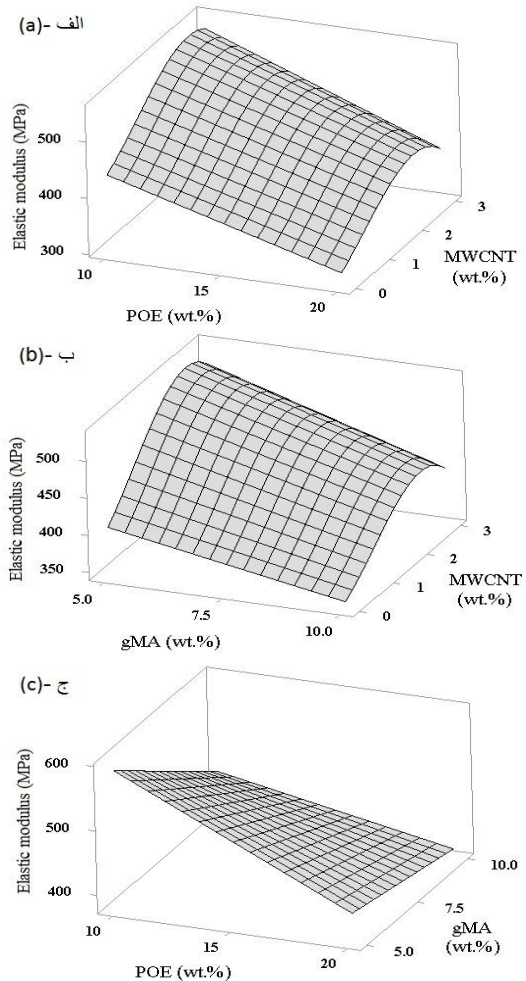


Fig. 5 Surfaces related to elastic modulus versus (a) Carbon and polyolefin elastomer nanotubes (b) Carbon nanotubes and compatible agent (c) Elastomeric polyolefin and compatible agent

شکل 5 رویه‌های مربوط به مدول الاستیک در مقابل الف) الاستومر و عامل سازگار کننده ب) نانولوله‌های کربن و الاستومر ج) نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده

4-3- استحکام ضربه

شکل 6 استحکام ضربه ترکیبات در مقابل تغییرات پارامترهای ورودی را نشان می‌دهد.

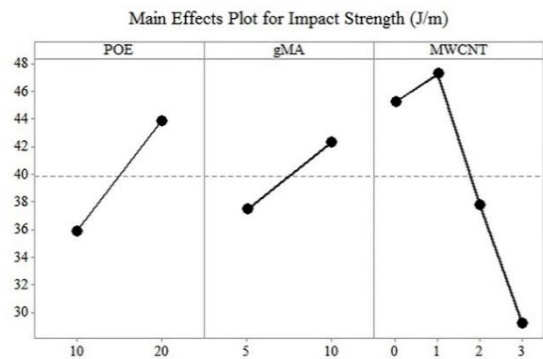


Fig. 6 Main effect plots for Impact Strength

شکل 6 نمودار اثر اصلی برای استحکام ضربه

¹ - Fisher's variance ratio

همان‌طور که از جدول 2 مشخص است هر سه فاکتور اصلی نانولوله‌ها، و عامل سازگار کننده با مقادیر p قابل قبول با درصد اطمینان بالای بر خواص مکانیکی مورد بررسی مؤثر هستند. در بین فاکتورهای اصلی عامل سازگار کننده با مقادیر 0.812 و 0.692 کمترین اثر را در استحکام کششی و استحکام ضربه ترکیبات دارد. همچنین، مقدار P نانولوله‌های کربن برای مدول الاستیک 0.614 به دست آمده است. در نهایت جدول نشان می‌دهد که برهم‌کنش‌های دوتایی، سه‌تایی، مربعی و برخی مکعبیات فاکتورها مقادیر P متفاوتی را ارائه کرده‌اند. از طرف دیگر، بررسی مقادیر F در جدول مشخص می‌کند که در بین سه فاکتور اصلی برای استحکام کششی نانولوله‌ها با کمترین مقدار P دارای بیشترین مقدار $F=12.54$ ، برای مدول الاستیک و استحکام ضربه با کمترین مقادیر P به ترتیب دارای بیشترین مقادیر $F=71.26$ و $f=2.5$ را به خود اختصاص داده‌اند.

در ارائه مدل‌های رگرسیون، ضریب تعیین¹ قدرت توضیح دهنده‌گی مدل را نشان می‌دهد. این ضریب نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. یا به عبارت دیگر ضریب تعیین نشان دهنده این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می‌باشد [30]. مدل‌های رگرسیون استخراج شده از روش عاملی کامل به همراه مقادیر ضریب تعیین برای خواص مکانیکی مورد بررسی در جدول 3 ارائه شده‌اند.

همان‌طور که از جدول 3 مشاهده می‌شود مقدار ضریب تعیین برای همه مدل‌های رگرسیون استخراج شده دارای مقدار بالاتر از 92٪ به دست آمده است. این مسئله نشان می‌دهد که برای همه‌ی مدل‌های رگرسیون، منحنی رگرسیون به خوبی بیشتر خوانده‌ها رو معرفی کرده است. در واقع خط رگرسیون توانسته است در همه موارد از بیشتر نقاط عبور کند. همچنین دقت در ضرایب مدل‌های ارائه شده در جدول مشخص می‌کند که نانولوله‌های کربن با ضرایب 8.4 و 9.75 بیشترین تأثیر را در تعیین استحکام کششی و استحکام ضربه ترکیبات دارا هستند. همچنین عامل سازگار کننده با ضریب 48.75- بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیک ترکیبات دارد.

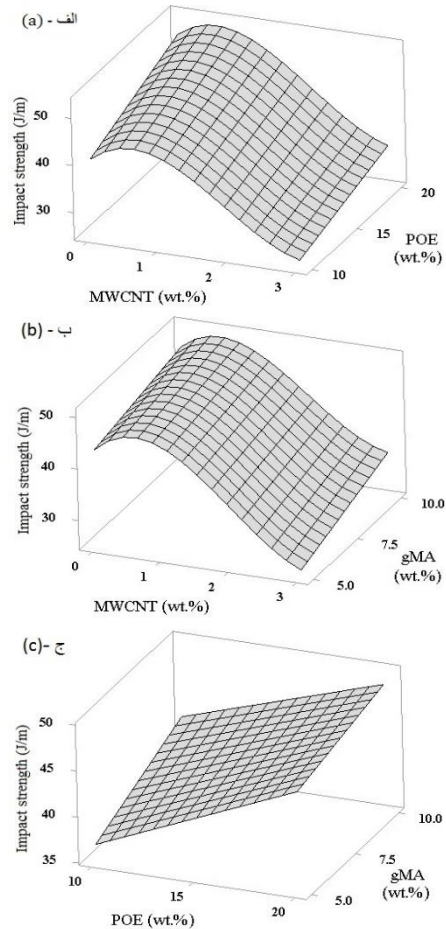


Fig. 7 Surfaces related to impact strength versus (a) Carbon and polyolefin elastomer nanotubes (b) Carbon nanotubes and compatible agent (c) Elastomeric polyolefin and compatible agent

شکل 7 رویه‌های مربوط به استحکام ضربه در مقابل الف) نانولوله‌های کربن و الاستومر، ب) نانولوله‌های کربن و عامل سازگار کننده، ج) الاستومر و عامل سازگار کننده

جدول 2 نتایج آنالیز واریانس

Table 2 Results of analysis of variance

| Source | استحکام کششی | | مدول الاستیک | | استحکام ضربه | |
|-------------------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|
| | F-Value | P-Value | F-Value | P-Value | F-Value | P-Value |
| Regression | 107.95 | 0.000 | 66.27 | 0.001 | 42.29 | 0.001 |
| POE | 1.62 | 0.272 | 71.26 | 0.001 | 2.50 | 0.189 |
| Gma | 0.06 | 0.812 | 46.20 | 0.002 | 0.18 | 0.692 |
| MWCNT | 12.54 | 0.024 | 0.30 | 0.614 | 1.93 | 0.237 |
| MWCNT*MWCNT | 3.33 | 0.142 | 1.07 | 0.359 | 17.18 | 0.014 |
| POE*Gma | 10.01 | 0.034 | 31.14 | 0.005 | 0.35 | 0.585 |
| POE*MWCNT | 20.60 | 0.011 | 1.19 | 0.336 | 0.80 | 0.421 |
| gMA*MWCNT | 1.48 | 0.290 | 0.00 | 0.996 | 0.55 | 0.499 |
| MWCNT*MWCNT*MWCNT | 3.38 | 0.140 | 3.31 | 0.143 | 12.26 | 0.025 |
| POE*gMA*MWCNT | 18.38 | 0.013 | 1.73 | 0.259 | 3.16 | 0.150 |
| POE*MWCNT*MWCNT | 0.21 | 0.672 | 0.96 | 0.383 | 0.00 | 0.965 |
| gMA*MWCNT*MWCNT | 10.21 | 0.033 | 0.24 | 0.650 | 0.92 | 0.392 |

¹ - R square

جدول 3. مدل‌های رگرسیون ارائه شده از روش عاملی کامل

Table 3 Regression models presented from full factorial method

| مدل رگرسیون | ضریب تعیین |
|--|------------|
| Tensile = 37.52 + 0.188x - 0.075y + 8.40z + 2.00z ² - 0.0580xy - 0.513xz - 0.275yz - 0.375z ³ + 0.04200xyz - 0.0125xz ² - 0.1750yz ² | 92/96% |
| Modulus = 915.9 - 30.16x - 48.57y + 31.4z + 27.5z ² + 2.478xy + 2.99xz + 0.03yz - 9.00x ³ - 0.312xyz - 0.650xz ² + 0.65yz ² | 99.45% |
| Impact = 28.78 + 0.678x + 0.364y + 9.57z - 13.18z ² + 0.0316xy + 0.294xz + 0.486yz + 2.075z ³ - 0.0506xyz + 0.153yz ² | 95/15% |
| x=POE y=Gma z=MWCNT | |

4-نتایج

در این تحقیق، خواص مکانیکی ترکیبات پایه پلی آمید 6/ تقویت شده با نانولوله‌های کربن با کمک روش طراحی آزمایش عاملی کامل مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل به صورت خلاصه در زیر ارائه شده‌اند:

1- نتایج آزمون کشش نشان داد که افزودن نانولوله‌های کربن تا بارگذاری حدود 2 درصد وزنی استحکام کششی و مدول الاستیک را به ترتیب به میزان‌های 21٪ و 32٪ بهبود بخشیده است.

2- نتایج حاصل از آزمون ضربه نشان دادند که افزودن تنها 1 درصد وزنی از نانولوله‌های کربن توانسته است استحکام ضربه ترکیبات را به میزان 9٪ افزایش دهد. از طرفی، حضور 20 درصد وزنی از 10 درصد وزنی از عامل سازگار کننده، استحکام ضربه را ب ترتیب به میزان 20٪ و 16٪ افزایش داده است.

3- نتایج حاصل از تعامل‌ها نشان داد که در بیشتر موارد در مورد خواص مکانیکی بین 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن- عامل سازگار کننده و 3 درصد وزنی نانولوله‌های کربن- یک برهم‌کنش منفی وجود دارد.

4- رویه‌های استخراج شده از روش فاکتوریل نشان داد که در بیشتر خواص مکانیکی مورد بررسی بین فاکتورهای ورودی برهم‌کنش خاصی وجود ندارد و در مورد مدول الاستیک ترکیبات بین حضور هم‌زمان - عامل سازگار کننده یک برهم‌کنش مثبت وجود دارد.

5- ضریب تعیین بالای 92٪ درصد برای مدل‌های رگرسیون استخراج شده نشان دادند که همخوانی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌ها وجود دارد.

7-مراجع

- [6] Ararat, C. A., Percino, M. J., and Murillo, E. A., "Compatibilization of LDPE/PA6 by Using a LDPE Functionalized with a Maleinized Hyperbranched Polyester Polyol", *Macromolecular Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 203–210, 2019.
- [7] Chiu, F.C., and Deng, T.L., "Polyamide 4,6 Nanocomposites With and Without the use of a Maleated Polyolefin Elastomer as a Toughener", *Journal of Materials Chemistry and Physics*, Vol. 125, No 3, pp. 769-776, 2011.
- [8] Wang, C., Su, J.X., Li, J., Yang, H., Zhang, Q., Du, R.N., and Fu, Q., "Phase morphology and toughening mechanism of polyamide6/EPDM-g-MA blends obtained via dynamic packing injection molding", *Polymer*, Vol. 47, No. 9, pp. 3197-3206, 2006.
- [9] Potts J. R., "Preparation, Properties, and Structure-Property Relationships of Graphene-Polymer Nanocomposites", Ph.D. Thesis, University of Texas, USA, 2012.
- [10] Yuen, S.M., Ma, C.C.M., Chiang, C.L., Lin, Y., and Teng, C.C., "Preparation and Morphological, Electrical, and Mechanical Properties of Polyimide-Grafted MWCNT/Polyimide Composite," *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, Vol. 45, No. 15, pp. 3349-3358, 2007.
- [11] Chen, P., Kim, H.S., Jin, H.J., "Preparation, Properties and Application of Polyamide/Carbon Nanotube Nanocomposites," *Journal of Macromolecular Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 207-217, 2009.
- [12] Esmaili, P., Azdast, T., Doniavi, A., Hasanzadeh, R., Mamaghani, S., and Eungkee Lee, R., "Experimental investigation of mechanical properties of injected polymeric nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes according to design of experiments", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 67-74, 2015.
- [13] Irisawa, T., Shimamoto, D., Takeshige, K., Doi, G., Tanabe, Y., and Hotta, Y., "The effects of pulverization treatment for the mechanical properties of polyamide 6 fiber filled with carbon nanotubes", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 254, No. 114514, 2020.
- [14] Wang, Q., Zhu, J., Wang, P., Li, L., Yang, Q., Huang, Y., "Effect of Blending Sequence on the Morphology and Properties of Polyamide 6/EPDM-g-MA/Epoxy Blends", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 124, pp. 5064–5070, 2012.
- [15] Mistretta, M.C., Morreale, M., and La Mantia, F.P., "Thermomechanical degradation of polyethylene/polyamide 6 blend-clay nanocomposites," *Polymer degradation and stability*, Vol. 99, pp. 61-67, 2014.
- [16] Bikshamaiah, N., Babu, N.M., Kumar, D.S., Ramesh, S., Dumpala, M., Sainath, V., and Madhukar, K., "Carbon nanotube functional group-dependent compatibilization of polyamide 6 and poly(methyl methacrylate) nanocomposites", *Iranian Polymer Journal*, Vol. 30, No. 8, pp. 789–799, 2021.
- [1] Ghorbankhan, A., Nakhaei, M.R., and Safarpour, P., "Modeling and Optimization of Mechanical Properties of PA6/NBR Nanocomposite Reinforced with Perlite Nanoparticles", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1421-1430, 2021.
- [2] Mirzaei, J., Fereidoon, A., and Ghasemi-Ghalebahman, A., "Experimental analysis of mechanical properties of graphene/kenaf/basalt reinforced hybrid nanocomposites using response surface methodology", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 43, No. 215, 2021.
- [3] Hamidi, E., and Panahizadeh, V., "Experimental Analysis of Mechanical Properties of Nanocomposites Based on Poly amide 6/ EPDM /Carbon Nanotubes", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 8, No. 1, pp. 1453-1460, 2021.
- [4] Utracki, L.A., "Polymer blends handbook, First ed. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 1045-1070, 2002.
- [5] Chiu, H.-T., and Chuang, C.-Y., "The mechanical and rheological behavior of the PA/TPU blend with POE-g-MA modifier", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 115, No. 3, pp. 1278–1282, 2010.

- [30] Frost, J., "Multiple regression analysis: Use adjusted R-squared and predicted R-squared to include the correct number of variables. Minitab Blog 13:6, 2013.
- [17] Daneshpayeh, s., Ghasemi, I., Ashenai Ghasemi, F., and Panahizadeh, V., "Achieve balanced stiffness and toughness properties of nanocomposites based on poly(lactic acid)/polyolefin by using fuzzy rule-based system", *Express polymer letters*, Vol. 16, No. 2, pp. 152-170, 2022.
- [18] saberian, M. H., "Investigation on Mechanical Properties of Epoxy Resin/ XNBR/ Graphene Ternary Nanocomposite", MSc Thesis, Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran, Iran, 2017.
- [19] Liu, T., Phang, I.Y., Shen, L., Chow, S.Y., Zhang, W.D., "Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composites", *Journal of Macromolecules*, Vol. 37, No. 19, pp. 127-139, 2004.
- [20] Jahed, M., Naderi, Gh., Ghoreishy, M.H.R., "Microstructure, Mechanical, and Rheological Properties of Natural Rubber/Ethylene Propylene Diene Monomer Nanocomposites Reinforced by Multi-Wall Carbon Nanotubes", *Journal of Polymer Composites*, Vol. 39, No. (S2), pp. E745–E753, 2018.
- [21] AshenaiGhasemi, F., Ghasemi, I., Basiri, M., "Experimental analysis of mechanical properties of polypropylene in presence of graphene nano plates and polyolefine elastomer in different manufacturing times", In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 225-232, 2015.
- [22] Irisawaa, T., Shimamoto, D., Takeshigea, K., Doia, G., Tanabea, Y., and Hottab, Y., "The effects of pulverization treatment for the mechanical properties of polyamide 6 fiber filled with carbon nanotube", *Materials Science & Engineering B*, Vol. 254, No. 114514, 2020.
- [23] Palardy, G., Trudel-Boucher, D., Hubert, P., "Investigation of a Postprocessing Method to Tailor the Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polyamide Fibers, Investigation of a Postprocessing Method to Tailor the Mechanical Properties of Carbon Nanotube/Polyamide Fiber," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 130, No. 5, pp. 4375–4382, 2013.
- [24] Hsien-Tang, C., Chao-Yin, C., "The Mechanical and Rheological Behavior of the PA/TPU Blend with POE-g-MA Modifier. Graduate School of Polymer Engineering", National Taiwan University of Science and Technology, Taipei 106, Taiwan, Republic of China, 2003.
- [25] Do, V.T.; Nguyen-Tran, H.D.; Chun, D.M. Effect of polypropylene on the mechanical properties and water absorption of carbon-fiber-reinforced-polyamide-6/polypropylene composite", *Composite Structures*, Vol. 150, pp. 240–245, 2016.
- [26] Mat Desa, M.S.Z., Hassan, A., and Arsad, A., "The Effect of Natural Rubber Toughening on Mechanical Properties of Poly (lactic Acid)/ Multi-walled Carbon Nanotube Nanocomposite," *Advanced Materials Research*, Vol. 747, pp. 639-642, 2013.
- [27] Shoartz, S.S., and Godman, S.H., "Thermoplastic," Translation by Abasian, A. and Manochehri, S. and Nazokdast, H., First edition., Behrozan Publicatin Company, Tehran, pp.1-276, 1377.
- [28] Tjong, S.C., "The falling weight impact properties of maleic anhydride compatibilized polypropylene– polyamide blends", *Journal of Materials Science*, Vol. 32, pp. 4613–4617, 1997.
- [29] Scheffe, H., "The analysis of variance". New York, John Wiley and Sons, 1999.